

GPS/INS 组合导航系统时间同步方法研究

肖进丽, 潘正风, 黄声享

(武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

Time Synchronization Method of GPS/INS Integrated Navigation System

XIAO Jin-li, PAN Zheng-feng, HUANG Sheng-xiang

摘要: 在设计和实现 GPS/INS 组合导航系统时, 各子系统的时间同步是最关键的问题。首先对 GPS/INS 组合导航系统的时间同步问题作基本描述, 然后在简要分析基于 GPS 接收机的 1 pps 脉冲信号同步采样技术的基础上, 提出另外一种基于 GPS 和INS 的 1 pps 脉冲信号的时间比对同步方法, 这种方法能较好地解决 GPS 接收机由于失锁引起的 1 pps 信号抖动, 将晶体振荡器的短期稳定性和 GPS 时间的长期稳定度结合起来, 使各子系统数据在时间上能准确同步。

关键词: GPS/INS; 组合导航; 时间同步

一、引言

随着科学技术的迅速发展, 目前广泛应用于航空、航天、航海和地面载体的导航系统多种多样, 但是它们都有各自的优缺点。如果能以适当的方法将两种或几种导航系统组合起来使其优势互补, 成为一个组合导航系统, 必定可以提高系统的整体导航精度及导航性能。GPS/INS 组合导航系统就是一种总体性能要远远优于其独立子系统性能的系统, 因为它既保持了INS(惯性导航系统) 的自主性、隐蔽性及信息全面、频带宽等特有优点, 又克服了其导航误差随时间累积的缺点, 特别是当运载体在高动态环境下, 如果其上装备有 GPS/INS 组合导航系统, 它也能获得较高的导航定位精度, 所以, GPS/INS 组合导航系统已成为目前最为理想的导航系统^[1]。

然而, 在设计和实现 GPS/INS 组合导航系统时, 要获得高精度的导航定位数据, 时间同步一般被认为是考虑的最关键的问题之一。这是因为 GPS 和INS 是相互独立发展起来的技术, 各自内部的时钟频率标准不同, 致使各自的数据更新频率也不同(一般情况下, GPS 接收机的数据更新频率为 1~10 Hz, INS 的数据更新频率则可达 100 Hz 以上), 并且 GPS 和INS 的频标稳定性和温度特性也存在一定差异, 以及 GPS 和INS 的数据经通信、计算以及 A/D 转换后会有时延。

本文首先对 GPS/INS 组合导航系统的时间同步问题作基本的描述, 然后在简要分析基于 GPS 接收机的 1 pps 脉冲信号的同步采样技术的基础上, 提

出另外一种基于 GPS 和INS 的 1 pps 脉冲信号的时间比对同步方法, 这种新的同步方法能较好地解决 GPS 接收机由于失锁引起的 1 pps 信号抖动, 将晶体振荡器的短期稳定性和 GPS 时间的长期稳定度结合起来, 使组合系统获得高的导航定位精度。

二、时间同步问题基本描述

图1 所示的是一个典型的 GPS/INS 松散组合导航系统, 它由 GPS 接收机、INS 以及 Kalman 滤波组合导航平台等三个子系统构成。

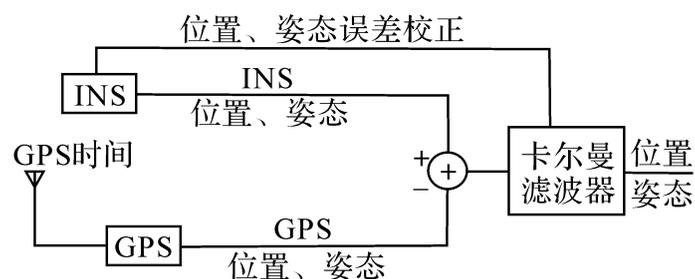


图1 GPS/INS 松散组合导航系统

GPS 接收机输出两种时间信号: 一是同步脉冲信号, 包括间隔为 1 s 的秒脉冲信号 1 pps(1 pulse per second), 它与 UTC 的同步误差不超过 1 μs, 以及 1 ppm(1 pulse per minute) 和 1 pph(1 pulse per hour); 二是时间码信号, 通过 RS232 接口输出与 1 pps 脉冲前沿对应的国际标准时间和日期, 即 1 pps 的时间标记^[2]。由于 GPS 和INS 的数据在送往导航 Kalman 滤波器进行滤波估计前, 必须使它们在同一时刻配准, 但是因为INS 没有固定的时间参照系(时间基准), 所以 GPS 和INS 在同一时间点进行数据配准前, INS 的数据也要转化到 GPS 时间参考

体系中;此外,在GPS/INS组合导航系统中,一般情况下GPS和INS的数据都是通过RS-232(EIA-232)或RS-422(EIA-422)的串口进行通信的,因而时间延迟不可避免^[3];此外,Kalman滤波这样的算法其运算任务比较大,进行滤波估计的数据都是按一定的时序进行排队等候再送往导航滤波器,因而GPS的数据相对于INS的数据在运算时会有滞后,所以,这些因素都会对系统的导航定位精度造成很大的影响。以下给出一个松散耦合GPS/INS组合导航系统的动态模型为^[4]

$$\dot{e} = Ae + \omega$$

$$Y = He + v$$

假设GPS的数据相对于INS的数据的时间同步偏差为 t , 则受时间同步偏差 t 影响的量测方程为

$$Y(t) = H[X_{GPS}(t) - X_{INS}(t + t)] + v$$

在 t 时刻作泰勒级数展开, 则量测方程可表达为

$$Y(t) = He + v +$$

其中, $= X_{INS}(t) t$, 可视为时间同步偏差 t 对系统引入的量测噪音, 所以GPS/INS组合导航系统的时间同步所要解决的问题是: 如何将来自GPS和INS两个子系统的导航数据进行时间配准后来获取两路信号在同一数据融合时间点上的同步量测数据, 如图2所示^[5]。

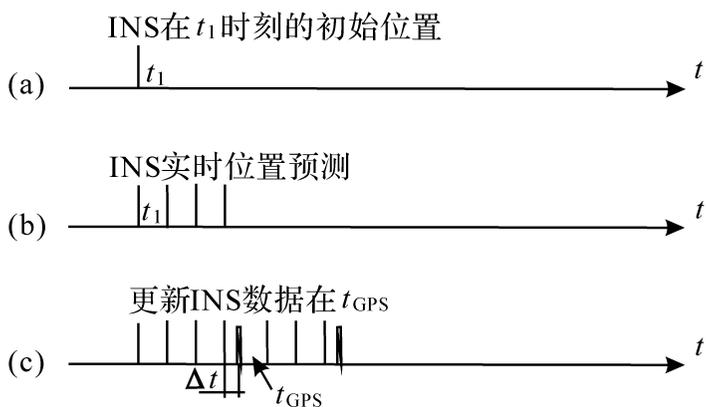


图2 GPS和INS的数据同步示意图

三、基于GPS接收机的1 pps脉冲信号的同步采样技术

为了获得高的测量精度, 多通道数据同步采样的方法通常为一般的多传感器测量系统采用。对GPS/INS组合导航系统而言, 采用基于GPS接收机的1 pps脉冲的多通道数据同步采样技术也是一种很好的解决时间同步问题的方法, 其原理是: 把GPS接收机输出的1 pps作为INS采样控制电路内部定时器的触发脉冲, 通过硬件逻辑倍频产生相应频率的同步采样脉冲输出, 以获得同一时刻INS的三个陀螺仪和三个加速度仪的输出信息; 同时GPS

接收机输出的导航定位数据时刻(UTC时间)与GPS接收机的1 pps脉冲前沿是对齐的, 所以就可以实现GPS和INS数据在同一时刻对准^[6]。图3所示的是基于GPS接收机的1 pps脉冲的INS数据采样电路方框图。

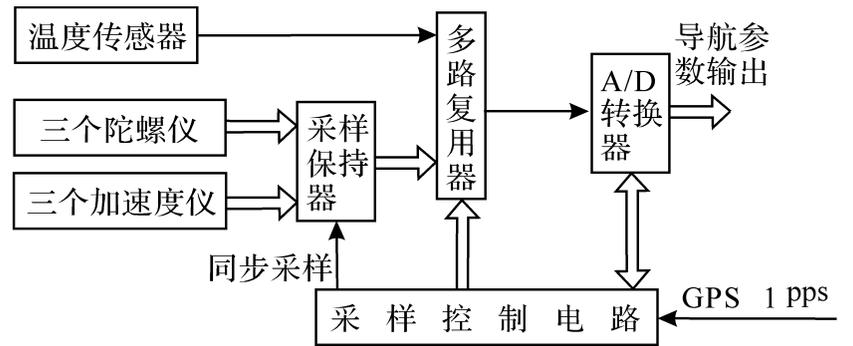


图3 基于GPS接收机的1 pps脉冲的INS数据采样电路方框图

虽然这种方法可获得很高的GPS和INS同步精度, 其最大同步误差不超过 $1 \mu s$, 但是当GPS接收机失锁时, 其1 pps信号的精度随着时间的推移越来越差, GPS和INS同步精度也会越来越差。

四、基于GPS和INS的1 PPS脉冲信号时间比对同步方法

我们知道GPS和INS各自采用的频率标准是独立的, 并且GPS输出的秒脉冲信号1 pps是由接收机内部时钟频率标准源生成的, 为了讨论方便, 这里不妨假定INS频标产生的时间脉冲周期为 $T_{1 \text{ pps}}$, GPS的1 pps脉冲周期为 $T_{G1 \text{ pps}}$ 。若以GPS的1 pps作为时间基准, 由于GPS和INS各自1 pps脉冲的传输和处理延时大致相同, 则捕捉到INS数据信号的时刻 t_{INS} 可近似表达为

$$t_{INS} = t + (T_{1 \text{ pps}} - T_{G1 \text{ pps}})$$

式中, t 为GPS数据信号捕捉时刻, 因此在进行GPS/INS组合导航系统设计时, 可采用基于GPS和INS时频的时间比对法测得GPS和INS的1 pps信号的时差 t_{INS} , 其原理如图4所示^[7]。

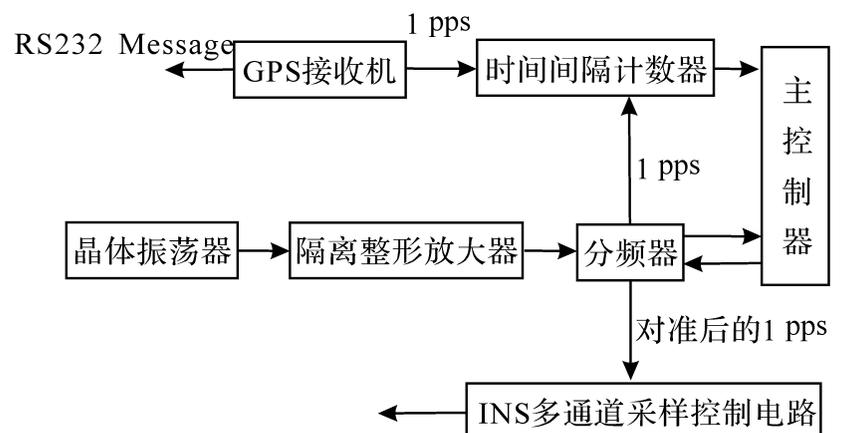


图4 基于GPS和INS时频的时间比对法原理框图

本方法以石英晶体振荡器作为INS的数据采集控制时钟^[8]。GPS接收机接收来自卫星的射频信号,经解扩、解码等处理及计算,将导航信息和1 pps输出,GPS的1 pps信号作为时间间隔计数器的开门信号启动计数器;晶体振荡器经隔离整形后输出脉冲信号,移相/分频器将隔离整形放大器的输出信号进行分频,得到晶体振荡器1 pps的秒脉冲信号输出,作为时间间隔计数器的关门信号;同时,该秒脉冲信号又接入主控制器的中断申请端,作为时间间隔计数器一次采样结束标志信号。当GPS接收机的1 pps脉冲信号到来时,计数器打开并开始计数;当晶振的1 pps信号到来时,计数器停止计数并向主控制器申请采数中断,CPU响应中断后,通过数据线采集计数值并将计数器清零,所采的计数值即是GPS和晶振的1 pps信号时刻差;主控制器再根据该时刻差,产生控制信号,控制移相/分频器产生相移,以使石英晶振与GPS接收机的1 pps达到时间同步;最后,INS多通道数据采集电路以移相/分频器输出的经过了同步的1 pps作为采样脉冲,实现INS的六个传感器进行同步采样。图5为GPS和INS的1 pps信号进行时间比对的中断服务流程图^[9]。

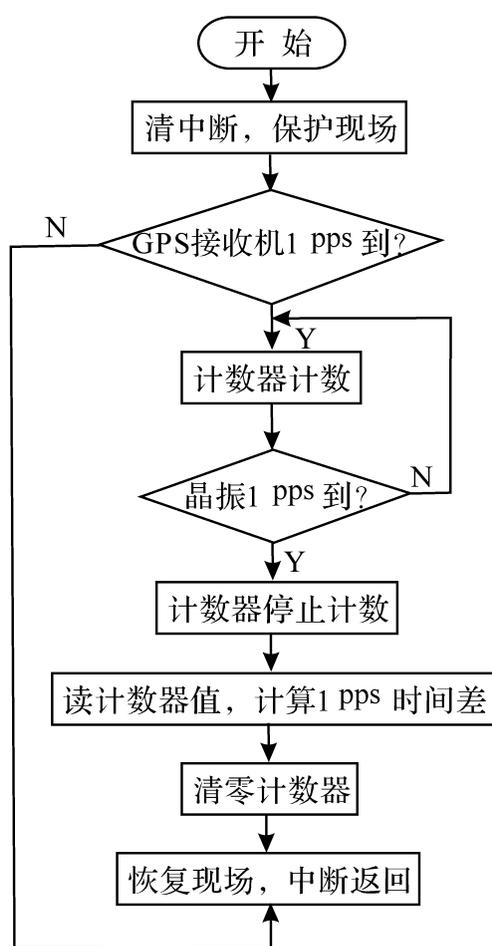


图5 GPS和INS的1 pps信号进行时间比对的中断服务流程图

五、分析

GPS/INS组合导航系统在利用基于GPS和

INS的1 pps脉冲信号的时间比对法进行时间同步设计时,要获得高的导航定位精度,时间间隔计数器的选用很重要。一般来讲,时间间隔计数器应选用高分辨率的,但是高分辨率的时间间隔计数器通常都很昂贵,所以,如果考虑设计成本、选用低分辨率的时间间隔计数器,则要结合软件的方法,也就是说,通过再次进行软件处理,如异值点剔除、滤波估计以及参数计算等手段来克服GPS和晶振的1 pps信号的不稳定性以及量测噪声的影响,获得高精度的1 pps信号时间差。异值点剔除可采用设定门限值的方法,当计数器值超过设定门限时,将其剔除。作为一种最优估计理论,Kalman滤波对多维、非平稳的随机过程估计效果显著,所以,利用它对GPS和晶振的1 pps信号时间差进行估计最为理想。假设k时刻测得的1 pps时间差为 x_k ,连续两次测量的时间间隔为1 s,记k时刻的状态向量为 X_k ,则有

$$X_k = [x_k]$$

状态方程为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1}$$

量测方程为

$$Y_k = H_k X_k + V_k$$

其中, $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的一步转移矩阵; W_{k-1} 为系统激励噪声序列; H_k 为量测阵; V_k 为量测噪声序列。这里 $\Phi_{k,k-1} = [1]$, $H_k = [1]$ 。

六、仿真与结论

本文采用Crossbow IMU700CA在高动态情况下就INS数据时间延迟对其定位精度的影响进行仿真(Crossbow IMU700CA的数据更新率 >100 Hz,动态精度为 $\pm 2.0^\circ$,陀螺稳定性为 $<20 \mu\text{hr}$),图6给出了在东向上的仿真结果(横坐标为延迟时间)。可以看出,在GPS/INS组合导航系统中,数据的时间延迟对其定姿定位精度的影响是很大的,所以,要获得高的导航定位精度,必须考虑系统的时间同步问题。本文针对GPS/INS组合导航系统的时间同步问题进行了研究,提出了一种基于GPS和INS的1 pps脉冲信号的时间比对同步方法并进行了深入的分析,实验证明,选用分辨率为 $0.1 \mu\text{s}$ 的时间间隔计数器并辅以Kalman滤波对1 pps时间差进行滤波估计,最终各子系统的时间同步误差不超过 $0.5 \mu\text{s}$,因此这种方法是可行的。