

SINS/GPS 紧耦合模式性能分析*

Performance Analysis of SINS/GPS Tightly Coupled Mode

北京航空航天大学宇航学院 王新龙 谢佳 王君帅

[摘要] 首先介绍 SINS/GPS 3 种紧耦合模式 (tightly coupled 模式、ultra-tightly coupled 模式及 deeply coupled 模式) 工作机理, 然后系统分析了各耦合模式的特点、动态适应性及抗干扰性能, 最后通过设计的 SINS/GPS 紧耦合导航仿真验证平台, 对 3 种紧耦合模式的工作性能进行了仿真验证, 并给出了结论。

关键词: GPS 捷联惯导系统(SINS) 载波跟踪环 动态性 抗干扰能力

[ABSTRACT] The mechanisms of three SINS/GPS tight coupled modes are introduced at first, namely tightly coupled mode, ultra-tightly coupled mode and deeply coupled mode. From the aspects of anti-jamming capability, accuracy, speedability and reliability, the characteristics and adaptability in dynamic environment of these modes are discussed in detail based on their features. At last, the conclusive suggestion is proposed with respect to the choice of these SINS/GPS integrated modes in engineering application.

Keywords: GPS Strapdown inertial navigation system (SINS) Carrier-tracking loop Dynamics Anti-jamming capability

GPS 可为全球范围的用户提供全天候、连续三维的导航定位服务信息, 其突出的优点是导航定位精度高, 但如果接收机天线受到遮挡或信号受到干扰时, GPS 就无法正确定位; 同时, GPS 的数据输出频率较低, 无法满足载体大机动要求, 也不能输出较高精度的载体姿态信息。捷联惯性导航系统(SINS) 能够为用户提供完整的导航信息, 其优点是自主性强, 短时精度高, 抗干扰能力强, 实时性好, 但具有误差随时间累积的缺点。

SINS/GPS 组合导航系统的突出优点是在保证系统完整性的基础上, 可提供优于任一单独系统的精度及可靠性。具体来讲, SINS/GPS 组合系统具有如下特点^[1-4]: (1) SINS/GPS 组合对改善系统精度有利; (2) SINS/GPS 组合加强系统的抗干扰能力; (3) SINS 辅助 GPS 信号的捕获; (4) SINS 提高 GPS 接收机的跟踪能力; (5) 可以解决 GPS

的模糊度和周跳问题; (6) 解决了 GPS 动态应用输出频率低的问题; (7) 采用 SINS/GPS 组合可降低对惯导系统的要求; (8) SINS/GPS 组合系统较单一导航系统综合性能更强、应用领域更广。

在高动态、干扰应用环境下 GPS 信号的接收出现的主要问题是^[5-8]: (1) 高动态使 GPS 载波产生较大的多普勒频移和频移变化率, 若使用一般的载波锁相环, 则载波多普勒频移常常会超出锁相环的捕获带, 因此不能保证对载波的可靠跟踪, 为此就必须增加环路的带宽, 这样就会使宽带噪声窜入, 随着噪声的增加可能导致码环全部失锁; (2) 高动态也使得 GPS 信号的副载波—伪随机码产生动态时延和频移, 随着动态的增强, 当载波环失锁时, 最终将引起码环的失锁, 从而得不到伪距测量。而且重新捕获时间加长, 使得导航解发散; (3) 外部自然噪声、外界干扰信号和接收机内部元器件热噪声共同引起了跟踪环路测量误差。其中, 外界自然噪声与内部元器件的热噪声决定了在正常环境下跟踪环路热噪声颤动的大小。在干扰环境下, 干扰信号经过天线、射频前端进入跟踪环路后将造成卫星信号载噪比降低, 从而引起跟踪环路热噪声颤动加剧、测量误差增加。由此可见, 干扰信号是通过加剧热噪声颤动的方式来增大跟踪环路的测量误差, 进而影响环路跟踪性能的下降甚至超过跟踪门限导致环路失锁。本文针对 SINS/GPS 紧耦合模式在高动态、干扰环境下的适应性进行了系统分析。

1 SINS/GPS 紧耦合模式机理分析

1.1 Tightly coupled 组合模式

Tightly coupled 组合是指通常所说的伪距、伪距率组合模式(图 1)。根据 SINS 信息和卫星星历计算接收机相对于卫星的伪距、伪距率, 并与 GPS 码环和载波跟踪环得到的伪距和伪距率相减, 作为 Kalman 滤波器的测量信息, 通过卡尔曼滤波器估计 SINS 的误差量以及接收机钟差等, 然后对系统进行开环校正或反馈校正。

在该组合模式中, 送入组合卡尔曼滤波器的观测量为未经处理的 GPS 伪距、伪距率测量值和根据卫星星历和 SINS 导航数据得到的卫星与接收机视线方向(LOS)的伪距、伪距率, GPS 接收机仍然独立于惯导系统, 结构

* 国家自然科学基金项目(61074157)资助。

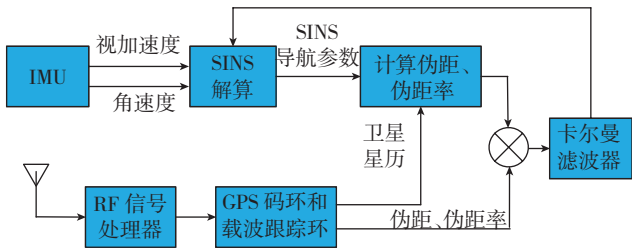


图1 Tightly coupled组合模式原理框图

Fig.1 Principle block diagram of tightly tightly coupled mode

简单,可使用GPS的估计值来重置SINS的参数。

相对于Loosely coupled组合模式,该模式采用未经处理过的伪距和伪距率测量结果直接送入组合滤波器,其测量方程的可观性得到增强,理论上的组合效果比位置、速度组合方式(Loosely coupled)好。但是,由于它没有利用SINS进行辅助,因而GPS接收机的抗干扰能力并未得到增强。当接收机在低动态、干扰较小时,载波跟踪环可以正常工作,能够为码环提供高质量的速率辅助,在GPS干扰环境或是中等动态环境下,GPS可能难以提供连续高精度的导航信息以对SINS误差进行校正。

1.2 Ultra-tightly coupled 组合模式

Ultra-tightly coupled组合模式与Tightly coupled组合模式相比,除了采用相同的伪距、伪距率组合外,它还利用SINS输出的速率信息来辅助GPS的跟踪环路,如图2所示^[9]。这样组合,能够提高GPS接收机的抗干扰性、高动态性能以及GPS信号的捕获和再捕获性能。

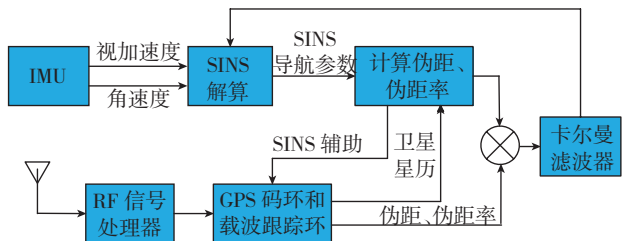


图2 Ultra-tightly coupled组合模式原理框图

Fig.2 Principle Block diagram of ultra-tightly coupled mode

在干扰很小或无干扰的环境中,利用SINS/GPS紧组合模式无太大优势。在中等干扰情况下,利用ultra-tightly coupled组合模式将明显提高利用载波相位进行测距时GPS接收机的性能,在长时间干扰的情况下,也可提高利用伪码测距的接收机性能。在强干扰、高动态应用场合,利用tightly coupled组合模式将明显提高GPS接收机的性能。利用SINS提供的速率信息辅助载波环和码环,能够提高信号动态跟踪与抗干扰性能,从而可提高系统的导航定位精度和可靠性。

这种组合模式较常用的惯性辅助方法是将从SINS得出的伪距变化率与跟踪环的环路滤波器的输出相加,

送入载波NCO(数控振荡器)或码NCO。在有外部速率辅助信息并假定接收机具有性能优良的时钟信号情况下,载波环路带宽可降到1Hz,这样抗干扰能力相对无速率辅助情况将提高大约15dB甚至更高。但在这种工作方式下,需要对现有的SINS系统和GPS接收机的硬件部分进行改造,以满足一体化要求,其工程应用比较复杂。

1.3 Deeply coupled 组合模式

Deeply coupled是一种新的SINS/GPS组合模式^[10-11]。它以矢量跟踪为基础,采用SINS与卫星接收机信号相关器输出信号进行数据融合,接收机内部不需要进行信号跟踪,信号跟踪的最优化是在数据融合时统一进行设计,因此Deeply coupled组合模式在理论上性能将明显优于Tightly coupled与Ultra-tightly coupled方式,实现了“全局最优”。在该组合模式的实现过程中,采用的方法包括使用一个大的滤波器或者成倍的小滤波器,用GPS接收机通道中同相(I)和正交相(Q)的相关采样值作为滤波器的观测量来更新滤波状态。本地载波的数控振荡器和码环的数控振荡器的控制量(输入量)来自于组合导航滤波器的输出。而组合导航滤波器利用GPS接收机输出的伪距、伪距率以及SINS计算得到的伪距、伪距率差值作为组合导航滤波器的观测量,并根据SINS的误差传播方程建立的误差模型对SINS进行反馈校正。因而,这种组合模式,可以获得更高的载波相位跟踪带宽和抗干扰能力。这种Deeply coupled组合原理如图3所示。

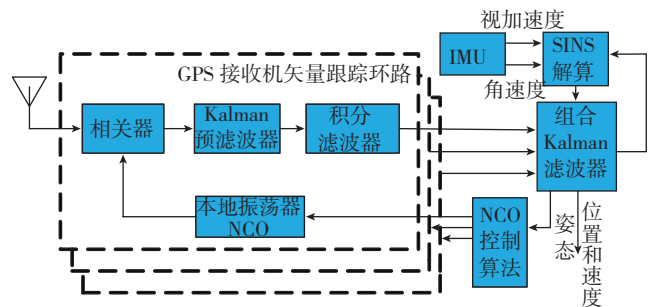


图3 Deeply coupled原理框图

Fig.3 Principle block diagram of deeply coupled mode

对于一阶码环DLL,卡尔曼预滤波器的状态模型描述如下(不考虑过程噪声):

$$\begin{pmatrix} \tau_{k+1} \\ T_{k+1} \\ \dot{T}_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 4B_L T & 4B_L & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_k \\ T_k \\ \dot{T}_k \end{pmatrix},$$

其中, τ_k 为环路估计的伪距值; T_k 为卫星与接收机之间的几何距离; \dot{T}_k 为卫星与接收机之间的几何距离率; B_L 为环路跟踪带宽; T 为预检测积分时间。

用于更新环路滤波器的观测量可以通过下式来得到。

(1)非相干超前-滞后检测器输出:

$$\begin{aligned} L_{\text{DLL}} &= Q_E^2 - Q_L^2 + I_E^2 - I_L^2 + \varepsilon \\ &= 2 \frac{a^2}{T_c} (2-d)(T_k - \tau_k) + \varepsilon \end{aligned}$$

其中, a 为 GPS 信号的幅度; T_c 为码片的长度; d 为相关间隔; Q_E, I_E, Q_L, I_L 分别为同相、正交项的超前、滞后信号; ε 为检测噪声。

(2) 由 SINS 得到的距离、距离率:

$$\begin{aligned} L_{\text{INS}} &\equiv T_k + \hat{b}_{\text{clock}} + \hat{c}_{\text{INS}} + \varepsilon \\ \dot{L}_{\text{INS}} &\equiv \dot{T}_k + \hat{b}_{\text{clock}} + \hat{c}_{\text{INS}} + \dot{\varepsilon} \end{aligned}$$

其中, \hat{b}_{clock} 分别为由组合 Kalman 滤波器估计得到的时钟误差、时钟误差率; $\hat{c}_{\text{INS}}, \dot{\hat{c}}_{\text{INS}}$ 分别为由组合 Kalman 滤波器估计得到的惯性误差。

对于载波环 PLL、载波辅助环以及高阶环路的模型可以得到类似的系统模型。跟踪环路中的卡尔曼预滤波器也可以采用其它的最优估计算法来实现。

一个实际的基于 Deeply coupled 组合模式 SINS/GPS 组合导航系统设计实现框图如图 4 所示^[12]。

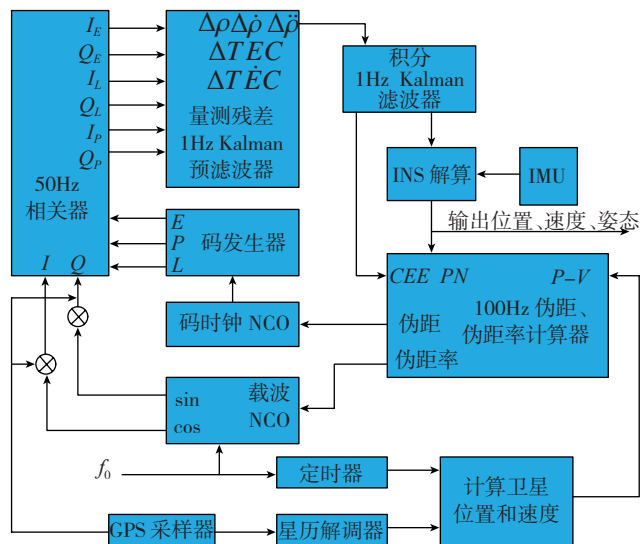


图4 Deeply coupled组合实现框图

Fig.4 Block diagram of deeply coupled implement

在该组合模式中,相关器送出两路正交的 I, Q 采样信号到 Kalman 预滤波器。滤波器对采样信号进行高速处理并将产生的残差送入一个低速积分滤波器。这种方法将一个大的理想高速 Kalman 滤波器分解成一个或多个残差 Kalman 预滤波器和至少一个积分滤波器,通过 Kalman 滤波器的联合使用来分担处理器计算量。用户晶振时钟和 IMU 误差源的稳定性决定了积分滤波器的速度。通过对 GPS 卫星接收机信号进行相关处理,得到的同相和正交信号再进行实际残差的量测,才能得到 Kalman 预滤波器精确的量测变量。此时,伪距加速度的可观性使得积分滤波器可以快速收敛。另外,如果电离层传播时延以 TEC (total electron content) 的形式在导

航预滤波器中进行精确建模,还可进一步提高系统精度。

2 不同组合模式性能比较与分析

下面主要从抗干扰能力、精度和快速性方面 SINS/GPS 的各种紧组合模式性能进行比较。

(1) Tightly coupled 组合除了具有 SINS/GPS Loosely coupled 组合所具有的优点外,由于采用 GPS 输出的基本观测量信息(伪距、多普勒频移、伪距率等),克服了松散组合方式中量信息的相关性问题,提高了组合系统的导航精度。因而它还可以提供比松散组合更高的导航精度;然而,由于在这种组合模式中没有利用组合导航的信息来辅助 GPS,因而其适用范围与松散组合相同。

(2) 采用 Ultra-tightly coupled 组合模式,可以利用 GPS 定位信息对 SINS 进行辅助,用以校正惯导系统,控制其误差随时间的积累,大大提高导航的精度。同时,用 SINS 信息来辅助 GPS 信号跟踪环路,可基本上消除由载体机动所引起的跟踪误差,因而组合中的 GPS 接收机可以采用很窄的环路带宽,从而提高接收机对噪声或干扰的容限,使接收机能够在恶劣的信号环境中快速捕获 GPS 信号。即使当 GPS 接收机导航解受到卫星几何结构、信号强度变化和天线屏蔽所产生的短期中断影响时,惯导数据同样可提供“平滑”和精确的导航解。

此外,当 GPS 信号受到高强度干扰,或当卫星系统接收机出现故障时, SINS 系统可以独立地进行导航定位。当 GPS 信号条件显著改善到允许跟踪时, SINS 可以向 GPS 接收机提供有关的初始位置、速度等信息,以供在迅速重新获取 GPS 码和载波时使用。SINS 系统信号也可用来辅助 GPS 接收机的天线对准 GPS 卫星,从而减小了干扰对系统的影响。GPS 的测量会产生 0.1~0.4s 的时间延迟,这与可用卫星的多少和串行通讯波特率的差异不同而不同。时延限制了 GPS 的实时性和高动态性能。而 SINS 可以实时输出而没有滞后,因此,通过同步结合 GPS 和 SINS 的测量信息就可得到没有滞后的实时输出。

(3) Deeply coupled 组合模式是一种新型的 SINS/GPS 组合模式,它的优势在于在强干扰或者面对有意/无意干扰时有更高的鲁棒性、跟踪能力和导航精度。传统的跟踪环路各自独立工作、易于失锁;而 Deeply coupled 组合方式基于矢量跟踪方式,可以充分利用 GPS 信号跟踪与导航状态解算之间的内在耦合关系,实现强信号通道对弱信号通道的辅助。同时,矢量跟踪技术能够降低信号噪声,使之不容易进入非线性区,从而提高了 GPS 接收机对弱信号的跟踪性能。当某颗卫星的信号由于干扰而无法检测时,其它卫星的信号仍然与相应的本地信号进行相关运算。因此,导航信息的更新并不会打断;当某个卫星的信号完全被阻塞干扰时,得到的量测值将产

生一个很大的变化,但可以通过相应的预滤波量测互协方差矩阵采用去权重的方法减小其影响。此外,Deeply coupled 模式的跟踪环路滤波器带宽可以适应滤波器所建模的任何对象,提高了跟踪环路的抗干扰能力。Deeply coupled 组合模式的另一个特点是对 Kalman 预滤波器没有严格的要求,然而传统的跟踪环对实时性要求较高。Kalman 预滤波器可以在一个主循环内接收所有的 I 、 Q 采样数据,并在下一个主循环时间内进行处理,因此可以采用更高级的处理算法。但是,在 SINS/GPS Deeply 组合模式中,传统的跟踪环路被最优滤波算法来替代,使接收机内部变化很大,实现较为复杂。

3 结束语

在 SINS/GPS 组合系统的各紧组合模式中, SINS/GPS Tightly coupled 组合模式将 GPS 作为一个单独系统, GPS 跟踪环路采用传统的二阶锁相环。由于弹载接收机的高动态影响,卫星与接收机间产生较大径向相对速度,从而引起接收机接收到的载波信号及伪码存在较大的多普勒频移,这就要求 GPS 跟踪环路采用大带宽,而大带宽使系统抗干扰能力较弱。因此,将 Tightly coupled 组合模式应用于高动态环境下,其可靠性较低,不能满足高精度、高可靠性的导航要求; Ultra-tightly 组合模式及 Deeply coupled 组合模式中利用 SINS 的速度信息辅助 GPS 的跟踪环路,使环路跟踪带宽大大增大;同时又使跟踪环路中滤波器的滤波带宽与未引入 SINS 速率辅助时相比减小了许多倍,从而更有效发挥滤波器滤除干扰噪声的功能,提高了跟踪环路抗干扰能力。但是, Deeply coupled 组合模式中 GPS 接收机的跟踪环路采用矢量跟踪模式,并由组合导航滤波器实现跟踪环路闭合,使接收机内部变化很大,实现起来较为复杂。因此,工程应用时应根据具体应用条件及应用环境,选择适当 SINS/GPS 组合模式。

参考文献

[1] Li W B, Liu S J, Zhou C H, et al. High dynamic carrier tracking using kalman filter aided phase-lock loop. IEEE, 1-4244-1312-5/07, 2007:673-676

[2] Diesel J W, Lu S. GPS/IRS AIME: Calculation of Thresholds and Protection Radius Using Chi-Square Methods. Proceedings of ION-NTM, Palm Springs, CA, Sep.1995:1959-1964.

[3] Mats B. Integrated GPS/inertial fault detection availability. Navigation, 1996,43(2): 339-358.

[4] 安东,崔中兴. 组合 INS/GPS 系统设计方法及其工程实现. 航空电子技术, 1997(2):8-22.

[5] 陈家斌,袁信. 伪距解除相关法在 GPS/SINS 紧组合系统中的应用研究. 航空学报, 1995, 16(6):707-710.

[6] 安东,任思聪,郑涛. GPS 的码跟踪误差检测器与伪距测量的预处理. 西北工业大学学报, 1994, 12(3):402-406.

[7] 高翔,刘兴堂. 超精密组合下 GPS/INS 跟踪回路的结构及性能分析. 战术导弹技术, 2007, 1(1): 67-70.

[8] 谢佳. 高精度捷联惯性 /GPS/ 图像匹配复合导航技术研究[D]. 北京,北京航空航天大学,2009.

[9] Alban S, Akos D, Rock S, et al. Performance Analysis and Architectures for INS-Aided GPS tracking loops. Institute of Navigation-NTM, Anaheim, CA,22-24 Jan.,2003: 611-622.

[10] Li D, Wang J L. Performance analysis of the ultra-tight GPS/INS integration based on an improved kalman filter design for tracking loops//International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium 2006. Australia, 2006.

[11] Beser J, Alexander S, Crane R, et al. A Low-Cost Guidance/Navigation Unit Integrating a SAASM-Based GPS and MEMS IMU in a Deeply Coupled Mechanization// Proceedings of the ION-GPS 2002. Portland, 2002:545 - 555.

[12] Abbott A S, Lillo W E. GPS and inertial measuring unit ultratight coupling method: US 6516021B1.2003-02-04. (责编 三丰)

(上接第 69 页)

于湿热环境中时,环境的变化会使连接结构发生膨胀或者收缩,会影响连接结构的钉孔间隙,从而会对钉载分配产生不可忽视的影响。复合材料多钉连接钉载分配中湿热效应的影响还有待深入研究。

(2) 通过采用调整钉孔间隙的方法,可以使多钉连接结构承受静载荷的能力大幅提高,但是钉孔间隙的变化会使钉与孔之间接触面积也发生变化,这种配合方式对疲劳性能的影响尚未可知。

(3) 在数值模拟中通过调整钉孔间隙可以提高连接强度,但是在工程实际中由于制造与加工工艺的限制,没有办法准确控制每个钉与孔之间的间隙,因此,在现有工艺水平下只能对工程实际给出方向性指导,不能使各钉载荷完全均匀。

参考文献

[1] McCarthy M A, Lawlor V P, Stanley W F, et al. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints. Compos Sci Technol, 2002(62):1415-1431.

[2] 刘兴科,李亚智,刘向东,等. 金属和复合材料多钉连接钉载分配研究. 航空工程进展, 2011, 2(2):193-198.

[3] McCarthy M A, McCarthy C T, Lawlor V P, et al. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I—model development and validation. Composite Structures, 2005(71):140-158.

[4] McCarthy C T, McCarthy M A. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part II—effects of bolt-hole clearance. Composite Structures, 2005(71):159-175.

[5] Gray P J, McCarthy C T. A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints. Composites: Part B, 2010, 41:317-325.

[6] McCarthy M A, McCarthy C T, Padhi G S. A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints. Composite Structures, 2006(73): 78-87.

(责编 小城)