

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局



(43) 国际公布日  
2018 年 1 月 25 日 (25.01.2018)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号  
WO 2018/014602 A1

- (51) 国际专利分类号:  
G01S 19/47 (2010.01) G01C 21/20 (2006.01)  
G01C 21/16 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/080383
- (22) 国际申请日: 2017 年 4 月 13 日 (13.04.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
201610575270.4 2016年7月19日 (19.07.2016) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。
- (72) 发明人: 陈熙源 (CHEN, Xiyuan); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。崔冰波 (CUI, Bingbo); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。王威 (WANG, Wei); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。赵正扬

(ZHAO, Zhengyang); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。方琳 (FANG, Lin); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211189 (CN)。

- (74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM,

(54) Title: VOLUME KALMAN FILTERING METHOD SUITABLE FOR HIGH-DIMENSIONAL GNSS/INS DEEP COUPLING

(54) 发明名称: 适于高维GNSS/INS深耦合的容积卡尔曼滤波方法

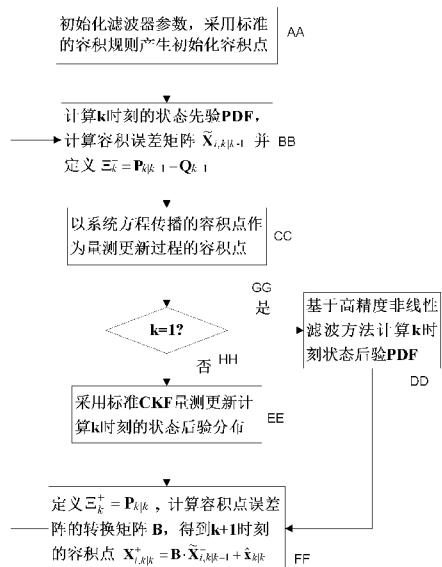


图 1

AA Initializing a filter parameter, and using a standard volume rule to generate an initialization volume point.  
BB Calculating a state prior PDF for a moment k, calculating a volume error matrix, and defining  
CC Using a volume point transmitted by means of a system equation as a volume point of a measurement and update process  
DD Calculating a state posterior PDF for the moment k based on a high-precision non-linear filtering method  
EE Using a standard CKF to measure, update and calculate a state posterior distribution of the moment k  
FF Defining, and calculating a conversion matrix B of a volume point error matrix to obtain a volume point of a moment k+1  
GG Yes  
HH No

(57) Abstract: Disclosed is a volume Kalman filtering method suitable for high-dimensional GNSS/INS deep coupling, comprising: S1. constructing a high-dimensional GNSS/INS deep coupling filtering model; S2. using a standard volume rule for the constructed filtering model to generate an initialization volume point; and S3. using a new volume point to update the rule, and then performing CKF filtering. The present invention is applicable to high-dimensional GNSS/INS deep coupling filtering, and is high in precision and stability.

(57) 摘要: 本发明公开了一种适于高维GNSS/INS深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 包括: S1、构造高维GNSS/INS深耦合滤波模型; S2、对构造的滤波模型采用标准容积规则产生初始化容积点; S3、采用新型容积点更新规则进行CKF滤波。本发明适于高维GNSS/INS深耦合滤波, 且精度高, 稳定性高。

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,  
UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区  
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,  
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,  
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,  
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,  
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,  
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,  
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格 (细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

## 适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法

### 技术领域

本发明涉及滤波技术，尤其涉及一种适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法。

### 背景技术

非线性滤波是组合导航和目标跟踪领域中常用信息融合技术。不同于目标跟踪模型中显著的非线性，组合导航中的非线性误差一般较弱，然而受滤波器结构、传感器采样率、量测质量以及滤波更新率等因素影响其非线性表现出较强的时变特性。特别是当系统初始误差较大、量测噪声较大以及系统载体大机动的情况下，基于卡尔曼滤波(KF)的非线性状态估计常常难以稳定工作。扩展卡尔曼滤波器(EKF)在工程领域应用较为广泛，其基于雅克比矩阵解决系统的非线性问题，状态估计精度可达到泰勒级数展开的一阶水平，在载体静止或者低动态情况下获得了良好的效果，但是对强非线性系统估计精度较差。以无迹卡尔曼滤波(UKF)为代表的采样点逼近滤波方法一经提出就获得迅速应用，其以多点采样后雅克比矩阵的期望值代替 EKF 中单点的雅克比矩阵，对非线性引起的不确定性具有更好的平滑效果。容积卡尔曼滤波(CKF)较 UKF 在高维系统状态估计中具有更好的精度和稳定性，虽然其均值精度在非线性的高斯噪声模型可以达到泰勒级数三阶，其方差的估计精度只在泰勒级数一阶水平。UKF 采用改进的 UT 采样方法处理高维滤波中采样点的 non-local sampling 问题，提高了方差估计的精度，由于 CKF 采用对称采样策略其无法采用中心点权值捕获方差的高阶信息。

状态误差方差估计的精度问题和一致性问题在高维的组合导航系统中更为突出。比如工程上 GNSS/INS 松组合一般采用 15 维，紧组合一般采用 17 或者更高，而深耦合中由于需要确保 INS 输出量对 GNSS 跟踪环路的辅助效果，需要更多的惯性器件状态误差，同时为了消除辅助信息与量测值的相关性误差，需要增加码跟踪环路和载波跟踪换路的状态误差量到组合滤波器的状态量中。以常规的 4 颗可见卫星为例其增加的跟踪环路的状态量维数为 12 维，因此现有的非线性滤波方法难以适用高维 GNSS/INS 深耦合状态估计问题。

### 发明内容

发明目的：本发明针对现有技术存在的问题，提供一种适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法。

技术方案：本发明所述的适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法，包括：

- S1、构造高维 GNSS/INS 深耦合滤波模型；
- S2、对构造的滤波模型采用标准容积规则产生初始化容积点；
- S3、采用新型容积点更新规则进行 CKF 滤波。

进一步的, 所述步骤 S1 包括:

S11、分别设置 INS 和 GNSS 子系统的 INS 状态量为  $\mathbf{x}_I$ 、GNSS 状态量为  $\mathbf{x}_G$ , 其中,

$$\mathbf{x}_I = [\delta \mathbf{P} \quad \delta \mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$$

$$\mathbf{x}_G = [b_c \quad d_c \quad \delta \mathbf{p}_{dll} \quad \delta \mathbf{\Phi}_{pll} \quad \delta \mathbf{f}_{pll}]$$

式中,  $[\delta \mathbf{P} \quad \delta \mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$  分别依次为 3 维位置误差、速度误差、姿态误差、加速度计系数误差、加速度计系数零偏、陀螺仪系数误差与常值漂移;  
 $[b_c \quad d_c \quad \delta \mathbf{p}_{dll} \quad \delta \mathbf{\Phi}_{pll} \quad \delta \mathbf{f}_{pll}]$  分别依次为接收机时钟偏置、时钟漂移、码跟踪环路的鉴相伪距误差、载波跟踪环路的相位误差和载波跟踪环路的频率误差;

S12、根据状态量  $\mathbf{x}_I$ 、 $\mathbf{x}_G$  建立 GNSS/INS 深耦合的系统模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_I \\ \dot{\mathbf{x}}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I(t) & O_{21 \times 2} & O_{21 \times 4} & O_{21 \times 8} \\ O_{2 \times 21} & F_G(t) & O_{2 \times 4} & O_{2 \times 8} \\ F_{ID}(t) & O_{4 \times 2} & F_D(t) & O_{4 \times 8} \\ F_{IP}(t) & O_{8 \times 2} & O_{8 \times 4} & F_P(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} W_I \\ W_G \end{bmatrix}$$

式中,  $F_I(t) = \begin{bmatrix} F_N(t) & F_S(t) \\ O_{9 \times 9} & F_M(t) \end{bmatrix}_{21 \times 21}$ ,  $F_N(t)$  为 9 维惯导基本系统矩阵和  $O_{3 \times 9}$ ,

$$F_S(t) = \begin{bmatrix} C_a & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & C_b^n(t) & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_\omega & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_b^n(t) \end{bmatrix}_{12 \times 12}, \quad F_M(t) = [O_{12 \times 12}], \quad O_{i \times j} \text{ 为 } i \text{ 行 } j \text{ 列的零矩阵, } C_a$$

和  $C_\omega$  分别为加速度计和陀螺的系数误差矩阵,  $C_b^n(t)$  为  $t$  时刻的姿态矩阵,

$$F_G(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad F_P(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 8}, \quad T_1、T_2 \text{ 为环路滤波器的}$$

$$\text{参数, } F_{ID}(t) = \begin{bmatrix} -\tilde{L}_1^T \cdot C_n^e \cdot W & \tilde{L}_1^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\tilde{L}_2^T \cdot C_n^e \cdot W & \tilde{L}_2^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\tilde{L}_3^T \cdot C_n^e \cdot W & \tilde{L}_3^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\tilde{L}_4^T \cdot C_n^e \cdot W & \tilde{L}_4^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \end{bmatrix}_{4 \times 21}, \quad F_D(t) = - \begin{bmatrix} K_{dll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{dll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{dll} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{dll} \end{bmatrix}_{4 \times 4},$$

$$F_{IP}(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \end{bmatrix}_{8 \times 21}, \quad \dot{\mathbf{x}}_I、\dot{\mathbf{x}}_G \text{ 分别为 } \mathbf{x}_I \text{ 和 } \mathbf{x}_G \text{ 的微分项,}$$

$G$  为系统噪声驱动矩阵,  $W_I$  和  $W_G$  为 INS 和 GNSS 以及跟踪环路的系统噪声,  $T_r$  为相关时间,  $K_{pll}$  为载波环增益,  $\mathbf{I}_{i \times j}$  为  $i$  行  $j$  列的单位阵,  $\bar{L}^T = [\bar{L}_1^T \quad \bar{L}_2^T \quad \bar{L}_3^T \quad \bar{L}_4^T]$  为卫星与接收机的径向位置矢量矩阵,  $W$  为 INS 解算位置误差引起的卫星与接收机径向速度误差,  $C_n^e$  为导航坐标系到地心地固坐标系的转换矩阵,  $K_{dll}$  为码环增益。

S13、根据 GNSS/INS 深耦合的系统模型建立 GNSS/INS 深耦合的量测模型为:

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_I - \mathbf{p}_G = \delta \mathbf{p}_I - (b_c + v_\rho + \delta \mathbf{p}_{dll})$$

$$\delta \dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{p}}_I - \dot{\mathbf{p}}_G = \delta \dot{\mathbf{p}}_I - (d_c + v_{\dot{\rho}} + \delta \dot{\mathbf{p}}_{pll})$$

式中,  $\delta \mathbf{p}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}$  分别为卫星通道的伪距、伪距率观测量,  $\mathbf{p}_I$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_I$  分别为 INS 预测的伪距、伪距率,  $\mathbf{p}_G$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_G$  分别为 GNSS 量测伪距、伪距率,  $b_c$ 、 $d_c$  分别为接收机时钟偏差和漂移,  $v_\rho$ 、 $v_{\dot{\rho}}$  分别为伪距、伪距率观测噪声,  $\delta \mathbf{p}_{dll}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}_{pll}$  分别为跟踪环路的伪距误差和伪距率误差,  $\mathbf{v}$  为量测噪声矩阵, 即有  $\begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = H(t) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + \mathbf{v}$ ,

$$H(t) = \begin{bmatrix} \bar{L}^T C_n^e & O_{4 \times 18} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 3} & O_{4 \times 18} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & c/f_{L1} \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 35}, f_{L1} \text{ 为 GPS L1 载波频率, } c$$

为光速。

进一步的, 所述步骤 S2 包括:

S21、k-1 时刻采用高精度非线性滤波方法计算得到 k-1 时刻的状态后验分布  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ ;

其中,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{P}_{k-1|k-1})$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  表示 k-1 时刻状态后验分布,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  表示由 k-1 时刻的量测推测出的 k-1 时刻的状态分布,  $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  的协方差,  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$  表示  $x$  服从均值为  $\mu$  方差为  $\sigma^2$  的高斯分布;

S22、采用标准容积规则产生系统状态方程  $f(\mathbf{x})$  预测过程所需要的容积点;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+ = S_{k-1|k-1} \xi_i + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \xi_i = \sqrt{n_x} \begin{bmatrix} I_{n_x} & -I_{n_x} \end{bmatrix}_i \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}$  为 GNSS/INS 深耦合滤波模型的状态量, 其维数为  $n_x$ ,  $I_{n_x}$  为  $n_x$  维单位方阵,  $\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+$  表示由 k-1 时刻的量测推测出的 k-1 时刻的第  $i$  个容积点,  $\xi_i$  为 CKF 滤波

中第  $i$  个标准容积点,  $i=1, \dots, 2n_x$ ,  $S_{k-1|k-1}$  满足  $\mathbf{P}_{k-1|k-1} = S_{k-1|k-1} \left( S_{k-1|k-1} \right)^T$ 。

其中, 所述高精度非线性滤波方法包括:

设置度非线性滤波迭代的量测方程为

$$\mathbf{x}_{k|k}^{j+1} = \mathbf{x}_{k|k}^j + \alpha_j \left\{ \mathbf{K}_j \left( \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k|k}^j) - \left( \mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} \mathbf{P}_{xz,k|k-1} \right)^T \mathcal{G}_j \right) + \mathcal{G}_j \right\}$$

其中  $\mathbf{x}_{k|k}^j$  为  $k$  时刻第  $j$  次量测迭代的状态估计值,  $\mathbf{z}_k$  为  $k$  时刻的多卫星通道器鉴相器输出的量测值,  $\mathbf{h}(\cdot)$  为深耦合跟踪环路的量测方程,  $\mathcal{G}_j = \mathbf{x}_{k|k}^j - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为当前迭代中后验估计值与先验估计值的误差,  $\mathbf{K}_j$  为第  $j$  次迭代的卡尔曼增益,  $\alpha_j$  为加速收敛设置的迭代步长控制系数, 满足  $0 < \alpha_j \leq 1$ ,  $\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1}$  为  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  的逆,  $\mathbf{P}_{xz,k|k-1}$  为预测过程中产生的互协方差, 状态后验估计误差的协方差矩阵取最后一次迭代计算的结果。

进一步的, 所述步骤 S3 包括:

S31、采用下列公式计算得到  $k$  时刻状态先验分布:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \left( \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right)^T + \mathbf{Q}_{k-1} \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}_k^-$  表示  $k$  时刻状态先验估计,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  表示由  $k-1$  时刻的量测和状态推测出的  $k$  时刻的状态估计,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  的协方差,  $w_i = 1/2n_x$ ,  $\mathbf{Q}_{k-1}$  为系统噪声方差阵;

S32、采用下式计算得到预测过程的容积点误差矩阵  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ , 并定义  $\Xi_k^- = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_{k-1}$  为先验 PDF 逼近过程 Sigma 点统计线性回归 (SLR) 的误差方差;

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- = \mathbf{x}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \quad 0 \leq i \leq 2n_x$$

其中,  $\mathbf{x}_{i,k|k-1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+)$  为  $\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+$  经系统方程传播后的容积点;

S33、将经系统方程传播后的容积点作为量测更新过程的容积点;

S34、采用 CKF 量测更新计算量测值的似然分布函数;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{z}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{zz,k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{zz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right) \left( h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right)^T + \mathbf{R}_k \end{cases}$$

式中, 其中  $\mathbf{z}_k^-$  表示  $k$  时刻量测似然估计,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{zz,k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为由  $k-1$  时刻的状态预测到的  $k$  时刻的量测,  $h(\mathbf{x})$  为量测方程,  $w_i = 1/2n_x$ ,  $\mathbf{R}_k$  为量测噪声方差阵;

S35、计算状态量  $\mathbf{x}$  的后验分布函数;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{x}_k^+ \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{zz,k|k-1} \mathbf{K}_k^T \\ \mathbf{P}_{xz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( f(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \left( h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right)^T \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}_k^+$  为  $k$  时刻的状态量的后验估计, 其均值和方差分别为  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和  $\mathbf{P}_{k|k}$ ,  $\mathbf{K}_k = P_{xz,k|k-1} (P_{zz,k|k-1})^{-1}$  为卡尔曼增益矩阵,  $P_{xz,k|k-1}$  为状态量的后验估计值与量测似然估计值的互协方差;

S36、定义 Sigma 点逼近后验分布产生的误差为  $\Xi_k^+ = \mathbf{P}_{k|k}$ ,  $\mathbf{w} = [w_1 \cdots w_{2n_x}]$  为 CKF 容积点 SLR 的权值,  $k$  时刻的先验分布的 SLR 应精确捕获状态的均值和协方差, 且考虑系统不确定性和噪声的影响, 则有

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \text{diag}(\mathbf{w}) \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^{-T} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_k$$

式中,  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$  为预测过程容积点误差阵,  $\Sigma = \text{diag}(\mathbf{w})$  表示采用  $\mathbf{w}$  对角线元素构造该矩阵  $\Sigma$ , 类似的后验分布的 SLR 中, 容积点至少能精确匹配到状态的均值和方差即

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \text{diag}(\mathbf{w}) (\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+)^T = \mathbf{P}_{k|k}$$

式中,  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点;

S37、设  $\Xi_k^-$  和  $\Xi_k^+$  均为对称正定矩阵，且存在  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ = \mathbf{B} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ ，则有  $\Xi_k^- = L_k (L_k)^T$ ， $\Xi_k^+ = L_{k+1} (L_{k+1})^T$ ，其中  $\mathbf{B}$  为待求解的转换矩阵， $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点误差阵；进而有  $\Xi_k^+ = \mathbf{B} L_k (L_k)^T \mathbf{B}^T$ ， $\mathbf{B} = L_{k+1} \Gamma (L_k)^{-1}$ ，其中  $\Gamma$  为任意正交矩阵满足  $\Gamma \Gamma^T = \mathbf{I}_{n_x}$ ，取  $\Gamma$  为单位阵时则得到  $\mathbf{B} = L_{k+1} (L_k)^{-1}$ ；

S38、基于后验的状态估计均值  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和更新后的容积点误差阵得到更新的容积点为  $\mathbf{X}_{i,k|k}^+ = \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$ ， $0 \leq i \leq 2n_x$ 。

进一步的，所述的 GNSS 码跟踪鉴相伪距误差  $\mathbf{p}_{dll}$  方程为

$$\delta \dot{\mathbf{p}}_{dll} = -K_{dll} \delta \mathbf{p}_{dll} + \delta V_{aid} + K_{dll} \mathbf{Q}$$

其中  $\delta \mathbf{p}_{dll}$  为码环环路滤波器的输出量， $\dot{\mathbf{p}}_{dll}$  为  $\mathbf{p}_{dll}$  的微分， $K_{dll}$  为码环增益， $\delta V_{aid}$  为滤波输出校正后 INS 提供给码跟踪环路的速度辅助， $\mathbf{Q}$  为环路热噪声和干扰引起的系统噪声。

进一步的，所述的载波环路误差方程为

$$\delta \dot{\Phi}_{pll} = 2\pi (\delta f_{pll} + \delta f_{aid})$$

$$\delta \dot{f}_{pll} = \left[ 2\pi \frac{T_2}{T_1} (\delta f_{pll} + \delta f_{aid}) + \frac{\delta \Phi_{pll}}{T_1} \right] \cdot K_{pll}$$

其中， $\Phi_{pll}$  为载波环路相位误差， $f_{pll}$  为载波环路频率误差， $K_{pll}$  为环路增益， $\delta f_{aid}$  为滤波输出校正后 INS 提供给载波跟踪环路的多普勒频率误差辅助， $T_1$ 、 $T_2$  为环路滤波器的参数，即环路低通滤波器的传递函数为  $F(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s}$ 。

有益效果：本发明与现有技术相比，其显著优点是：

- (1) 采用更高精度的非线性滤波方法初始化生成容积点；
- (2) 基于矩阵变换更新容积点改善了状态估计过程中预测过程方差的一致性，提高滤波器的稳定性；
- (3) 将跟踪环路的状态误差参数作为组合滤波器的状态参数消除滤波器量测与跟踪环路误差的相关性，提高 INS 辅助量校正的精度和稳定性；
- (4) 采用两种策略生成 CKF 的容积点，即初始化时采用耗时的、高精度的方法生

成容积点，后续的容积点更新过程基于前一时刻状态估计误差的方差实现，提高了容积点的利用率。

#### 附图说明

图 1 是本发明的一个实施例的系统框图；

图 2 是高维 GNSS/INS 深耦合滤波模型的示意图。

#### 具体实施方式

如图 1 所示，本实施例的适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法包括以下步骤：

S1、构造高维 GNSS/INS 深耦合滤波模型，如图 2 所示。

步骤 S1 具体包括：

S11、分别设置 INS 和 GNSS 子系统的 INS 状态量为  $\mathbf{x}_I$ 、GNSS 状态量为  $\mathbf{x}_G$ ，其中，

$$\mathbf{x}_I = [\delta\mathbf{P} \quad \delta\mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$$

$$\mathbf{x}_G = [b_c \quad d_c \quad \delta\mathbf{p}_{dll} \quad \delta\boldsymbol{\phi}_{pll} \quad \delta\mathbf{f}_{pll}]$$

式中， $[\delta\mathbf{P} \quad \delta\mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$  分别依次为 3 维位置误差、速度误差、姿态误差、加速度计系数误差、加速度计系数零偏、陀螺仪系数误差与常值漂移； $[b_c \quad d_c \quad \delta\mathbf{p}_{dll} \quad \delta\boldsymbol{\phi}_{pll} \quad \delta\mathbf{f}_{pll}]$  分别依次为接收机时钟偏置、时钟漂移、码跟踪环路的鉴相伪距误差、载波跟踪环路的相位误差和载波跟踪环路的频率误差。

其中，所述的 GNSS 码跟踪鉴相伪距误差  $\mathbf{p}_{dll}$  方程为

$$\delta\dot{\mathbf{p}}_{dll} = -K_{dll}\delta\mathbf{p}_{dll} + \delta V_{aid} + K_{dll}\mathbf{Q}$$

其中  $\delta\mathbf{p}_{dll}$  为码环环路滤波器的输出量， $\dot{\mathbf{p}}_{dll}$  为  $\mathbf{p}_{dll}$  的微分， $K_{dll}$  为码环增益， $\delta V_{aid}$  为滤波输出校正后 INS 提供给码跟踪环路的速度辅助， $\mathbf{Q}$  为环路热噪声和干扰引起的系统噪声。

其中，所述的载波环路误差方程为

$$\delta\dot{\boldsymbol{\phi}}_{pll} = 2\pi(\delta f_{pll} + \delta f_{aid})$$

$$\delta\dot{f}_{pll} = \left[ 2\pi \frac{T_2}{T_1} (\delta f_{pll} + \delta f_{aid}) + \frac{\delta\boldsymbol{\phi}_{pll}}{T_1} \right] \cdot K_{pll}$$

其中， $\boldsymbol{\phi}_{pll}$  为载波环路相位误差， $f_{pll}$  为载波环路频率误差， $K_{pll}$  为环路增益， $\delta f_{aid}$

为滤波输出校正后 INS 提供给载波跟踪环路的多普勒频率误差辅助,  $T_1$ 、 $T_2$  为环路滤波器的参数, 即环路低通滤波器的传递函数为  $F(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s}$ 。

S12、根据状态量  $\mathbf{x}_I$ 、 $\mathbf{x}_G$  建立 GNSS/INS 深耦合的系统模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_I \\ \dot{\mathbf{x}}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I(t) & O_{21 \times 2} & O_{21 \times 4} & O_{21 \times 8} \\ O_{2 \times 21} & F_G(t) & O_{2 \times 4} & O_{2 \times 8} \\ F_{ID}(t) & O_{4 \times 2} & F_D(t) & O_{4 \times 8} \\ F_{IP}(t) & O_{8 \times 2} & O_{8 \times 4} & F_P(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} W_I \\ W_G \end{bmatrix}$$

式中,  $F_I(t) = \begin{bmatrix} F_N(t) & F_S(t) \\ O_{9 \times 9} & F_M(t) \end{bmatrix}_{21 \times 21}$ ,  $F_N(t)$  为 9 维惯导基本系统矩阵和  $O_{3 \times 9}$ ,

$$F_S(t) = \begin{bmatrix} C_a & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & C_b^n(t) & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_\omega & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_b^n(t) \end{bmatrix}_{12 \times 12}, \quad F_M(t) = [O_{12 \times 12}], \quad O_{i \times j} \text{ 为 } i \text{ 行 } j \text{ 列的零矩阵, } C_a$$

和  $C_\omega$  分别为加速度计和陀螺的系数误差矩阵,  $C_b^n(t)$  为  $t$  时刻的姿态矩阵,

$$F_G(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad F_P(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 8}, \quad T_1, T_2 \text{ 为环路滤波器的}$$

$$\text{参数, } F_{ID}(t) = \begin{bmatrix} -\vec{L}_1^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_1^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_2^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_2^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_3^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_3^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_4^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_4^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \end{bmatrix}_{4 \times 21}, \quad F_D(t) = - \begin{bmatrix} K_{dll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{dll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{dll} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{dll} \end{bmatrix}_{4 \times 4},$$

$$F_{IP}(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \end{bmatrix}_{8 \times 21}, \quad \dot{\mathbf{x}}_I \text{ 和 } \dot{\mathbf{x}}_G \text{ 分别为 } \mathbf{x}_I \text{ 和 } \mathbf{x}_G \text{ 的微分项,}$$

$G$  为系统噪声驱动矩阵,  $W_I$  和  $W_G$  为 INS 和 GNSS 以及跟踪环路的系统噪声,  $T_r$  为相关时间,  $K_{pll}$  为载波环增益,  $I_{i \times j}$  为  $i$  行  $j$  列的单位阵,  $\vec{L}^T = [\vec{L}_1^T \quad \vec{L}_2^T \quad \vec{L}_3^T \quad \vec{L}_4^T]$  为卫星与接收机的径向位置矢量矩阵,  $W$  为 INS 解算位置误差引起的卫星与接收机径向速度误差,  $C_n^e$  为导航坐标系到地心地固坐标系的转换矩阵,  $K_{dll}$  为码环增益。

S13、根据 GNSS/INS 深耦合的系统模型建立 GNSS/INS 深耦合的量测模型为:

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_I - \mathbf{p}_G = \delta \mathbf{p}_I - (b_c + \nu_\rho + \delta \mathbf{p}_{all})$$

$$\delta \dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{p}}_I - \dot{\mathbf{p}}_G = \delta \dot{\mathbf{p}}_I - (d_c + v_{\dot{\rho}} + \delta \dot{\mathbf{p}}_{pll})$$

式中,  $\delta \mathbf{p}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}$  分别为卫星通道的伪距、伪距率观测量,  $\mathbf{p}_I$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_I$  分别为 INS 预测的伪距、伪距率,  $\mathbf{p}_G$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_G$  分别为 GNSS 量测伪距、伪距率,  $b_c$ 、 $d_c$  分别为接收机时钟偏差和漂移,  $v_{\rho}$ 、 $v_{\dot{\rho}}$  分别为伪距、伪距率观测噪声,  $\delta \mathbf{p}_{dll}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}_{pll}$  分别为跟踪环路的伪距误差和伪距率误差,  $\mathbf{v}$  为量测噪声矩阵, 即有  $\begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = H(t) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + \mathbf{v}$ ,

$H(t) = \begin{bmatrix} \tilde{L}^T C_n^e & O_{4 \times 18} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 3} & O_{4 \times 18} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & c/f_{L1} \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 35}$ ,  $f_{L1}$  为 GPS L1 载波频率,  $c$  为光速。

S2、对构造的滤波模型采用标准容积规则产生初始化容积点。

步骤 S2 具体包括:

S21、k-1 时刻采用高精度非线性滤波方法计算得到 k-1 时刻的状态后验分布  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ ;

其中,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{P}_{k-1|k-1})$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  表示 k-1 时刻状态后验分布,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  表示由 k-1 时刻的量测推测出的 k-1 时刻的状态分布,  $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  的协方差,  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$  表示 x 服从均值为  $\mu$  方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。

其中, 所述高精度非线性滤波方法包括: 设置度非线性滤波迭代的量测方程为  $\mathbf{x}_{k|k}^{j+1} = \mathbf{x}_{k|k}^j + \alpha_j \left\{ \mathbf{K}_j \left( \mathbf{z}_k - h(\mathbf{x}_{k|k}^j) - (\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} \mathbf{P}_{xz,k|k-1})^T \mathcal{G}_j \right) + \mathcal{G}_j \right\}$ , 其中  $\mathbf{x}_{k|k}^j$  为 k 时刻第 j 次量测迭代的估计值,  $\mathbf{z}_k$  为 k 时刻的多卫星通道鉴相器输出的量测值,  $h(\cdot)$  为深耦合跟踪环路的量测方程,  $\mathcal{G}_j = \mathbf{x}_{k|k}^j - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为当前迭代中后验估计值与先验估计值的误差,  $\mathbf{K}_j$  为第 j 次迭代的卡尔曼增益,  $\alpha_j$  为加速收敛设置的迭代步长控制系数, 满足  $0 < \alpha_j \leq 1$ ,  $\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1}$  为  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  的逆,  $\mathbf{P}_{xz,k|k-1}$  为预测过程中产生的互协方差, 状态后验估计误差的协方差矩阵取最后一次迭代计算的结果。

S22、采用标准容积规则产生系统状态方程  $f(\mathbf{x})$  预测过程所需要的容积点;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+ = S_{k-1|k-1} \xi_i + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \xi_i = \sqrt{n_x} \begin{bmatrix} I_{n_x} & -I_{n_x} \end{bmatrix}_i \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}$  为 GNSS/INS 深耦合滤波模型的状态量, 其维数为  $n_x$ ,  $I_{n_x}$  为  $n_x$  维单位方阵,  $\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+$  表示由  $k-1$  时刻的量测推测出的  $k-1$  时刻的第  $i$  个容积点,  $\xi_i$  为 CKF 滤波中第  $i$  个标准容积点,  $i=1, \dots, 2n_x$ ,  $S_{k-1|k-1}$  满足  $\mathbf{P}_{k-1|k-1} = S_{k-1|k-1} (S_{k-1|k-1})^T$ 。

S3、采用新型容积点更新规则进行 CKF 滤波。

步骤 S3 包括:

S31、采用下列公式计算得到  $k$  时刻状态先验分布:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \left( \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right)^T + \mathbf{Q}_{k-1} \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}_k^-$  表示  $k$  时刻状态先验估计,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  表示由  $k-1$  时刻的量测和状态推测出的  $k$  时刻的状态估计,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  的协方差,  $w_i = 1/2n_x$ ,  $\mathbf{Q}_{k-1}$  为系统噪声方差阵;

S32、采用下式计算得到预测过程的容积点误差矩阵  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ , 并定义  $\Xi_k^- = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_{k-1}$  为先验 PDF 逼近过程 Sigma 点统计线性回归的误差方差;

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- = \mathbf{x}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \quad 0 \leq i \leq 2n_x$$

其中,  $\mathbf{x}_{i,k|k-1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+)$  为  $\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+$  经系统方程传播后的容积点;

S33、将经系统方程传播后的容积点作为量测更新过程的容积点;

S34、采用 CKF 量测更新计算量测值的似然分布函数;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{z}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{zz,k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \mathbf{h}(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{zz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( \mathbf{h}(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right) \left( \mathbf{h}(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right)^T + \mathbf{R}_k \end{cases}$$

式中, 其中  $\mathbf{z}_k^-$  表示  $k$  时刻量测似然估计,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{zz,k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为由  $k-1$  时刻的状态预测到的  $k$  时刻的量测,  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  为量测方程,  $w_i = 1/2n_x$ ,  $\mathbf{R}_k$  为量测噪声方差阵;

S35、计算状态量  $\mathbf{x}$  的后验分布函数：

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{x}_k^+ \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{zz,k|k-1} \mathbf{K}_k^T \\ \mathbf{P}_{xz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( f(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \left( h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} \right)^T \end{cases}$$

式中， $\mathbf{x}_k^+$  为  $k$  时刻的状态量的后验估计，其均值和方差分别为  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和  $\mathbf{P}_{k|k}$ ，

$\mathbf{K}_k = P_{xz,k|k-1} (P_{zz,k|k-1})^{-1}$  为卡尔曼增益矩阵， $P_{xz,k|k-1}$  为状态量的后验估计值与量测似然估计值的互协方差；

S36、定义 Sigma 点逼近后验分布产生的误差为  $\Xi_k^+ = \mathbf{P}_{k|k}$ ， $\mathbf{w} = [w_1 \ \cdots \ w_{2n_x}]$  为 CKF 容积点 SLR 的权值， $k$  时刻的先验分布的 SLR 应精确捕获状态的均值和协方差，且考虑系统不确定性和噪声的影响，则有

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \text{diag}(\mathbf{w}) \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^{-T} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_k$$

式中， $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$  为预测过程容积点误差阵， $\Sigma = \text{diag}(\mathbf{w})$  表示采用  $\mathbf{w}$  对角线元素构造该矩阵  $\Sigma$ ，类似的后验分布的 SLR 中，容积点至少能精确匹配到状态的均值和方差即

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \text{diag}(\mathbf{w}) (\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+)^T = \mathbf{P}_{k|k}$$

式中， $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点；

S37、设  $\Xi_k^-$  和  $\Xi_k^+$  均为对称正定矩阵，且存在  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ = \mathbf{B} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ ，则有  $\Xi_k^- = L_k (L_k)^T$ ， $\Xi_k^+ = L_{k+1} (L_{k+1})^T$ ，其中  $\mathbf{B}$  为待求解的转换矩阵， $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点误差阵；进而有  $\Xi_k^+ = \mathbf{B} L_k (L_k)^T \mathbf{B}^T$ ， $\mathbf{B} = L_{k+1} \Gamma (L_k)^{-1}$ ，其中  $\Gamma$  为任意正交矩阵满足  $\Gamma \Gamma^T = \mathbf{I}_{n_x}$ ，取  $\Gamma$  为单位阵时则得到  $\mathbf{B} = L_{k+1} (L_k)^{-1}$ ；

S38、基于后验的状态估计均值  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和更新后的容积点误差阵得到更新的容积点为

$$\mathbf{X}_{i,k|k}^+ = \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+, \quad 0 \leq i \leq 2n_x。$$

以上所揭露的仅为本发明一种较佳实施例而已，不能以此来限定本发明之权利范围，因此依本发明权利要求所作的等同变化，仍属本发明所涵盖的范围。

1、一种适于高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法，其特征在于该方法包括：

- S1、构造高维 GNSS/INS 深耦合滤波模型；
- S2、对构造的滤波模型采用标准容积规则产生初始化容积点；
- S3、采用新型容积点更新规则进行 CKF 滤波。

2、根据权利要求 1 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法，其特征在于：所述步骤 S1 包括：

S11、分别设置 INS 和 GNSS 子系统的 INS 状态量为  $\mathbf{x}_I$ 、GNSS 状态量为  $\mathbf{x}_G$ ，其中，

$$\mathbf{x}_I = [\delta \mathbf{P} \quad \delta \mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$$

$$\mathbf{x}_G = [b_c \quad d_c \quad \delta \mathbf{p}_{dll} \quad \delta \Phi_{pll} \quad \delta \mathbf{f}_{pll}]$$

式中， $[\delta \mathbf{P} \quad \delta \mathbf{V} \quad \psi \quad \mathbf{k}_a \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{k}_\omega \quad \mathbf{b}_\omega]$  分别依次为 3 维位置误差、速度误差、姿态误差、加速度计系数误差、加速度计系数零偏、陀螺仪系数误差与常值漂移；

$[b_c \quad d_c \quad \delta \mathbf{p}_{dll} \quad \delta \Phi_{pll} \quad \delta \mathbf{f}_{pll}]$  分别依次为接收机时钟偏置、时钟漂移、码跟踪环路的鉴相伪距误差、载波跟踪环路的相位误差和载波跟踪环路的频率误差；

S12、根据状态量  $\mathbf{x}_I$ 、 $\mathbf{x}_G$  建立 GNSS/INS 深耦合的系统模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_I \\ \dot{\mathbf{x}}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I(t) & O_{21 \times 2} & O_{21 \times 4} & O_{21 \times 8} \\ O_{2 \times 21} & F_G(t) & O_{2 \times 4} & O_{2 \times 8} \\ F_{ID}(t) & O_{4 \times 2} & F_D(t) & O_{4 \times 8} \\ F_{IP}(t) & O_{8 \times 2} & O_{8 \times 4} & F_P(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} W_I \\ W_G \end{bmatrix}$$

式中， $F_I(t) = \begin{bmatrix} F_N(t) & F_S(t) \\ O_{9 \times 9} & F_M(t) \end{bmatrix}_{21 \times 21}$ ， $F_N(t)$  为 9 维惯导基本系统矩阵和  $O_{3 \times 9}$ ，

$$F_S(t) = \begin{bmatrix} C_a & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & C_b^n(t) & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_\omega & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & C_b^n(t) \end{bmatrix}_{12 \times 12}, \quad F_M(t) = [O_{12 \times 12}], \quad O_{i \times j} \text{ 为 } i \text{ 行 } j \text{ 列的零矩阵, } C_a$$

和  $C_\omega$  分别为加速度计和陀螺的系数误差矩阵， $C_b^n(t)$  为  $t$  时刻的姿态矩阵，

$$F_G(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad F_P(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 8}, \quad T_1、T_2 \text{ 为环路滤波器的}$$

$$\text{参数, } F_{ID}(t) = \begin{bmatrix} -\vec{L}_1^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_1^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_2^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_2^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_3^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_3^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \\ -\vec{L}_4^T \cdot C_n^e \cdot W & \vec{L}_4^T \cdot C_n^e & O_{1 \times 15} \end{bmatrix}_{4 \times 21}, \quad F_D(t) = - \begin{bmatrix} K_{dll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{dll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{dll} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{dll} \end{bmatrix}_{4 \times 4},$$

$$F_{IP}(t) = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & 2\pi \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \\ K_{pll}/T_1 \cdot I_{4 \times 4} & 2\pi K_{pll} T_2 / T_1 \cdot I_{4 \times 4} & O_{4 \times 13} \end{bmatrix}_{8 \times 21}, \quad \dot{\mathbf{x}}_I、\dot{\mathbf{x}}_G \text{ 分别为 } \mathbf{x}_I \text{ 和 } \mathbf{x}_G \text{ 的微分项,}$$

$G$  为系统噪声驱动矩阵,  $W_I$  和  $W_G$  为 INS 和 GNSS 以及跟踪环路的系统噪声,  $T_r$  为相关时间,  $K_{pll}$  为载波环增益,  $\mathbf{I}_{i \times j}$  为  $i$  行  $j$  列的单位阵,  $\vec{L}^T = [\vec{L}_1^T \quad \vec{L}_2^T \quad \vec{L}_3^T \quad \vec{L}_4^T]$  为卫星与接收机的径向位置矢量矩阵,  $W$  为 INS 解算位置误差引起的卫星与接收机径向速度误差,  $C_n^e$  为导航坐标系到心地固坐标系的转换矩阵,  $K_{dll}$  为码环增益。

S13、根据 GNSS/INS 深耦合的系统模型建立 GNSS/INS 深耦合的量测模型为:

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_I - \mathbf{p}_G = \delta \mathbf{p}_I - (b_c + v_\rho + \delta \mathbf{p}_{dll})$$

$$\delta \dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{p}}_I - \dot{\mathbf{p}}_G = \delta \dot{\mathbf{p}}_I - (d_c + v_{\dot{\rho}} + \delta \dot{\mathbf{p}}_{pll})$$

式中,  $\delta \mathbf{p}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}$  分别为卫星通道的伪距、伪距率观测量,  $\mathbf{p}_I$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_I$  分别为 INS 预测的伪距、伪距率,  $\mathbf{p}_G$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_G$  分别为 GNSS 量测伪距、伪距率,  $b_c$ 、 $d_c$  分别为接收机时钟偏差和漂移,  $v_\rho$ 、 $v_{\dot{\rho}}$  分别为伪距、伪距率观测噪声,  $\delta \mathbf{p}_{dll}$ 、 $\delta \dot{\mathbf{p}}_{pll}$  分别为跟踪环路的伪距误差和伪距率误差,  $\mathbf{v}$  为量测噪声矩阵, 即有  $\begin{bmatrix} \delta \mathbf{p} \\ \delta \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = H(t) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_G \end{bmatrix} + \mathbf{v}$ ,

$H(t) = \begin{bmatrix} \vec{L}^T C_n^e & O_{4 \times 18} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 3} & O_{4 \times 18} & O_{4 \times 1} & -I_{4 \times 1} & O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & c/f_{L1} \cdot I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{8 \times 35}$ ,  $f_{L1}$  为 GPS L1 载波频率,  $c$  为光速。

3、根据权利要求 1 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 其特征在于: 所述步骤 S2 包括:

S21、k-1 时刻采用高精度非线性滤波方法计算得到 k-1 时刻的状态后验分布  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ ;

其中,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{P}_{k-1|k-1})$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  表示 k-1 时刻状态后验分布,  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  表示由 k-1 时刻的量测推测出的 k-1 时刻的状态分布,  $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  的协方差,  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$  表示  $x$  服从

从均值为  $\mu$  方差为  $\sigma^2$  的高斯分布;

S22、采用标准容积规则产生系统状态方程  $f(\mathbf{x})$  预测过程所需要的容积点;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+ = S_{k-1|k-1} \xi_i + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \xi_i = \sqrt{n_x} \begin{bmatrix} I_{n_x} & -I_{n_x} \end{bmatrix}_i \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}$  为 GNSS/INS 深耦合滤波模型的状态量, 其维数为  $n_x$ ,  $I_{n_x}$  为  $n_x$  维单位方阵,  $\mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+$  表示由  $k-1$  时刻的量测推测出的  $k-1$  时刻的第  $i$  个容积点,  $\xi_i$  为 CKF 滤波中第  $i$  个标准容积点,  $i=1, \dots, 2n_x$ ,  $S_{k-1|k-1}$  满足  $\mathbf{P}_{k-1|k-1} = S_{k-1|k-1} (S_{k-1|k-1})^T$ 。

4、根据权利要求 3 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 其特征在于: 所述高精度非线性滤波方法包括:

设置度非线性滤波迭代的量测方程为

$$\mathbf{x}_{k|k}^{j+1} = \mathbf{x}_{k|k}^j + \alpha_j \left\{ \mathbf{K}_j \left( \mathbf{z}_k - h(\mathbf{x}_{k|k}^j) - (\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} \mathbf{P}_{xz,k|k-1})^T \mathcal{G}_j \right) + \mathcal{G}_j \right\}$$

其中  $\mathbf{x}_{k|k}^j$  为  $k$  时刻第  $j$  次量测迭代的状态估计值,  $\mathbf{z}_k$  为  $k$  时刻的多卫星通道器鉴相器输出的量测值,  $h(\cdot)$  为深耦合跟踪环路的量测方程,  $\mathcal{G}_j = \mathbf{x}_{k|k}^j - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为当前迭代中后验估计值与先验估计值的误差,  $\mathbf{K}_j$  为第  $j$  次迭代的卡尔曼增益,  $\alpha_j$  为加速收敛设置的迭代步长控制系数, 满足  $0 < \alpha_j \leq 1$ ,  $\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1}$  为  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  的逆,  $\mathbf{P}_{xz,k|k-1}$  为预测过程中产生的互协方差, 状态后验估计误差的协方差矩阵取最后一次迭代计算的结果。

5、根据权利要求 1 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 其特征在于: 所述步骤 S3 包括:

S31、采用下列公式计算得到  $k$  时刻状态先验分布:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i f(\mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+) \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i \left( f(\mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \left( f(\mathbf{X}_{i,k-1|k-1}^+) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right)^T + \mathbf{Q}_{k-1} \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}_k^-$  表示  $k$  时刻状态先验估计,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  表示由  $k-1$  时刻的量测和状态推测出的  $k$  时刻的状态估计,  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  的协方差,  $w_i = 1/2n_x$ ,

$\mathbf{Q}_{k-1}$  为系统噪声方差阵;

S32、采用下式计算得到预测过程的容积点误差矩阵  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ , 并定义  $\Xi_k^- = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_{k-1}$  为先验 PDF 逼近过程 Sigma 点统计线性回归的误差方差;

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- = \mathbf{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \quad 0 \leq i \leq 2n_x$$

其中,  $\mathbf{X}_{i,k|k-1} = f(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+)$  为  $\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}^+$  经系统方程传播后的容积点;

S33、将经系统方程传播后的容积点作为量测更新过程的容积点;

S34、采用 CKF 量测更新计算量测值的似然分布函数;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{z}_k^- \sim N(\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{zz,k|k-1}) \\ \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{zz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i (h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1})(h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1})^T + \mathbf{R}_k \end{cases}$$

式中, 其中  $\mathbf{z}_k^-$  表示 k 时刻量测似然估计,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为其均值,  $\mathbf{P}_{zz,k|k-1}$  为其方差,  $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$  为由 k-1 时刻的状态预测到的 k 时刻的量测,  $h(\mathbf{x})$  为量测方程,  $w_i = 1/2n_x$ ,  $\mathbf{R}_k$  为量测噪声方差阵;

S35、计算状态量  $\mathbf{x}$  的后验分布函数;

$$\text{其中, } \begin{cases} \mathbf{x}_k^+ \sim N(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{zz,k|k-1} \mathbf{K}_k^T \\ \mathbf{P}_{xz,k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n_x} w_i (f(\mathbf{x}_{i,k-1|k-1}) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})(h(\mathbf{x}_{i,k|k-1}) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1})^T \end{cases}$$

式中,  $\mathbf{x}_k^+$  为 k 时刻的状态量的后验估计, 其均值和方差分别为  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和  $\mathbf{P}_{k|k}$ ,  $\mathbf{K}_k = P_{xz,k|k-1} (P_{zz,k|k-1})^{-1}$  为卡尔曼增益矩阵,  $P_{xz,k|k-1}$  为状态量的后验估计值与量测似然估计值的互协方差;

S36、定义 Sigma 点逼近后验分布产生的误差为  $\Xi_k^+ = \mathbf{P}_{k|k}$ ,  $\mathbf{w} = [w_1 \quad \cdots \quad w_{2n_x}]$  为 CKF 容积点 SLR 的权值, k 时刻的先验分布的 SLR 应精确捕获状态的均值和协方差, 且考虑系统不确定性和噪声的影响, 则有

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^- \text{diag}(\mathbf{w}) \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^{-T} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{Q}_k$$

式中,  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$  为预测过程容积点误差阵,  $\Sigma = \text{diag}(\mathbf{w})$  表示采用  $\mathbf{w}$  对角线元素构造该矩阵  $\Sigma$ , 类似的后验分布的 SLR 中, 容积点至少能精确匹配到状态的均值和方差即

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \mathbf{w} = 0$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ \text{diag}(\mathbf{w}) (\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+)^T = \mathbf{P}_{k|k}$$

式中,  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点;

S37、设  $\Xi_k^-$  和  $\Xi_k^+$  均为对称正定矩阵, 且存在  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+ = \mathbf{B} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}^-$ , 则有  $\Xi_k^- = L_k (L_k)^T$ ,  $\Xi_k^+ = L_{k+1} (L_{k+1})^T$ , 其中  $\mathbf{B}$  为待求解的转换矩阵,  $\tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+$  为更新后的容积点误差阵; 进而有  $\Xi_k^+ = \mathbf{B} L_k (L_k)^T \mathbf{B}^T$ ,  $\mathbf{B} = L_{k+1} \Gamma (L_k)^{-1}$ , 其中  $\Gamma$  为任意正交矩阵满足  $\Gamma \Gamma^T = \mathbf{I}_{n_x}$ , 取  $\Gamma$  为单位阵时则得到  $\mathbf{B} = L_{k+1} (L_k)^{-1}$ ;

S38、基于后验的状态估计均值  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和更新后的容积点误差阵得到更新的容积点为

$$\mathbf{X}_{i,k|k}^+ = \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \tilde{\mathbf{X}}_{i,k|k}^+, \quad 0 \leq i \leq 2n_x.$$

6、根据权利要求 2 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 其特征在于: 所述的 GNSS 码跟踪鉴相伪距误差  $\mathbf{p}_{dll}$  方程为

$$\delta \dot{\mathbf{p}}_{dll} = -K_{dll} \delta \mathbf{p}_{dll} + \delta V_{aid} + K_{dll} \mathbf{Q}$$

其中  $\delta \mathbf{p}_{dll}$  为码环环路滤波器的输出量,  $\dot{\mathbf{p}}_{dll}$  为  $\mathbf{p}_{dll}$  的微分,  $K_{dll}$  为码环增益,  $\delta V_{aid}$  为滤波输出校正后 INS 提供给码跟踪环路的速度辅助,  $\mathbf{Q}$  为环路热噪声和干扰引起的系统噪声。

7、根据权利要求 2 所述的高维 GNSS/INS 深耦合的容积卡尔曼滤波方法, 其特征在于所述的载波环路误差方程为

$$\delta \dot{\Phi}_{pll} = 2\pi (\delta f_{pll} + \delta f_{aid})$$

$$\delta \dot{f}_{pll} = \left[ 2\pi \frac{T_2}{T_1} (\delta f_{pll} + \delta f_{aid}) + \frac{\delta \Phi_{pll}}{T_1} \right] \cdot K_{pll}$$

其中,  $\phi_{pll}$  为载波环路相位误差,  $f_{pll}$  为载波环路频率误差,  $K_{pll}$  为环路增益,  $\delta f_{aid}$  为滤波输出校正后 INS 提供给载波跟踪环路的多普勒频率误差辅助,  $T_1$ 、 $T_2$  为环路滤波器的参数, 即环路低通滤波器的传递函数为  $F(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s}$ 。

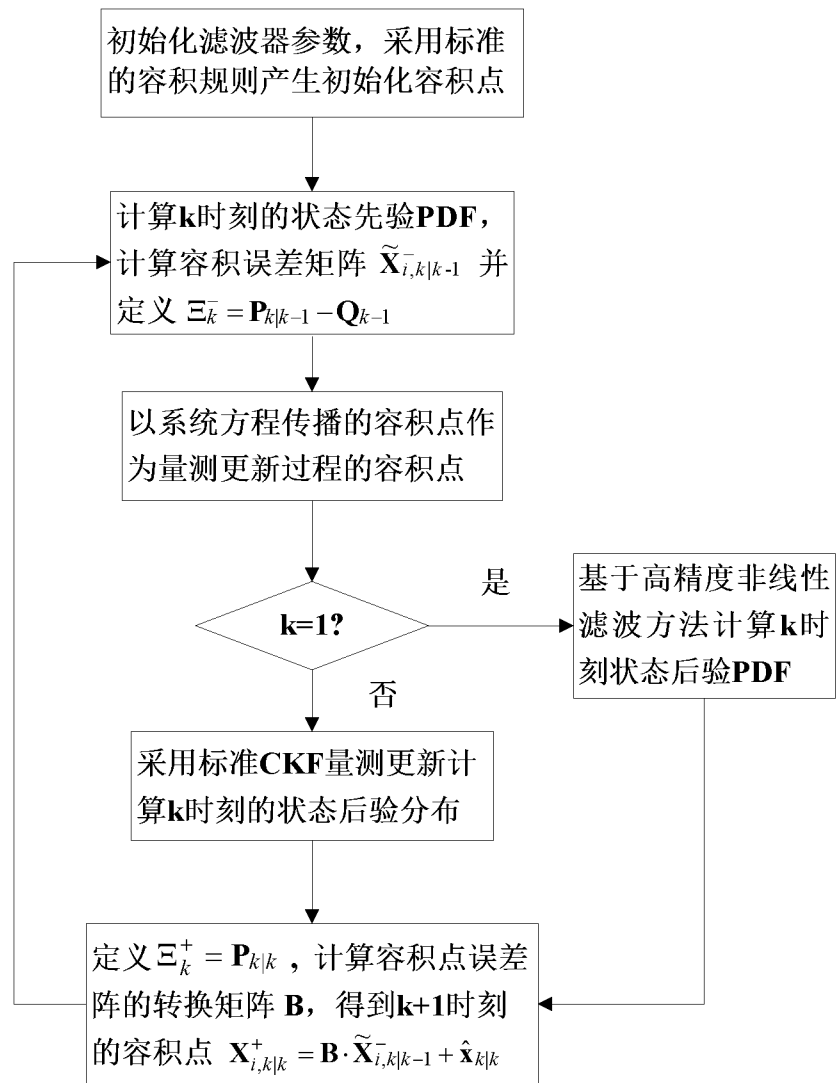


图 1

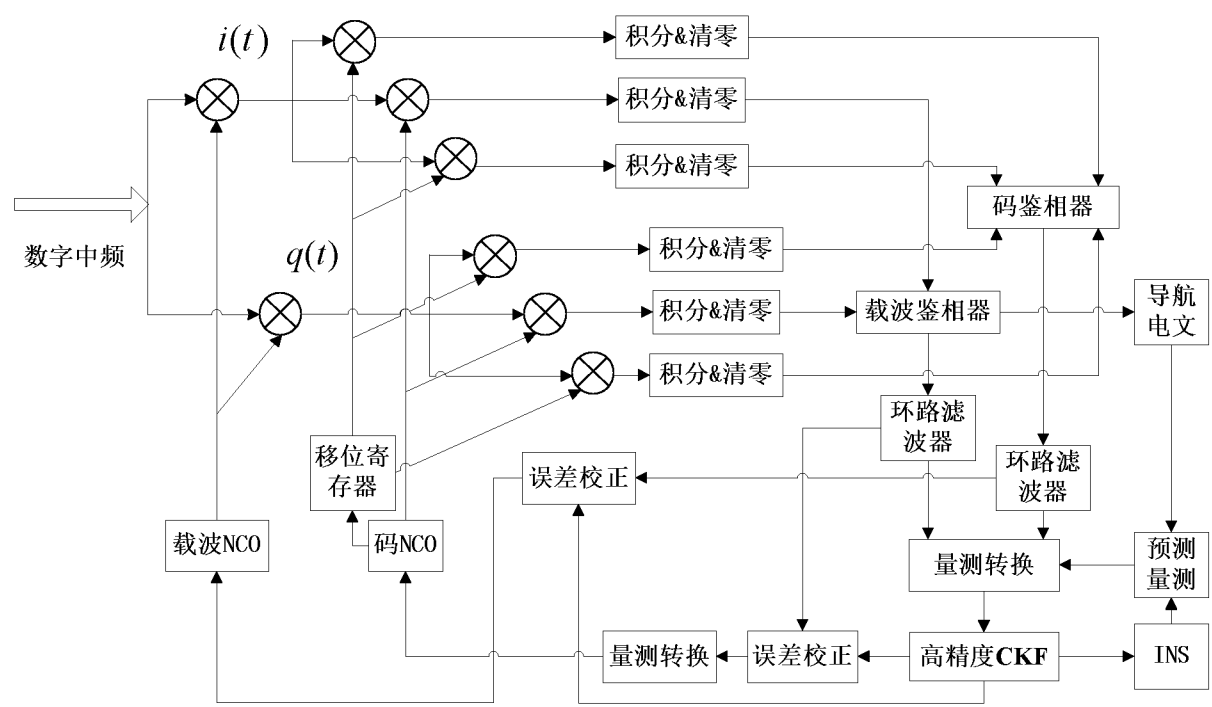


图 2

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/CN2017/080383**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 19/47 (2010.01) i; G01C 21/16 (2006.01) i; G01C 21/20 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01C; G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EP0D0C: navigation, multi-dimensional, deep integration, GNSS, INS, cubature kalman filter, CKF, high dimensional, deep coupling, volume point

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                 | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | ZHANG, Xinchun; "Research on the Nonlinearity of INS/GNSS Deeply Integration", ELECTRONIC TECHNOLOGY & INFORMATION SCIENCE, CHINA MASTER'S THESES FULL-TEXT DATABASE, no. 03, 15 March 2016 (15.03.2016), ISSN: 1674-0246, abstract, and chapters 2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 4.2.2, 4.4.1, 4.7.1, and 5.4 | 1                     |
| X         | LIU, Jiang et al., "A CKF based GNSS/INS Train Integrated Positioning Method", PROCEEDINGS OF THE 2010 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, 07 August 2010 (07.08.2010), chapters I-IV                                                                                    | 1                     |
| PX        | CN 106291645 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 04 January 2017 (04.01.2017), claims 1-7                                                                                                                                                                                                                    | 1-7                   |
| A         | CN 105737823 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 06 July 2016 (06.07.2016), the whole document                                                                                                                                                                                                               | 1-7                   |
| A         | WO 2015081424 A1 (NOVATEL INC.), 11 June 2015 (11.06.2015), the whole document                                                                                                                                                                                                                     | 1-7                   |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention                                              |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance                                                                | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone                                                                     |
| "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date                                                                               | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family                                                                                                                                                                                                    |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Date of the actual completion of the international search<br>23 May 2017 (23.05.2017)                                                                                                                              | Date of mailing of the international search report<br><b>30 June 2017 (30.06.2017)</b> |
| Name and mailing address of the ISA/CN:<br>State Intellectual Property Office of the P. R. China<br>No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao<br>Haidian District, Beijing 100088, China<br>Facsimile No.: (86-10) 62019451 | Authorized officer<br><b>FENG, Ji</b><br>Telephone No.: (86-10) <b>62413333</b>        |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.

**PCT/CN2017/080383**

| Patent Documents referred<br>in the Report | Publication Date | Patent Family    | Publication Date  |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CN 106291645 A                             | 04 January 2017  | None             |                   |
| CN 105737823 A                             | 06 July 2016     | None             |                   |
| WO 2015081424 A1                           | 11 June 2015     | CA 2923988 A1    | 11 June 2015      |
|                                            |                  | EP 3077849 A1    | 12 October 2016   |
|                                            |                  | US 8996311 B1    | 31 March 2015     |
|                                            |                  | US 2015268047 A1 | 24 September 2015 |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/080383

| <b>A. 主题的分类</b><br>G01S 19/47(2010.01)i; G01C 21/16(2006.01)i; G01C 21/20(2006.01)i<br>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                               |                      |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|-------------------|---------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|----|---------------------------------------------------------------|-----|---|----------------------------------------------------------|-----|---|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>B. 检索领域</b><br>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)<br>G01C; G01S<br>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献<br>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))<br>CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 导航, 容积卡尔曼滤波, 多维, 高维, 深耦合, 深组合, 容积点, GNSS, INS, cubature kalman filter, CKF, high dimensional, deep coupling, volume point                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                               |                      |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| <b>C. 相关文件</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>张鑫春. "INS/GNSS深组合导航系统的非线性研究"<br/>中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第03期, 2016年 3月<br/>15日 (2016 - 03 - 15),<br/>ISSN: 1674-0246,<br/>摘要, 第2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 4.2.2, 4.4.1, 4.7.1, 5.4节</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>LIU, Jiang et al. "A CKF based GNSS/INS Train Integrated Positioning Method"<br/>Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010年 8月 7日 (2010 - 08 - 07),<br/>第I-IV节</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 106291645 A (东南大学) 2017年 1月 4日 (2017 - 01 - 04)<br/>权利要求1-7</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105737823 A (东南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06)<br/>全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2015081424 A1 (NOVATEL INC.) 2015年 6月 11日 (2015 - 06 - 11)<br/>全文</td> <td>1-7</td> </tr> </tbody> </table> |                                                                                                                                                                                                               |                      | 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落 | 相关的权利要求 | X | 张鑫春. "INS/GNSS深组合导航系统的非线性研究"<br>中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第03期, 2016年 3月<br>15日 (2016 - 03 - 15),<br>ISSN: 1674-0246,<br>摘要, 第2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 4.2.2, 4.4.1, 4.7.1, 5.4节 | 1 | X | LIU, Jiang et al. "A CKF based GNSS/INS Train Integrated Positioning Method"<br>Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010年 8月 7日 (2010 - 08 - 07),<br>第I-IV节 | 1 | PX | CN 106291645 A (东南大学) 2017年 1月 4日 (2017 - 01 - 04)<br>权利要求1-7 | 1-7 | A | CN 105737823 A (东南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06)<br>全文 | 1-7 | A | WO 2015081424 A1 (NOVATEL INC.) 2015年 6月 11日 (2015 - 06 - 11)<br>全文 | 1-7 |
| 类 型*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                                                                                                                                             | 相关的权利要求              |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 张鑫春. "INS/GNSS深组合导航系统的非线性研究"<br>中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第03期, 2016年 3月<br>15日 (2016 - 03 - 15),<br>ISSN: 1674-0246,<br>摘要, 第2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 4.2.2, 4.4.1, 4.7.1, 5.4节                                      | 1                    |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | LIU, Jiang et al. "A CKF based GNSS/INS Train Integrated Positioning Method"<br>Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010年 8月 7日 (2010 - 08 - 07),<br>第I-IV节 | 1                    |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| PX                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | CN 106291645 A (东南大学) 2017年 1月 4日 (2017 - 01 - 04)<br>权利要求1-7                                                                                                                                                 | 1-7                  |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | CN 105737823 A (东南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06)<br>全文                                                                                                                                                      | 1-7                  |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | WO 2015081424 A1 (NOVATEL INC.) 2015年 6月 11日 (2015 - 06 - 11)<br>全文                                                                                                                                           | 1-7                  |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| <input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                               |                      |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| * 引用文件的具体类型:<br>"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件<br>"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利<br>"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)<br>"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件<br>"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件<br>"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件<br>"X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性<br>"Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性<br>"&" 同族专利的文件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                               |                      |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| 国际检索实际完成的日期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                               | 国际检索报告邮寄日期           |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| 2017年 5月 23日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                               | 2017年 6月 30日         |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| ISA/CN的名称和邮寄地址                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                               | 受权官员                 |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
| 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)<br>中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088<br>传真号 (86-10)62019451                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                               | 冯骥                   |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                               | 电话号码 (86-10)62413333 |      |                   |         |   |                                                                                                                                                                          |   |   |                                                                                                                                                                                                               |   |    |                                                               |     |   |                                                          |     |   |                                                                     |     |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/080383

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|------|------------|----|----------------|
| CN          | 106291645  | A  | 2017年 1月 4日    | 无    |            |    |                |
| CN          | 105737823  | A  | 2016年 7月 6日    | 无    |            |    |                |
| WO          | 2015081424 | A1 | 2015年 6月 11日   | CA   | 2923988    | A1 | 2015年 6月 11日   |
|             |            |    |                | EP   | 3077849    | A1 | 2016年 10月 12日  |
|             |            |    |                | US   | 8996311    | B1 | 2015年 3月 31日   |
|             |            |    |                | US   | 2015268047 | A1 | 2015年 9月 24日   |