摇摆基座SINS快速精确传递对准方法

王新龙 申亮亮 马 闪

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 动基座对准时,系统模型的精确性及状态的可观测性和可观测度是决定动态系统卡尔曼滤波效果的重要因素.建立了考虑主-子惯导匹配信息时间延迟问题的摇摆基座捷联惯导系统SINS(Strapdown Inertial Naviagtion System)精确传递对准模型,将PWCS(Piece-Wise Constant System)可观测性与奇异值分解可观测度分析方法相结合,对基座在不同摇摆方式下舰载武器SINS状态的可观测度进行了定量分析,得到了基座在三轴摇摆运动时SINS的状态变量具有最佳的可估计性能,从而使SINS可获得最优的对准速度和精度.该方法为舰载武器初始对准时舰船最佳机动方案及传递对准匹配模式的选择提供了依据,仿真结果表明了该方法的正确性和有效性.

关 键 词: 惯性导航系统; 对准; 时间测量; 可观测性; 卡尔曼滤波

中图分类号: U 666.11

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)06-0728-04

Transfer alignment of strapdown inertial navigation systems on rolling bases

Wang Xinlong Shen Liangliang Ma Shan

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the process of initial alignment for rolling bases, the accuracy of a model and the observability and observability degree of states are important facts to confirm the filtering effect. A fast and precise alignment method for rolling bases was discussed. Considering time-delay between the master and slave inertial navigation system, a precise transfer alignment model of "velocity + pose" matching was established. The observability analysis of piece-wise constant system (PWCS) and singular value decomposition of observability degree were combined, the observability degree of strapdown inertial navigation system (SINS) 's states were analyzed quantificationally, and the optimal estimation of SINS can be received at the three axes rolling state. Consequently, the SINS can achieve the optimal speed and precision of initial alignment performance. The choice of optimal maneuvers trajectory for carriers and the matching mode of transfer alignment can be gained for alignment of carrier weapons. The simulation results validate the efficiency of this method.

Key words: inertial navigation system; alignment; time measurement; observability; Kalman filtering

传递对准是解决捷联惯导系统SINS(Strapdown Inertial Naviagtion System)动基座对准问题的主要方法.它是通过引入高精度的主惯导信息,以此为基准运用卡尔曼滤波器来估计子惯导系统的速度误差、姿态角误差和惯性器件误差等状态变量的值,从而对子惯导信息进行补偿.

在进行传递对准时,为了提高对准的速度和精度,需要载体有目的地进行适当的机动动作.在目标预定、任务单一的情况下,单纯利用速度匹配实现传递对准要求是可行的[1].但对目标随机、任

收稿日期: 2008-04-04

基金项目: 水下信息处理与控制国防科技重点实验室基金资助项目(51448020105HK0101); 北京航空航天大学教改资助项目(2008)

作者简介: 王新龙(1969—),男,陕西渭南人,副教授,xlwon@163.com.

务灵活、要求反应迅速的战术应用(如舰载战术导弹、空空导弹),若对准时间过长,机动动作过大,就可能丢失目标而失去攻击机会,甚至会遭到对方的攻击. 文献[2]研究了一种速度+姿态的传递对准匹配方案,它克服了传递对准使用单一匹配方法的缺陷,能够满足机载导弹又快又准的对准要求,因而获得了广泛应用. 由于舰船不可能具有像载机那样强的机动性,舰载武器 SINS 的对准一般是在较低的速度和角速度下进行的. 本文对在摇摆基座下如何实现舰载武器 SINS 的快速精确传递对准方法进行了研究.

1　SINS 传递对准滤波模型

1.1　状态方程的建立

考虑水平速度误差、数学平台失准角和安装误差角 8 个状态,即状态变量取为

$$\boldsymbol{X}(t)=[\delta V_x \quad \delta V_y \quad \phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z \quad \mu_x \quad \mu_y \quad \mu_z]^{\mathrm{T}}$$

其中速度误差方程为

$$\delta\dot{\boldsymbol{V}}^{\mathrm{n}}(t)=\boldsymbol{f}^{\mathrm{n}}(t)\times\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{n}}(t)+\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{a}}(t)$$

数学平台失准角方程为

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}^{\mathrm{n}}(t)=-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{in}}^{\mathrm{n}}\times\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{n}}(t)-\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\omega_{\mathrm{g}}(t)$$

安装误差角方程为

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}(t)=0$$

综合以上各式,得到 SINS 传递对准的状态方程为[2]

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t)=\boldsymbol{F}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{G}(t)\boldsymbol{W}(t) \tag{1}$$

1.2　量测方程的建立

将主/子惯导的速度输出值进行匹配,得到速度匹配量测方程为

$$\boldsymbol{Z}_v(t)=\delta\boldsymbol{V}^{\mathrm{n}}(t)+\boldsymbol{V}_v(t)=\boldsymbol{H}_v(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}_v(t)$$

同理,姿态匹配量测方程为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{dcm}}(t)=\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{n}}(t)-\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{n}}\mu(t)+\boldsymbol{V}_{\mathrm{dcm}}(t)=\boldsymbol{H}_{\mathrm{dcm}}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}_{\mathrm{dcm}}(t)$$

式中,$\boldsymbol{V}_v(t)$,$\boldsymbol{V}_{\mathrm{dcm}}(t)$分别为速度和姿态量测噪声.

将速度与姿态量测方程合并,得到传递对准时 SINS 的量测方程为

$$\boldsymbol{Z}(t)=\boldsymbol{H}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}(t) \tag{2}$$

其中量测矩阵:

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{2\times2} & \boldsymbol{O}_{2\times3} & \boldsymbol{O}_{2\times3}\\ \boldsymbol{O}_{3\times2} & \boldsymbol{I}_{3\times3} & -\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{n}}\end{bmatrix}$$

2　时间延迟时 SINS 改进滤波模型

传递对准时,卡尔曼滤波器的解算是在子惯导中进行的. 在将主惯导系统的量测数据传输到子惯导系统时,由于舰船尺寸庞大,传输过程传感器及电子线路需要一定的反应时间,从而导致主惯导系统信息的延迟[3],使得在同一采样时间得到的主/子惯导系统之间的匹配信息不同步. 因此,若同一时间利用主/子惯导系统之间不相匹配的量测信息进行滤波处理,必将影响 SINS 对准的精确性. 在单纯的速度匹配对准方法中,通常不考虑时间延迟问题. 然而,在利用速度+姿态的匹配方式时,由于姿态相对速度的变化要快得多,因此,利用姿态匹配时需要考虑信息的传递时间延迟问题.

设主惯导的真实姿态矩阵为 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\psi,\theta,\gamma)$,由于传输时间延迟,实际的姿态矩阵为

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\tilde{\psi},\tilde{\theta},\tilde{\gamma})=\begin{bmatrix}\cos\tilde{\gamma}\cos\tilde{\psi}+\sin\tilde{\gamma}\sin\tilde{\theta}\sin\tilde{\psi} & -\cos\tilde{\gamma}\sin\tilde{\psi}+\sin\tilde{\gamma}\sin\tilde{\theta}\cos\tilde{\psi} & -\sin\tilde{\gamma}\cos\tilde{\theta}\\ \cos\tilde{\theta}\sin\tilde{\psi} & \cos\tilde{\theta}\cos\tilde{\psi} & \sin\tilde{\theta}\\ \sin\tilde{\gamma}\cos\tilde{\psi}-\cos\tilde{\gamma}\sin\tilde{\theta}\sin\tilde{\psi} & -\sin\tilde{\gamma}\sin\tilde{\psi}-\cos\tilde{\gamma}\sin\tilde{\theta}\cos\tilde{\psi} & \cos\tilde{\gamma}\cos\tilde{\theta}\end{bmatrix}$$

式中,$\tilde{\psi}=\psi-\Delta\psi$;$\tilde{\theta}=\theta-\Delta\theta$;$\tilde{\gamma}=\gamma-\Delta\gamma$;$\Delta\psi,\Delta\theta,\Delta\gamma$是传输时间延迟而引起的姿态误差. 因 $\Delta\psi,\Delta\theta,\Delta\gamma$ 是小量,故作如下近似:

$$\sin\tilde{\psi}=\sin(\psi-\Delta\psi)\approx\sin\psi-\Delta\psi\cos\psi$$

$$\cos\tilde{\psi}=\cos(\psi-\Delta\psi)\approx\cos\psi+\Delta\psi\sin\psi$$

$$\sin\tilde{\theta}=\sin(\theta-\Delta\theta)\approx\sin\theta-\Delta\theta\cos\theta$$

$$\cos\tilde{\theta}=\cos(\theta-\Delta\theta)\approx\cos\theta+\Delta\theta\sin\theta$$

$$\sin\tilde{\gamma}=\sin(\gamma-\Delta\gamma)\approx\sin\gamma-\Delta\gamma\cos\gamma$$

$$\cos\tilde{\gamma}=\cos(\gamma-\Delta\gamma)\approx\cos\gamma+\Delta\gamma\sin\gamma$$

则

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\tilde{\psi},\tilde{\theta},\tilde{\gamma})=\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\psi,\theta,\gamma)+\Delta\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\Delta\psi,\Delta\theta,\Delta\gamma)$$

从而,上式可写成如下形式:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\tilde{\psi},\tilde{\theta},\tilde{\gamma})=\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\psi,\theta,\gamma)+\Delta\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\dot{\psi},\dot{\theta},\dot{\gamma})\cdot\Delta t$$

式中,Δt 为传输延迟时间;$\Delta\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\dot{\psi},\dot{\theta},\dot{\gamma})$是将 $\Delta\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\Delta\psi,\Delta\theta,\Delta\gamma)$中的 $\Delta\psi,\Delta\theta,\Delta\gamma$ 用 $\dot{\psi},\dot{\theta},\dot{\gamma}$ 代替而得到的,并近似为 $\Delta\psi=\dot{\psi}\cdot\Delta t$;$\Delta\theta=\dot{\theta}\cdot\Delta t$;$\Delta\gamma=\dot{\gamma}\cdot\Delta t$.

故考虑时间延迟的姿态角匹配量测方程为

$$\tilde{\boldsymbol{Z}}_{\mathrm{dcm}}(t)=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{dcm}}(t)+\boldsymbol{d}(t)\cdot\Delta t \tag{3}$$

式中

$$\boldsymbol{d}(t)=[-D(2,3) \quad D(1,3) \quad -D(1,2)]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{D}=\Delta\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}(\dot{\psi},\theta,\dot{\gamma})\cdot\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{m}}\cdot\boldsymbol{C}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{b}}$$

因主/子惯导之间的延迟时间为随机常量,即

$$\Delta\dot{t}(t)=0$$

将传递时间延迟增加为状态,则得到扩展后的SINS传递对准卡尔曼滤波模型为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{X}}(t)&=\boldsymbol{F}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{G}(t)\boldsymbol{W}(t)\\\boldsymbol{Z}(t)&=\boldsymbol{H}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}(t)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{X}(t)=[\delta V_x,\delta V_y,\phi_x,\phi_y,\phi_z,\mu_x,\mu_y,\mu_z,\Delta t]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{F}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{2\times3}&\boldsymbol{f}^{\mathrm{n}}\times&\boldsymbol{0}_{2\times3}&\boldsymbol{0}_{2\times1}\\\boldsymbol{0}_{3\times3}&-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{n}}\times&\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times1}\\\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times1}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{2\times3}&\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}\\-\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{n}}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\\boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{0}_{3\times3}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&\boldsymbol{0}_{1\times3}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{2\times2}&\boldsymbol{0}_{2\times3}&\boldsymbol{0}_{2\times3}&\boldsymbol{0}_{2\times1}\\\boldsymbol{0}_{3\times2}&\boldsymbol{I}_{3\times3}&-\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{n}}&\boldsymbol{d}\end{bmatrix}$$

3 SINS改进滤波模型可观测性

状态估计的速度和精度是由系统的可观测性及其状态变量的可观测度决定的.为了保证传递对准时使系统状态得到快速精确的估计,首先需要分析系统的可观测性.

分段式定常系统PWCS(Piece-Wise Constrant System)可观测性分析方法[4],它是在一个足够小的时间段内,将时变系统看作定常系统,利用可观测矩阵代替总的可观测矩阵来分析系统的可观测性,可使可观测性分析过程大大简化.

PWCS可观测性分析方法可以定性分析系统状态能否被观测,然而无法定量给出某个状态的可观测程度,可观测度才是真正反映卡尔曼滤波收敛精度和速度的重要指标.基于奇异值分解的可观测度分析方法[5],它通过对可观测矩阵进行奇异值分解来判断各个状态变量的可观测程度.

摇摆基座上传递对准模型是时变的,为了对处于不同状态下SINS的可观测性进行分析,可将基座状态分为无摇摆、艏摇、纵摇、横摇、三轴摇摆5种典型情况.取舰船绕每个轴的摇摆幅值分别为$\theta_{\mathrm{hm}}=3°$,$\theta_{\mathrm{pm}}=3°$,$\theta_{\mathrm{rm}}=3°$;摇摆周期分别为$T_{\mathrm{h}}=12\ \mathrm{s}$,$T_{\mathrm{p}}=7\ \mathrm{s}$,$T_{\mathrm{r}}=9\ \mathrm{s}$.利用PWCS可观测性分析方法与奇异值分解可观测度方法相结合,得到不同情况下各状态的可观测度如表1所示.

从表1可以看出,无摇摆运动时,系统可观测矩阵的秩为8,小于系统状态的维数9,系统不完全可观测.当存在摇摆运动时,系统变得完全可观测.尤其当基座绕艏摇、纵摇、横摇三轴摇摆运动存在时,系统状态的可观测度最高,这时卡尔曼滤波器可对系统状态进行很好的估计,从而使SINS可以获得最佳的对准性能.

表1 不同条件各状态变量的可观测度

状态	无摇摆	艏摇	纵摇	横摇	三轴摇摆
δV_x	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
δV_v	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ϕ_x	9.836	9.836	9.836	9.839	9.836
ϕ_v	9.839	9.839	9.839	9.836	9.839
ϕ_z	1.414	1.414	1.414	1.414	1.414
μ_x	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
μ_v	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
μ_z	0.0006	0.00065	0.023	0.033	0.038
Δt	0.000	0.056	0.090	0.110	0.153

4 仿真结果及分析

仿真时,取三轴摇摆运动的幅值和周期与进行可观测性分析时一致;状态变量的初值$X(0)$均取为0;初始数学平台失准角ϕ_x,ϕ_y和ϕ_z均取为1°;安装误差角μ_x,μ_y和μ_z均取为0.5°;陀螺仪常值漂移为0.02(°)/h,随机漂移为0.01(°)/h;加速度计常值偏置为$1\times10^{-4}\ g$,随机偏置为$5\times10^{-5}\ g\cdot\sqrt{\mathrm{s}}$;速度和姿态的测量噪声标准差分别为0.01 m/s与3′;取传输延迟时间为30 ms.

为验证时间延迟对对准性能的影响,分别利用传统不考虑时间延迟和本文建立的考虑时间延迟的传递对准模型进行SINS在摇摆基座上的传递对准比较,从仿真结果图1～图4可以看出(由于篇幅所限,仅给出了东向和方位失准角的估计效果):

在传递对准过程中,未考虑时间延迟时,3个失准角收敛速度较慢,如图1～图2所示,对准结束时失准角的误差较大,分别为:东向0.4′、北向0.28′、方位6.5′.因此,传输时间延迟引起的误差不能忽视.

通过将主/子惯导匹配信息传输延迟时间扩充为系统状态变量,这样在对准过程中可对时间延迟量值进行实时估计,减小了传输延迟造成的姿态角匹配误差,从而提高了传递对准的速度和精度.

图3～图4表明考虑时间延迟后3个失准角的收敛速度加快,对准结束时3个失准角分别为:东向0.014′、北向0.16′、方位2.74′.

速度+姿态的传递对准匹配方式,只需要载体进行简单的摇摆运动即可快速完成对准,这种

匹配方式为大型载体在低机动条件下实现快速对准提供了可能.因此,对于舰载武器 SINS,速度+姿态匹配的传递对准方法不失为一种理想的方法,它不需要做特别的机动动作,只需利用舰船的自然摇摆运动就可提高系统的可观测性,从而提高对 SINS 姿态误差角的估计速度及精度.

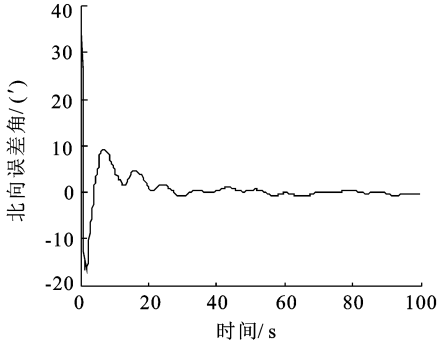


图 1　北向失准角(未考虑延迟)

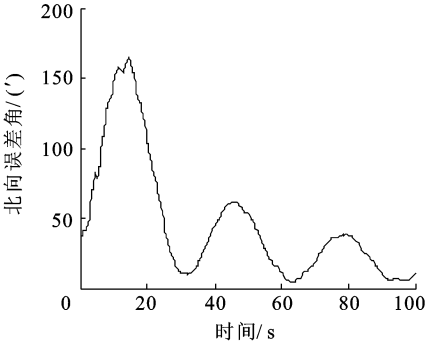


图 2　方位失准角(未考虑延迟)

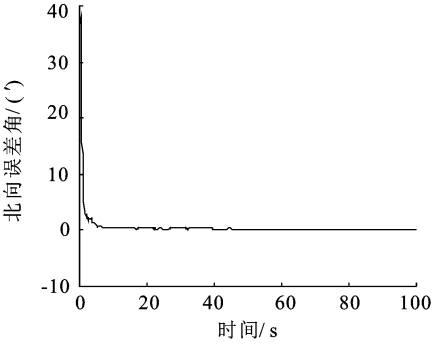


图 3　北向失准角(考虑延迟)

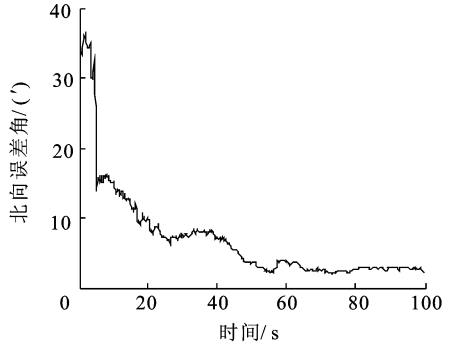


图 4　方位失准角(考虑延迟)

5　结　论

舰载武器 SINS 传递对准的性能有赖于系统的可观测性,而系统的可观测性取决于量测匹配量的选择及载体的机动方式.由于舰船惯性大,且受海水阻力和风浪等的影响,不可能像空中对准那样做出相当强的机动运动,因而舰载武器的对准通常是在较低的速度、角速度下进行的.另外,舰船上主、子惯导相距较远,主惯导的导航信息上传至舰载武器 SINS 的 CPU 时,相对子惯导导航数据存在一个时延,对于时间标定误差或数据传输延时,可以通过在对准滤波器中增加一个延时误差状态,在线估计并予以补偿.

就可观测性而言,速度+姿态角匹配能同时兼顾计算参数和测量参数两种匹配方式的优点,而且采用姿态角信息,可使方位角误差的估计速度加快,舰船只需做简单的机动运动(如摇摆运动)即可实现精确对准.在三轴摇摆条件下,SINS 系统具有最佳的可观测性,从而可获得最佳的对准速度和精度效果.对舰船来讲,摇摆运动容易实现,如借助海浪或减摇鳍进行助摇.可见,这种匹配方式也降低了对载体机动性的要求.因此,舰船三轴摇摆机动与速度+姿态的匹配方式相结合,可使舰载武器 SINS 达到既快又准的对准目的.此研究结果可为舰载武器(包括舰载导弹、鱼雷、舰炮等)SINS 对准方案的设计提供参考.

参考文献(References)

[1] 张静. SINS 空中初始对准滤波器的设计[J]. 上海航天, 2000(6): 34－38
Zhang Jing. Design of the filter for inertial alignment on flying plane of SINS[J]. Aerospace Shanghai, 2000(6): 34－38(in Chinese)

[2] Spalding K. An efficient rapid transfer alignment filter[R]. AIAA-92-4598-CP, 1992: 1276－1286

[3] LimYou-Chol, Joon Lyou. An error compensation method for transfer alignment[DB/OL]. USA: IEEE, 2001[2008-10-21]. http:// ieeexplore. ieee. org/stamp/stamp. jsp

[4] Goshen-Meskin D, Bar-Itzhack I Y. Observability analysis of piece-wise constant system-part I: theory [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1992, 28(4): 1056－1067

[5] 程向红,万德钧,仲巡. 捷联惯导系统的可观测性和可观测度研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(6): 6－11
Cheng Xianghong, Wan Dejun, Zhong Xun. Study on observability and its degree of strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Southeast University, 1997, 27(6): 6－11(in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)