

多模型算法在协同定位中的应用

衣 晓¹ 何 友¹ 关 欣¹

(1 航空工程学院信息融合技术研究所, 烟台市二马路 188 号, 264001)

摘 要: 对编队协同中的导航信息融合问题进行了研究。在利用一个定位圆和状态预测相结合的基础上, 引入多模型算法进行伪测量确定和状态更新, 提出了基于多模型的协同定位算法。仿真结果表明, 该算法具有不需要进行定位圆推同的优点, 并且性能有较大的提高。

关键词: 多模型; 协同定位; 信息融合; 状态估计; 多平台

中图分类号: P228.42; C249.31

现代科学技术已提供给航行体多种导航设备, 使导航与制导系统从单一传感器类型发展到多传感器的组合导航系统, 实现性能互补。利用多传感器信息融合技术的组合导航系统^[1,2]是导航技术未来 20 年研究的热点问题之一。然而, 目前大多数的研究仅限于单平台, 对多平台协同定位的研究还不多。多平台协同定位在编队中具有重要的地位, 在民用和军用中都有广阔的前景, 并已引起广泛的重视^[3]。

本文着重考虑针对运动模型参数未知和/或变化等复杂情况, 如何提高定位精度的问题。

1 基于多模型的相对导航算法

1.1 基本模型

假设在二维情况下, k 时刻己平台的运动状态为 $X(k|k)$ 、 $P(k|k)$, 在 $k+1$ 时刻, 从平台 1 得到的信息有平台 1 的运动状态 $X_1(k|k)$ 、 $P_1(k|k)$ 和己平台距平台 1 的距离 r 、 σ_r 。利用平台 1 提供的信息可得到类雷达测量 (r, θ) , 从而把协同定位转化为目标跟踪的问题, 其中, θ 为平台 1 到己平台连线与 y 方向所夹的锐角。基于最近邻准则, 利用己平台在 k 时刻的信息对 $k+1$ 时刻进行一步预

测, 以确定出己平台在 $k+1$ 时刻的伪测量。

设目标(指己平台)的状态为 X , 系统状态描述为:

$$\left. \begin{aligned} X(k+1) &= \Phi(k)X(k) + G(k)V(k) \\ Z(k) &= H(k)X(k) + W(k) \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, $\Phi(k)$ 为状态转移矩阵; $G(k)$ 为过程噪声分布矩阵; $H(k)$ 为观测矩阵; $W(k)$ 为测量噪声; $V(k)$ 为过程噪声。

己平台状态估计的一步预测和预测误差协方差为:

$$X(k+1|k) = \Phi(k)X(k|k) \quad (2)$$

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1|k)P(k)\Phi^T(k+1|k) + G(k)Q(k)G^T(k) \quad (3)$$

取 $X(k+1|k)$ 的位置分量为 (x_2, y_2) , $P(k+1|k)$ 中对应的对角线分量为 $(\sigma_{x_2}^2, \sigma_{y_2}^2)$ 。利用 $k+1$ 时刻平台 1 的位置估计 (x_1, y_1) 、误差方差 $(\sigma_{x_1}^2, \sigma_{y_1}^2)$ 和定位圆, 可以确定伪测量值 $Z(k+1) = [x^{(1)} \ y^{(1)}]^T$ (如图 1 所示), 则有:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(x^{(1)} - x_1)^2 + (y^{(1)} - y_1)^2} &= r \\ \frac{y_1 - y^{(1)}}{x^{(1)} - x_1} &= \frac{y^{(1)} - y_2}{x_2 - x^{(1)}} \end{aligned} \right\} (4)$$

其伪测量误差协方差矩阵可以仿照 2D 雷达的测量误差协方差矩阵^[4,5]给出:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_r^2(\sin\theta)^2 + r^2\sigma_\theta^2(\cos\theta)^2 & (\sigma_r^2 - r^2\sigma_\theta^2)\sin\theta\cos\theta \\ (\sigma_r^2 - r^2\sigma_\theta^2)\sin\theta\cos\theta & \sigma_r^2(\cos\theta)^2 + r^2\sigma_\theta^2(\sin\theta)^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

$$\sigma_0^2 = 2 - \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2 - \sigma_r^2}{\sqrt{(\hat{x}_2 - \hat{x}_1)^2 + (\hat{y}_2 - \hat{y}_1)^2}}}} \quad (6)$$

然后,按照 Kalman 滤波方程进行滤波:

$$\left. \begin{aligned} X(k+1 | k+1) &= X(k+1 | k) + \\ &K(k+1)[Z(k+1) - \\ &H(k+1)X(k+1 | k)] \\ K(k+1) &= P(k+1 | k)H^T(k+1) \cdot \\ &[(H(k+1)P(k+1 | k) \cdot \\ &H^T(k+1) + R(k+1))]^{-1} \\ P(k+1 | k+1) &= [I - K(k+1)H(k+1)] \cdot \\ &P(k+1 | k) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

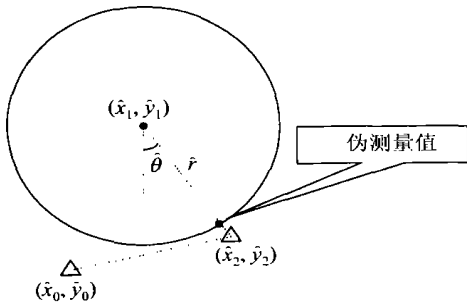


图 1 确定伪测量值的示意图

Fig. 1 Determining Pseudomeasurement

1.2 基于多模型的伪测量确定

当平台运动状态发生改变或模型参数未知/变化时,单模型会产生较大的跟踪误差^[6]。如果采样率足够高,则在两采样点间,平台的运动状态改变不太剧烈。本文用匀速模型和匀变速模型之间的合成来对运动状态进行近似,如图 2 所示。记由匀速模型和匀变速模型得到的一步预测为 (\hat{x}_2, \hat{y}_2) 、 $(\sigma_{x_2}^2, \sigma_{y_2}^2)$ 和 (\hat{x}_3, \hat{y}_3) 、 $(\sigma_{x_3}^2, \sigma_{y_3}^2)$,则有:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(\hat{x}^{(1)} - \hat{x}_1)^2 + (\hat{y}^{(1)} - \hat{y}_1)^2} &= r \\ \left| \frac{\hat{y}_1 - \hat{y}^{(1)}}{\hat{x}^{(1)} - \hat{x}_1} \right| &= \tan \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, θ_1 、 θ_2 分别为 (\hat{x}_1, \hat{y}_1) 和 (\hat{x}_2, \hat{y}_2) 、 (\hat{x}_3, \hat{y}_3) 的连线与 y 方向间的锐角。由于 θ_1 与 θ_2 不相关,所以有:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{4} \quad (9)$$

σ_1^2 和 σ_2^2 可由式(6)求得。

1.3 基于交互式多模型的相对定位模型

伪测量值确定后,利用交互式多模型算法进

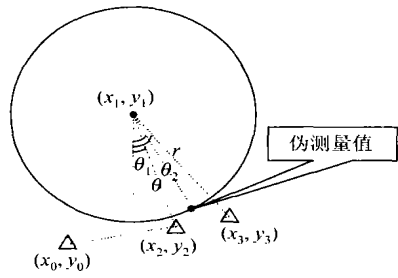


图 2 基于多模型的伪测量确定示意图

Fig. 2 Determining Pseudomeasurement on the Basis of Multiple Models

行状态更新^[7]。

1) 状态估计的交互式作用

设模型转移概率为 $P_{t_{ij}}$ (从模型 i 转移到模型 j 的概率), $X^j(k-1 | k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的滤波器 j 的状态估计, $P^j(k-1 | k-1)$ 为相应的状态协方差阵, $\mu_{k-1}(j)$ 为 $k-1$ 时刻模型 j 的概率 ($i = 1, 2, \dots, N; j = 2, \dots, N$), 则交互计算后,滤波器 k 时刻的输入为:

$$\left. \begin{aligned} X^{0j}(k-1 | k-1) &= \\ \sum_{i=1}^N X^i(k-1 | k-1) u_{k-1|k-1}(i | j) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} u_{k-1|k-1}(i | j) &= \frac{1}{C_j} P_{t_{ij}} u_{k-1}(i) \\ C_j &= \sum_{i=1}^N P_{t_{ij}} u_{k-1}(i) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} P^{0j}(k-1 | k-1) &= \\ \sum_{i=1}^N [P^i(k-1 | k-1) + (X^i(k-1 | k-1) - \\ X^{0j}(k-1 | k-1))(X^i(k-1 | k-1) - \\ X^{0j}(k-1 | k-1))^T] u_{k-1|k-1}(i | j) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2) 模型修正

将 $X^{0j}(k-1 | k-1)$ 、 $P^{0j}(k-1 | k-1)$ 作为 k 时刻第 i 个模型的输入,得到相应的滤波输出 $X^i(k | k)$ 和 $P^i(k | k)$ 。

3) 模型可能性计算

若模型 j 的滤波残差为 d_k^j ,相应的方差为 S_k^j ,并假定服从高斯分布,那么模型 j 的可能性为:

$$\Lambda_k^j = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S_k^j|}} \exp[-\frac{1}{2}(d_k^j)^T (S_k^j)^{-1} d_k^j] \quad (13)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} d_k^j &= Z(k) - H^j(k)X^j(k | k-1) \\ S_k^j &= H^j(k)P^j(k | k-1)[H^j(k)]^T + R(k) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

4) 模型概率更新

模型 j 的概率更新为:

$$u_k(j) = \frac{1}{C} \Lambda_k(j) C_j \quad (15)$$

式中, $C = \sum_{i=1}^N \Lambda_k(i) C_i$ 。

5) 设 $X(k|k)$ 、 $P(k|k)$ 分别为 k 时刻的交互式输出, 则有:

$$X(k|k) = \sum_{i=1}^N X^i(k|k) u_k(i) \quad (16)$$

$$P(k|k) = \sum_{i=1}^N u_k(i) [P^i(k|k) + (X^i(k|k) - X(k|k)) \cdot (X^i(k|k) - X(k|k))^T] \quad (17)$$

基于多模型的协同定位原理框图如图 3 所示。

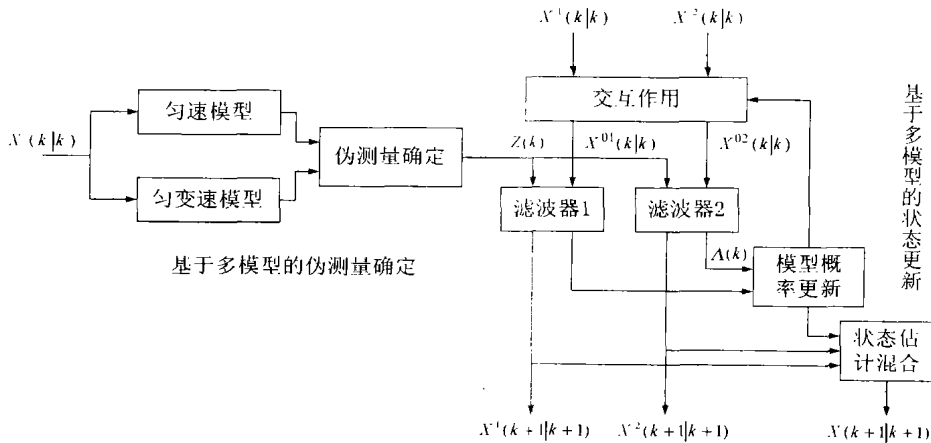


图 3 基于多模型的协同定位原理框图

Fig. 3 Procedure of the Cooperative Localization Algorithm Based on Multiple Models

2 仿真分析

设己平台和平台 1 的初始状态分别为 $[40\ 000, -40\ 25\ 000, -50]^T$ 、 $[-20\ 000, 50\ 25\ 000, -50]^T$, 己平台在 45s、60s 和 105s 时发生机动, $a_x = -20$, $a_y = -25$ 。 $t = 60s$ 时, $a_x = 0$, $a_y = 20$; $t = 105s$ 时, $a_x = 0$, $a_y = -20$ 。 传感器测距误差 $\sigma_r^2 = 100m$, 平台 1 的定位误差 $\sigma_{x_1}^2 = \sigma_{y_1}^2 = 50m$ 。 取 Markov 转移概率为 $P_t = [0.7, 0.3; 0.3, 0.7]$ 。 采样间隔为 1s, 仿真步数为 160 步。 对基于匀速模型、匀加速模型的协同定位误差与本文提出的基于多模型的协同定位算法进行了比较。 图 4 和图 5 分别给出了位置和速度误差的仿真曲线, 图 6 和图 7 给出了仿真 30 次的均方根位置误差和均方根速度误差曲线, 图中均以点线表示匀速模型的结果, 实线表示匀加速模型的结果, 虚线表示基于多模型的结果。

从图中可以看出, 无论是一次实现的位置和速度误差, 还是 30 次 Monte Carlo 试验的结果, 基于多模型的协同定位算法的误差均低于匀速或匀加速模型。 表 1 给出了对均方根误差的统计数据, 本文基于多模型的协同定位算法的位置定位精度可以达到 40m, 速度定位精度可以达到

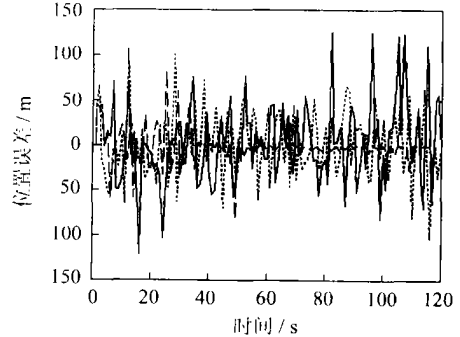


图 4 位置误差比较

Fig. 4 Comparison of the Position Bias

4m/s, 明显优于匀速或匀加速模型。

3 讨论

本文主要研究了针对运动模型参数未知和/或变化等复杂情况下, 如何提高协同定位精度的问题, 提出了基于多模型的协同定位算法。 在伪测量值的确定中引入多模型算法, 实质上是对基于匀速模型与定位圆确定伪测量值和基于匀加速模型与定位圆确定伪测量值的等权平均, 然后将交互式的多模型算法应用于状态更新中, 仅利用一个定位圆就可实现协同定位。

表 1 均方根误差的数据统计

Tab. 1 Statistics of the RMSE Data

| | 均方根位置误差 | | 均方根速度误差 | |
|-------|---------|-------------|--------------------------|------------------------------|
| | 最大值/m | < 40m 的比例/% | 最大值/(m·s ⁻¹) | < 4(m·s ⁻¹)的比例/% |
| 匀速模型 | 126 | 73.6 | 13 | 75 |
| 匀加速模型 | 119 | 75 | 12.6 | 77.5 |
| 本文算法 | 80 | 97 | 4.7 | 97.5 |

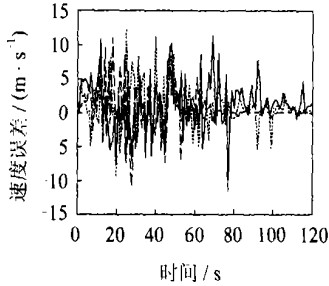


图 5 速度误差比较

Fig. 5 Comparison Between the Velocity Bias

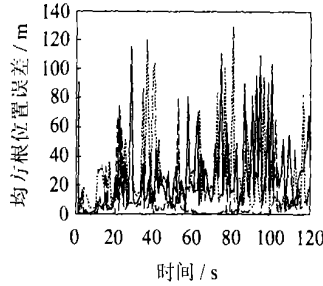


图 6 均方根位置误差比较

Fig. 6 Comparison Between the Position RMSE

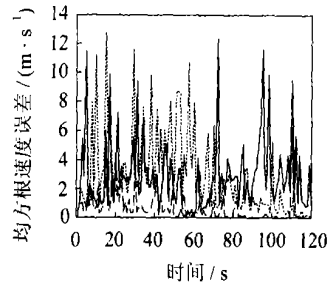


图 7 均方根速度误差比较

Fig. 7 Comparison Between the Velocity RMSE

参 考 文 献

- 1 干国强. 导航与定位. 北京: 国防工业出版社, 2000
- 2 谢世富, 刘治学. 我国无线电导航发展的回顾与几点建议. 全国飞机与船舶通信导航学术研讨会 昆明 2000
- 3 Eric W N, Hugh F D. Multiple Platform Localization and Map Building. Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems. Proc. SPIE 4196 Boston, 2000
- 4 何 友, 王国宏, 陆大銮, 等. 多传感器信息融合及应用. 北京: 电子工业出版社, 2000

- 5 Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking Applications and Advances. Norwood: Artech House, 2001
- 6 何 友. 分布式多传感器信息融合算法研究:[博士论文]. 北京: 清华大学, 1996
- 7 Blackman S S, Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Norwood: Artech House, 1999

第一作者简介: 衣晓, 博士生. 研究方向为多传感器信息融合, 多目标跟踪、组合导航等。
E-mail: yxgx@sohoo.com

Application of Multiple Models Algorithm to Cooperative Localization

YI Xiao¹ HE You¹ GUAN Xin¹

(1 Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute 188 Erma Road, Yantai 264001, China)

Abstract: This paper introduces the current work on the information fusion problem for multiple platform cooperative navigation. On the basis of combining the state prediction with the localization circle, the multiple model (MM) algorithm is presented to calculate the pseudomeasurement and to update the navigation state. A novel MM-based cooperative localization algorithm is put forward. The importance of the new approach is that the performance is greatly improved while the alignment of different localization circles is not necessary.

Key words: multiple models; cooperative localization; information fusion; state estimate; multiple platform

About the first author: YI Xiao, Ph.D candidate. His major research orientations are multisensor Information fusion, multitarget tracking and integrated navigation, etc.
E mail: yxgx@sohoo.com

(责任编辑: 涓涓)