

BD/SINS 紧组合导航及时钟误差处理算法

王 龙, 王 楠, 鲁 浩
(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 远距空空导弹飞行时间长, 纯惯性导航难以满足高精度要求, 而卫星定位/捷联惯性组合导航是解决此难题的一种有效方式, 因此, 采用基于伪距/伪距率的北斗/捷联惯性组合导航算法, 该导航算法使用限定增益 Kalman 滤波器, 对接收机钟差做了特殊处理, 使得滤波结果不受钟差影响。仿真表明, 该北斗/捷联惯性组合导航算法有较高的导航精度。

关键词: 空空导弹; 北斗; 组合导航; 伪距; 伪距率

中图分类号: V271.4; U666.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)04-0054-03

A BD/SINS Integrated Navigation Algorithm and a Clock Error Handling Method

WANG Long, WANG Nan, LU Hao
(China Airborne Missile Academe, Luoyang 471000, China)

Abstract: The navigation accuracy of the pure SINS system can not satisfy the high performance requirement of air-to-air missile when the cruise range of the missile is too long. The GNSS/SINS integrated navigation is an effective method to solve this problem. Because of the successful application of the Beidou satellites navigation system, the research on BD/SINS integrated navigation has become a hot engineering field. In this paper, the integrated navigation algorithm of the BD/SINS is studied. The gain-restriction Kalman filter is adopted in the fusion of the information from the SINS and the BD receiver. In order to mitigate the inverse effect of the clock error of the receiver, a special method is used to eliminate the clock error. Simulation result proved that the integrated navigation method has a high navigation accuracy.

Key words: air-to-air missile; BD; integrated navigation; pseudo-range; pseudo-range rate

0 引言

随着未来空空导弹射程的不断提高, 对导航精度的要求也相应提高。空空导弹由于体积限制需要采用捷联惯性导航系统(SINS), 但不能保障长时间的导航精度。为了提高导航精度, 满足未来空空导弹对于导航精度的需求, 需要有其他系统能够阻尼纯惯性导航, 阻止其随时间发散。北斗(BD)卫星导航系统作为自主研发的全球卫星定位系统, 在军事上有广阔的应用前景, 对未来空空导弹发展将发挥不可替代的作用。本文将 BD 和 SINS 组合导航系统作为研究对象, Kalman 滤波器作为数据融合的方法, 从状态方程和测量方程入手, 对如何提高导航高精度和可靠性做了深入探讨, 提

出了一种有效消除钟差的滤波算法。最后, 仿真结果表明该组合导航算法具有较高的导航精度。

1 组合导航 Kalman 滤波方程

1.1 状态方程

本文采用发射点惯性系为导航坐标系, 其原点位于导弹发射时刻下方的海平面上, X 轴、 Y 轴、 Z 轴分别指向发射时刻的北、天、东, 随后该坐标系做匀速直线运动, 其速度为坐标系建立时刻坐标原点相对于惯性空间的速度。

设 δV 为导航系的速度误差, δR 代表导航系下的位置误差, φ 为导弹的姿态误差, δt_n 为 BD 接收机钟差引起的伪距误差, δt_m 为钟差漂移引起的伪距率误差。

捷联惯性导航误差方程^[1]加上接收机时钟误差方程^[2]即为 Kalman 滤波器的状态方程, 即

收稿日期: 2013-05-29

修回日期: 2014-06-27

作者简介: 王 龙(1979—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 高工, 研究方向为数据融合、组合导航、目标识别与跟踪等。

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta R} \\ \delta V \\ \dot{\phi} \\ \dot{\delta t}_u \\ \dot{\delta t}_{ru} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_b^n \hat{f}_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_f} \end{bmatrix} + G\Delta \quad (1)$$

式中: C_b^n 表示弹体系到导航系的姿态矩阵; \hat{f}_b 是加速度计测量比力所组成的反对称矩阵; τ_f 为 BD 时钟频率漂移的相关时间; G 是状态误差矩阵; Δ 表示系统噪声, 分别为

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_b^n & 0 \\ C_b^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta = \begin{bmatrix} \delta\omega_{ib}^b \\ \delta f \\ \omega_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ω_f 为激励 BD 等效时钟频率误差一阶马尔可夫过程的白噪声项; $\delta\omega_{ib}^b$ 为陀螺仪噪声在弹体系中的分量; δf 为加速度计的噪声在弹体系中的分量。

令 11 维状态变量 $X(t) = [\delta R_x \ \delta R_y \ \delta R_z \ \delta v_x \ \delta v_y \ \delta v_z \ \phi_x \ \phi_y \ \phi_z \ \delta t_u \ \delta t_{ru}]^T$, 则组合系统的状态方程简写为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (3)$$

1.2 量测方程

BD 接收机测量得到的接收机与第 j 颗 BD 卫星之间的伪距可以表示为^[3]

$$\rho_c^j = \rho^j + \delta t_u + \nu_{\rho_j} \quad (4)$$

式中: ρ^j 为理想距离; δt_u 为等效时钟误差带来的距离误差。由于 δt_u 是伪距测量中的主要误差, 因此在建立伪距测量模型时, 主要考虑了该项误差的影响。其他误差放到 ν_{ρ_j} 中, 如电离层、对流层误差, 在经过标准模型修正后, 将其看作是白噪声, 虽然它不是白噪声, 但对于空空导弹应用来说是可以满足要求的, 因为空空导弹对位置精度要求不高。

BD 接收机测量得到的接收机与第 j 颗 BD 卫星之间的伪距率可以表示为^[3]

$$\dot{\rho}_c^j = \dot{\rho}^j + \delta t_{ru} + \nu_{\rho_j} \quad (5)$$

式中: δt_{ru} 为钟差带来的伪距率误差; 从对接收机的实际测量结果来看, ν_{ρ_j} 可以看成白噪声。

设共有 n 颗可见卫星, 则由式(2)和式(3)组成的 BD/SINS 组合系统的观测方程为^[4]

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1 \\ \vdots \\ \delta\rho_n \\ \delta\dot{\rho}_1 \\ \vdots \\ \delta\dot{\rho}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_n & 0 & 0 & -1 & 0 \\ g_1 & e_1 & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_n & e_n & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \phi \\ \delta t_u \\ \delta t_{ru} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu\rho_1 \\ \vdots \\ \nu\rho_n \\ \nu\dot{\rho}_1 \\ \vdots \\ \nu\dot{\rho}_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.3 时钟误差处理

时钟误差通常的处理方法是对时钟误差建模, 如将时钟误差看作一阶马尔可夫过程。但是这种建模并不能准确描述时钟误差变化规律, 也就是说, 时钟误差不能完全消除, 而剩余的时钟误差将转化为速度和位置误差。

若对量测方程(6)做初等变换, 第 1 至 $n-1$ 行同时减去第 n 行, 第 $n+1$ 至 $2n-1$ 行同时减去第 $2n$ 行。则量测方程变为

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1 - \delta\rho_n \\ \vdots \\ \delta\rho_{n-1} - \delta\rho_n \\ \delta\rho_n \\ \delta\dot{\rho}_1 - \delta\dot{\rho}_n \\ \vdots \\ \delta\dot{\rho}_{n-1} - \delta\dot{\rho}_n \\ \delta\dot{\rho}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 - e_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n-1} - e_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_n & 0 & 0 & -1 & 0 \\ g_1 - e_n & e_1 - e_n & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{n-1} - e_n & e_{n-1} - e_n & 0 & 0 & 0 \\ g_n & e_n & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \phi \\ \delta t_u \\ \delta t_{ru} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu\rho_1 \\ \vdots \\ \nu\rho_n \\ \nu\dot{\rho}_1 \\ \vdots \\ \nu\dot{\rho}_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可见, 若不考虑第 n 和 $2n$ 行, 量测值变为第 1 至 $n-1$ 颗卫星同第 n 颗卫星的量测值之差, 而时钟误差引起的伪距和伪距率误差 δt_u 和 δt_{ru} 对新量测值再无影响。因此, 通过初等变换这种时钟误差可以完全消除, 而不需要对时钟建模。

将量测方程和状态方程重写为

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{R} \\ \delta\dot{V} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -C_b^n \hat{f}_b \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_b^n & 0 \\ C_b^n & 0 & 0 \end{bmatrix} \delta\omega_{ib}^b \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1 - \delta\rho_n \\ \vdots \\ \delta\rho_{n-1} - \delta\rho_n \\ \delta\dot{\rho}_1 - \delta\dot{\rho}_n \\ \vdots \\ \delta\dot{\rho}_{n-1} - \delta\dot{\rho}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 - e_n & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n-1} - e_n & 0 & 0 \\ g_1 - g_n & e_1 - e_n & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{n-1} - g_n & e_{n-1} - e_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu\rho_1 - \nu\rho_n \\ \vdots \\ \nu\rho_{n-1} - \nu\rho_n \\ \nu\dot{\rho}_1 - \nu\dot{\rho}_n \\ \vdots \\ \nu\dot{\rho}_{n-1} - \nu\dot{\rho}_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.4 Kalman 滤波方程

将状态方程和观测方程离散化, 得到离散化方程^[5]为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \quad (10)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (11)$$

式中: W_k 为系统噪声序列; H_k 为量测阵; V_k 为量测噪声序列; X_k 为被估计的状态; Z_k 为量测值。离散 Kalman 预测方程如下文所述。

状态估计值计算方程为

$$X_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} X_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k X_{k|k-1}) \quad (12)$$

最优预测增益方程为

$$K_k = \Phi_{k+1,k} P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (13)$$

估计误差方差方程为

$$P_{k+1|k} = (\Phi_{k+1,k} - K_k H_k^T) P_{k|k-1} \Phi_{k+1,k}^T + Q_k \quad (14)$$

2 仿真分析

2.1 飞行轨迹及钟差设置

为了提高 Kalman 滤波器的可观测性,令导弹在 5 km 高度的空中做 S 机动,依据导弹的能力将滚转角指令设置为 $\gamma_c = 0.22 \cos 0.628t$, 导弹的侧向飞行速度见图 1。

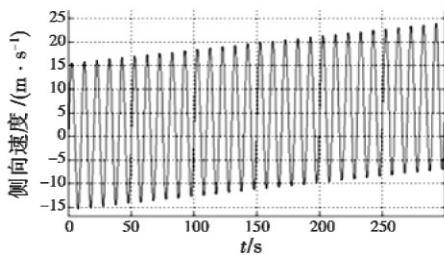


图1 导弹侧向飞行速度

Fig.1 Lateral velocity of missile

为了考查时钟误差对系统的影响,仿真中用到的伪距和伪距率加入时钟误差,将时钟误差设置为一阶 Markov 过程,其带来的伪距和伪距率误差见图 2。

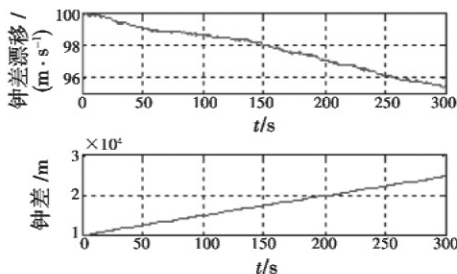


图2 接收机钟差和钟差漂移

Fig.2 Clock drift and drift rate of GPS receiver

2.2 仿真结果

仿真结果如图 3 ~ 图 5 所示。

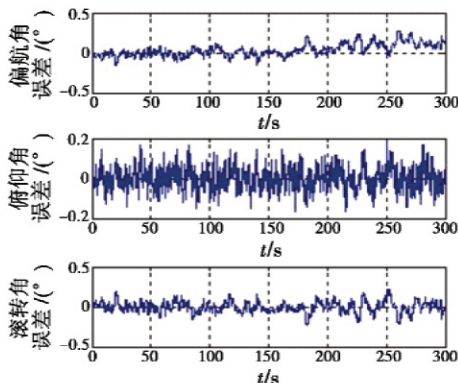


图3 姿态角误差曲线

Fig.3 Curves of attitude errors

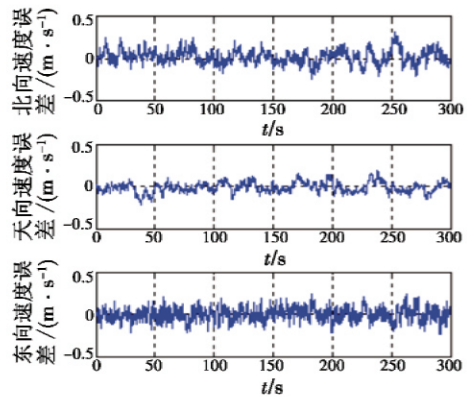


图4 速度误差曲线

Fig.4 Curves of velocity errors

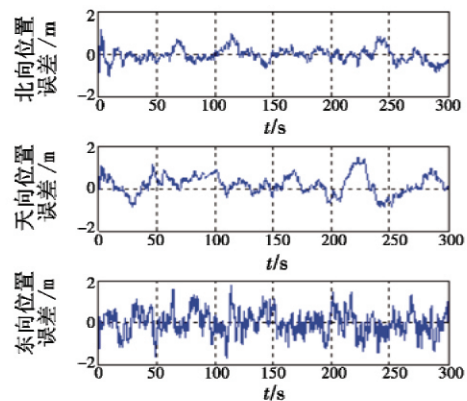


图5 位置误差曲线

Fig.5 Curves of position errors

图 3 ~ 图 5 为应用 Kalman 滤波算法对 BD/SINS 进行的数学仿真,仿真条件为陀螺零漂 $50 (^{\circ})/s$,加速度计零位 $50 mg$,根据接收机测量特性,将伪距率噪声设为零均值白噪声,其方差 $0.04 m/s$,伪距测噪声为均方差 $10 m$ 的白噪声。

3 结论

从 2.2 节的仿真结果可以看出,BD 对 SINS 系统起到了很好的修正效果,3 个姿态角误差能收敛到 0.3° 以内,3 个速度误差能收敛到 $0.5 m/s$ 以内,位置误差在 $2 m$ 以内。由此说明,在导弹发射惯性系下编排的 BD/SINS 组合导航算法能为导弹提供高精度的位置、速度和姿态信息。

参考文献

[1] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006. (QIN Y Y. Inertial navigation[M]. Beijing:Science Press, 2006.)

[2] 周磊,龚诚,王锐. 基于伪距的 GPS/INS 滤波算法设计及仿真[J]. 计算机仿真,2009,30(5):897-904. (ZHOU L, GONG C, WANG R. A filtering algorithm based on pseudo-range of GPS/INS and its simulation[J]. Computer Simulation, 2009,30(5):897-904.)

- (ZHENG Z M, LI J Y. Research on the demand principle for spare part of warship equipment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(2):104-107.)
- [12] 李保华, 杨云. 备件需求预测模型研究[J]. 航空维修与工程, 2008(5):59-61. (LI B H, YANG Y. The study on demand forecasting model of spare parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(5):59-61.)
- [13] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4):311-314. (XU Z S. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgment matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4):311-314.)
- [14] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1):44-47. (CHEN H Y, ZHAO J B. Research on compatibility of fuzzy judgment matrices [J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(1):44-47.)
- [15] ZHOU M L. Principles and practice of similarity system theory [J]. International Journal of General Systems, 1994, 23(1):39-48.
- [16] SNEATH P, SOKAL R. 数值分类学[M]. 赵铁桥, 译. 北京: 科学出版社, 1984. (SNEATH P, SOKAL R. Numerical taxonomy [M]. Translated by ZHAO T Q. Beijing: Science Press, 1984.)
- [17] 王浣尘. 可行性研究和多目标决策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. (WANG H C. The feasibility study and multi-objective decision [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.)
- [18] RAUSAND M. 系统可靠性理论: 模型、统计方法及应用[M]. 2版. 郭强, 王秋芳, 刘树林, 译. 北京: 国防工业出版社, 2010. (RAUSAND M. System reliability theory: Models, statistical methods, and applications [M]. 2nd ed. Translated by GUO Q, WANG Q F, LIU S L. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)

(上接第56页)

- [3] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007. (LIU J Y. The principle and methodology of satellite navigation [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.)
- [4] 杨静, 张洪钺, 朱士青. 基于伪距、伪距率的 GPS/SINS 容错组合导航系统[J]. 航天控制, 2003, 21(3):17-25. (YANG J, ZHANG H Y, ZHU S Q. An GPS/INS integrated navigation system based on pseudo-range and pseudo-range rate [J]. Aerospace Control, 2003, 21(3):17-25.)
- [5] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. (QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Kalman filter and principle of integrated navigation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)

(上接第74页)

- [11] KIM S, CHU H, YANG I, et al. A hierarchical self-repairing architecture for fast fault recovery of digital systems inspired from paralogous gene regulatory circuits [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 20(12):2315-2328.
- [12] YANG I, JUNG S H, CHO K H. Self-repairing digital system with unified recovery process inspired by endocrine cellular communication [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2013, 21(6):1027-1040.
- [13] ORTEGA-SANCHEZ C, MANGE D. Embryonics: A bio-inspired cellular architecture with fault-tolerant properties [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2000, 1(3):187-215.
- [14] SZASZ C, CHINDRIS V. Self-organizing and fault-tolerant behaviors approach in bio-inspired hardware redundant network [C]//Processing of 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2010:37-42.
- [15] ZHU S, CAI J Y, MENG Y F, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2014, 13:224-232.



请扫描二维码
关注我刊

