

基于捷联惯性导航系统姿态实时性的研究*

王建中

(重庆青年职业技术学院 人工智能学院, 重庆 400712)

摘要: 针对激光陀螺捷联惯性导航系统信号采集、姿态解算、数据输出实时性问题, 分析三轴激光陀螺仪和三轴加速度计传感器惯性组件 IMU、里程计、高度计、GPS/北斗等数据输入和输出。数据交换一般采用 RS-232 串行接口、CAN 总线接口, 难以满足传感器高速实时采样。因此, 提出一种采用 FPGA 双口 RAM+双 DSP 高速数据存取方式, 按照时钟同步周期分别实时输出导航数据, 可有效解决数据发送、处理、传输到各设备之间的瓶颈问题, 最高输出频姿态率可达 100 kHz~2 000 kHz, 实现捷联导航系统姿态状态快速反应能力。实验和仿真表明, 该方法可以大大提高系统的周期解算能力, 提高载体的机动性能。

关键词: 惯性测量单元; 激光陀螺; 加速度计; 采样频率; FPGA

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200459

中文引用格式: 王建中. 基于捷联惯性导航系统姿态实时性的研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 23-29.

英文引用格式: Wang Jianzhong. Research on real-time attitude of strapdown inertial navigation system[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 23-29.

Research on real-time attitude of strapdown inertial navigation system

Wang Jianzhong

(Artificial Intelligence Department, Chongqing Youth Vocational & Technical College, Chongqing 400712, China)

Abstract: Aiming at the real-time problems of signal acquisition, attitude calculation and data output of laser gyro strapdown inertial navigation system, the data input and output of IMU, odometer, altimeter and GPS/BeiDou are analyzed. RS-232 serial interface and CAN bus interface are generally used for data exchange, which are difficult to meet the high-speed real-time sampling of sensors. The paper puts forward a high-speed data access mode of FPGA dual port RAM+dual DSP to output navigation data in real time according to the clock synchronization cycle, which can effectively solve the bottleneck problem of data transmission, processing and transmission to various devices. The highest output frequency attitude rate can reach 100 kHz~2 000 kHz, and realize the rapid response ability of attitude state of strapdown navigation system. Experiments and simulations show that this method can greatly improve the cycle calculation ability of the system and the maneuverability of the carrier.

Key words: inertial measurement unit; laser gyro; accelerometer; sampling frequency; FPGA

0 引言

捷联惯性导航系统是一种隐蔽性好, 工作环境不易受外界干扰和影响的导航系统, 不易受气象条件的限制, 具有自主性、隐蔽性、实时性和全天候等优点^[1], 能提供载体精确的位置坐标、姿态、速度和行驶里程等信息。系统由三轴陀螺仪和三轴加速度计构成的惯性测量单元(IMU)、里程计、高度计、北斗/GPS 等组成^[2], 其数据的采集周期、输入、输出、解算结果和应用非常复杂, 实时性难以保证, 不能快速获取系统的运动状态数据。

捷联惯性导航系统数据收发一般采用多组件串行接口输入输出数据传输方法 RS-232, 最高速度能达到

115 200 b/s。CAN 总线速率最高传输速率可达 1 Mb/s。数据接收时使用空闲中断触发接收, 待解算完成后发送查询线路状态空闲后发送数据。按照以上两种传统方式, 很难快速解算和输出姿态实时数据, 更不能接收其他多个传感器数据、采集输入数据和输出数据^[3]。因此, 本文利用一种时钟同步信号与车载系统时钟同步, 从而确保捷联惯性导航系统姿态和车载系统时钟同步, 能够减少捷联惯性导航系统各组件数据传输的时间; 输入输出采用 FPGA 双口 RAM+双 DSP 高速数据存取方式^[4], 解决捷联惯性导航系统收发数据高速实时性困难, 提高姿态系统的动态适应能力。

* 基金项目: 重庆市高等教育教学改革研究项目(183263); (绩效管理)课程思政教学改革探索(193472); 大数据背景下大学生思政教育中行为数据应用研究(19SKSZ089); 智能导航创新团队(CQY2018TD05)

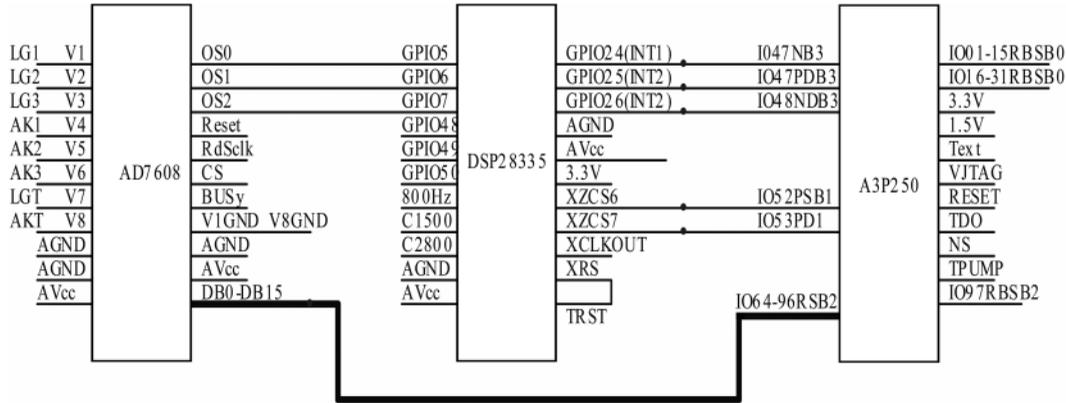


图2 信号处理原理图

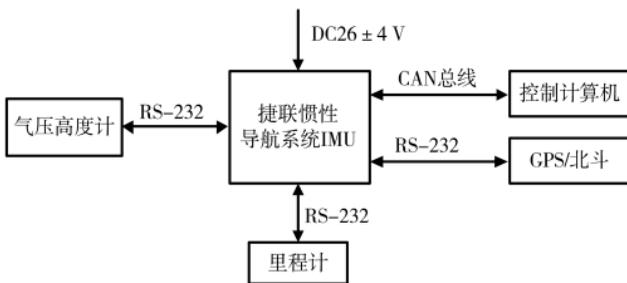


图3 系统组件数据交换

程计、高度计、北斗/GPS,一路CAN总线输出传感器检测数据,另一路输出三轴陀螺仪角速度,定时器输出2 000 Hz高低电平,触发中断并保持与导航解算信号处理器 TMS320C6747 同步。中断 1 频率与系统采样频率 2 000 Hz 一致,确保读取 AD7608 三轴陀螺仪和三轴加速度数据在同一时刻;中断 2 读取 Actel 芯片组 A3P250 姿态航向角、横滚角、俯仰角数据的频率为 400 Hz;中断 3 读取位置、速度、里程数据的频率为 10 Hz。导航数据框图如图 4 所示。

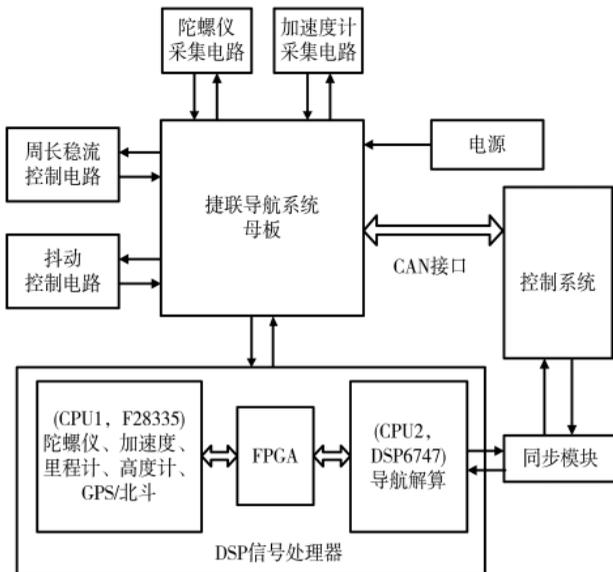


图4 导航数据框图

2 传感器采样及分析

2.1 陀螺仪信号处理分析

捷联惯性导航系统核心组件传感器采用激光陀螺仪,1911年萨格纳克(Sagnac Effect)发明了一种可以旋转的环形干涉仪^[5],信号处理电路通过对传感器信号 SIN、COS 信号输出,实现鉴相、倍频、计数、同步控制等设计,从而测量谐振腔内正、反两束激光的频差来测量载体相对于惯性空间的转角,如式(1)所示:

$$F=4A\omega/L\lambda \quad (1)$$

其中: F 为两束激光频差, A 为激光环路所包围的面积, ω 为外界输入角速度, L 为腔长, λ 为光波长。

正、反两束激光波频率差周期:

$$N=\int_0^t f dt = \frac{4A}{\lambda L} \int_0^t \Omega dt = \frac{4A}{\lambda L} \theta \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\lambda N}{4A} \quad (3)$$

其中: θ 为一个周期 T 内的转角, N 为时间 T 内光电探测器探测到的干涉条纹数。令 K 为激光陀螺的刻度因子:

$$K = \frac{\lambda}{4A} \quad (4)$$

激光陀螺腔体通过超声振动研磨和复合抛光技术,从而达到腔体内表面高精度加工,光源投射到阴极上的射线有微小的离散角 ε ,同时形成干涉图像:

$$I=I_0[1+\cos(2\pi\varepsilon\chi/\lambda_n+f_0\varphi_0)] \quad (5)$$

其中: φ_0 表示固定相移, $\varepsilon=2n_1\theta$, n_1 为棱镜折射率, θ 为棱镜顶角偏离 90° 的误差角。当 $F_0=0$ 时,干涉图像不变,当环形激光器旋转时,干涉图像在阴极上移动,其速度取决于拍频。采用尺寸远小于干涉条纹间距的两支光电敏感单元,其距离相距 $\lambda/4$,两支光电敏感单元输出相位差为 90° 的拍频正余弦信号,如图5所示。

在不考虑零偏的情况下,机抖激光陀螺的转动角速率 Ω_r ,包括外界输入角速率 Ω_m 与抖动 Ω_d ,因此可以用公式表示为:

$$\Omega_r = \Omega_m + \Omega_d \sin(\omega_d t) \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)可得:

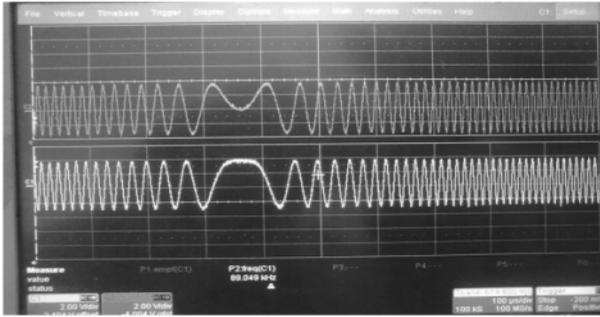


图5 输出 sin、cos 信号波形图

$$N = k \int_0^t \Omega_m dt + k \int_0^t \Omega_d \sin(\omega_d t) dt \quad (7)$$

当 $t = \Delta T = 2\pi/\omega_d$ 时:

$$k \int_0^t \Omega_d \sin(\omega_d t) dt = 0 \quad (8)$$

因此,当取整周期时:

$$\Omega_i = \Omega_m \quad (9)$$

捷联惯性导航系统通常的角速率输入频率范围在 0~100 Hz, 激光陀螺抖动频率一般在 400 Hz 左右, 三个陀螺仪固连在一起容易产生共振, 因此三个陀螺仪的要尽量避免同一频段。工程应用上一般设计数字低通滤波器, 可以有效去除抖动偏频信号, 得到激光陀螺的待测信号, 同时还能消除其他的高频噪声, 提高了激光陀螺的检测精度。为了提高系统实时性, 同时考虑信号采集板 CPU、导航解算 CPU 等硬件特性, 数字采样的频率根据采样定理至少要大于三个激光陀螺仪最大抖动频率的 2 倍, 因此, 本方案系统的采样频率 2 kHz 能实现高速采样。

2.2 周长稳流控制分析

激光陀螺的激光腔长必须保持稳定, 才能使谐振腔固有频率稳定, 因受到温度漂移和结构刚度的不均匀的影响, 将会改变激光腔长, 通过设计稳频控制器达到系统的稳频。稳频控制器的设计采用单片机控制 D/A 转换器 MAX526 以一定步长(如 20 mV), 产生 0~5 V 连续电压; 0~5 V 输入电压经高压放大器放大 40 倍后, 成为 0~200 V 连续可调电压加在压电晶体上。在压电晶体调节激光陀螺腔长连续变化的同时, 单片机控制 12 位 A/D 转换器获取相应激光陀螺输出光强幅值, 然后与经过扫描系统得到的光强输出最大值进行比较, 再将控制信号经 D/A 驱动调节激光陀螺的腔长变化, 从而使激光陀

螺的光强输出达到最大值, 进而达到稳频^[6]。

2.3 抖动控制分析

为了克服激光陀螺的闭锁死区, 对激光陀螺施加抖动控制。激光陀螺存在自锁现象, 当外界角速度值未超过一定的阈值时, 输出将为零。所以采用抖动偏频的方式消除闭锁效应, 但同时相应地会在陀螺输出脉冲中带入抖动噪声引起的误差, 必须采用抖动调制解调方法扣除抖动数据。由于激光陀螺仪抖动参考信号的频率是相对固定的, 抖动频率一般比采样频率低, 因此, 采用比三个陀螺仪抖动频率高 2 倍以上采样频率, 本文采样频率为 2 000 kHz。再对相应的采样数据进行数字滤波处理, 消除机械抖动对三个陀螺仪的影响, 同时还可以抑制噪声干扰。

2.4 加速度计信号处理分析

加速度计也是捷联惯性导航核心传感器, 高精度导航一般采用石英挠性加速度计, 具有结构简单、体积小、精度高、温度范围宽等优点^[7], 组成原理如图 6 所示。

加速度计一般为电压型和电流型, 本文采用电压型。当运动过程中有加速度输入时, 摆锤组件产生摆力矩 M_g , 围绕输出轴转动。

$$M_g = maL \quad (10)$$

式中: L 为摆锤长度。

差动电容传感器产生电容差:

$$\nabla_c = k_p \theta \quad (11)$$

其中: k_p 为零位附近差动电容传感器的传递系数, θ 为摆组件绕输出轴相对壳体的偏转角。

差动电容检测器转换成电流信号 i :

$$i = k_a \nabla_c \quad (12)$$

输出力矩与对应的电流成比例:

$$M_i = k_i i \quad (13)$$

其中: k_i 为常数, 是石英挠性加速度计中力矩器产生的力矩系数。

在力矩平衡状态下, $M_i = M_g$, 则:

$$I = (ml/k_i) a_i \quad (14)$$

式中: ml/k_i 为电流标度因数, 当加速度计为 1 g 时的单位。

石英挠性加速度计传感器输出通过积分电阻和积分电容, 每个周期从 AD 中读取积分电容电压值, 通过数据转换即可获得加速度值。石英加速度计积分电路如

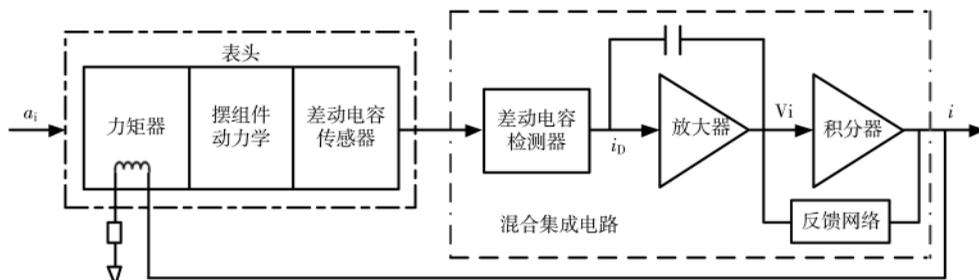


图6 加速度计系统组成框图

图 7 所示。

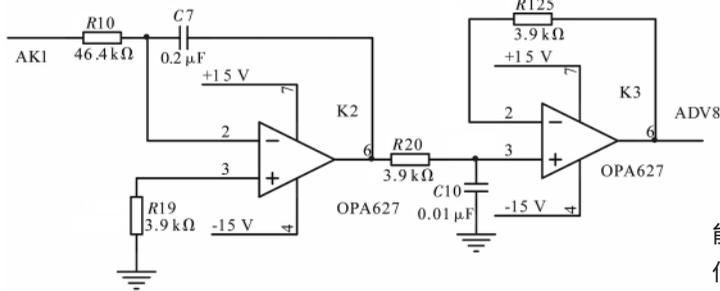


图 7 石英加速度计积分电路

加速度计固定在振动平台上,保持静止状态,加速度计输出电压幅值为 5 V。设置参数为频率 30 Hz,强度 20%,保持原位置震动,输出信号如图 8 所示。

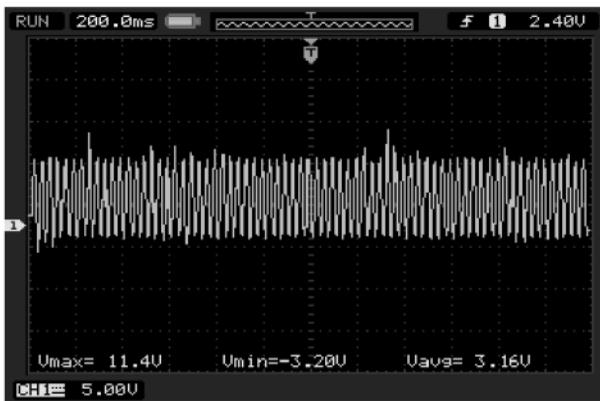


图 8 加速度计系统组成框图

3 姿态数据延时及分析

3.1 滤波器延时分析

为了减少激光陀螺抖动带来的影响,在保证导航系

统实时性和精度的要求下,姿态数据设置滤波器参数阈值。数字滤波器分为有限脉冲响应 FIR 和无限脉冲响应 IIR 两类^[8]。本文采用 FIR 滤波器,优点是相位线性分布且固定,幅度可变;其单位抽样响应有限长,滤波器性能相对稳定;信号采用快速傅里叶变换(FFT)算法滤波,可提高运算精度。缺点:数字滤波和傅里叶变换等计算工作量非常大,对系统运算能力和硬件条件要求较高,滤波易导致一定的姿态变化延迟。

FIR 滤波器采用 46 阶,滤波器低通带宽为 200 Hz,截止频率为 300 Hz。通过 MATLAB 仿真可以清楚看到滤波器的性能,如图 9 和图 10 所示。

3.2 数据传输时延分析

系统接到时统模块同步信号指令,立即发送姿态数据给时统模块,此时发送的数据为系统已经计算完成的姿态数据,传输给时统模块的姿态存在延时滞后。同步信号根据应用系统设置,本文设置频率为 100 Hz,同步信号与姿态数据更新频率一致。

激光捷联导航系统姿态输出频率 400 Hz,即 2.5 ms,在进行硬件采样积分过程中,在每间隔 2.5 ms 时刻完成积分,延时忽略不计,只考虑导航解算和姿态数据传输延迟时间。

3.2.1 采样周期与同步信号一致

激光陀螺捷联惯性导航系统接收到同步信号开始采样,采样时间为 2.5 ms,当接收到下一个同步信号时,定位定向系统重新开始采样,同时进行导航解算,并发送上一次解算的姿态给时统模块。这种情况下,传输给时统模块的姿态存在一个固定延时为 $T=2\text{ ms}+\Delta t$,即系统的采样周期(2.5 ms)加上系统传输给时统模块的时间

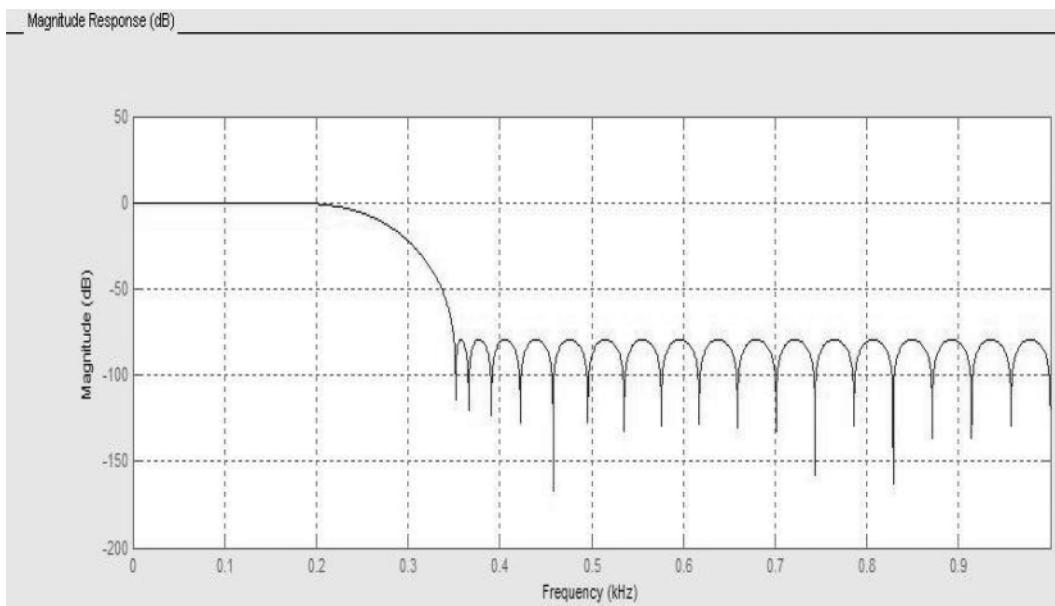


图 9 幅频特性图

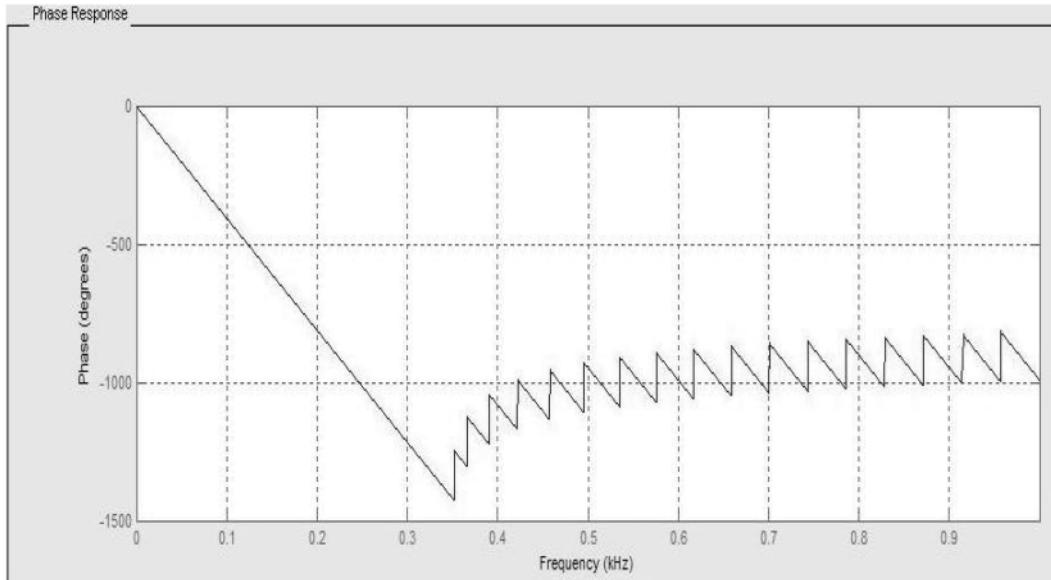


图 10 相频特性图

(为小量 Δt), 如图 11 所示。

3.2.2 采样周期与同步信号不一致

系统接收到同步信号时刻, 系统状态可能存在两种状态:

状态 1: 系统正在采样, 但未解算

同步信号在两次解算周期之间, 姿态延时包括解算时间(1 ms)、接收到的同步信号与解算之间的时间 t_1 ($0 < t_1 < 1.5$ ms) 和系统传输姿态给时统模块的时间 Δt (为一小量)。总的姿态延时时间为 $T = 1 \text{ ms} + t_1 + \Delta t$, 如图 12 所示。

状态 2: 系统正在采样, 同时正在进行上一周期的解算

系统接收到同步信号时, 正在进行解算, 此时传输给时统模块的姿态数据为上一周期解算完成后的姿态, 姿态延时包括解算采样时间(2.5 ms)、接收到的同步信号与当前周期开始采样的时间 t_2 ($0 < t_2 < 1$ ms) 和系统传输姿

态给时统模块的时间 Δt (为一小量)。总的姿态延时时间为 $2.5 \text{ ms} + t_2 + \Delta t$, 如图 13 所示。

4 结论

姿态实时性是惯性导航系统应用的难点, 本文针对捷联惯性导航系统三轴激光陀螺仪和三轴加速度计传感器惯性组件信号采集、姿态解算、数据输出实时性问题, 通过分析惯性导航组件 IMU、里程计、高度计、GPS/北斗等数据输入和输出, 分析 RS-232 串行接口、CAN 总线接口数据传输, 难以满足传感器高速实时采样和数据输入、输出等数据交换, 提出一种采用 FPGA 双口 RAM+双 DSP 高速数据存取方式, 可以根据系统应用设置时钟同步周期, 分别实现航向、横滚、俯仰、经度、纬度、高程等实时导航数据, 可有效解决数据发送、处理、传输到各设备之间的瓶颈问题, 最高输出频率可达 2 000 kHz, 提高系统的周期解算能力, 实现捷联导航系

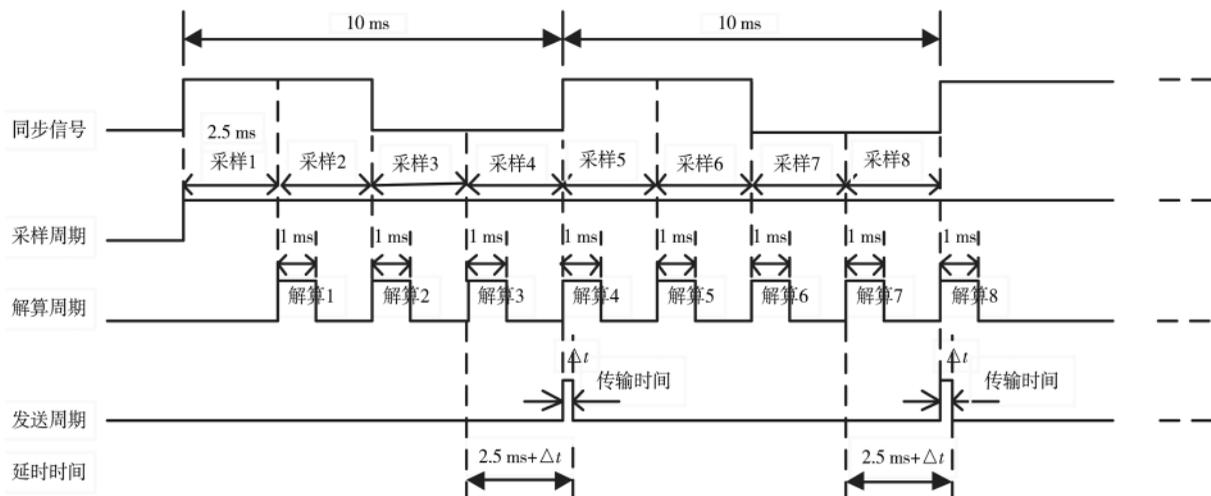


图 11 采样周期与同步信号一致

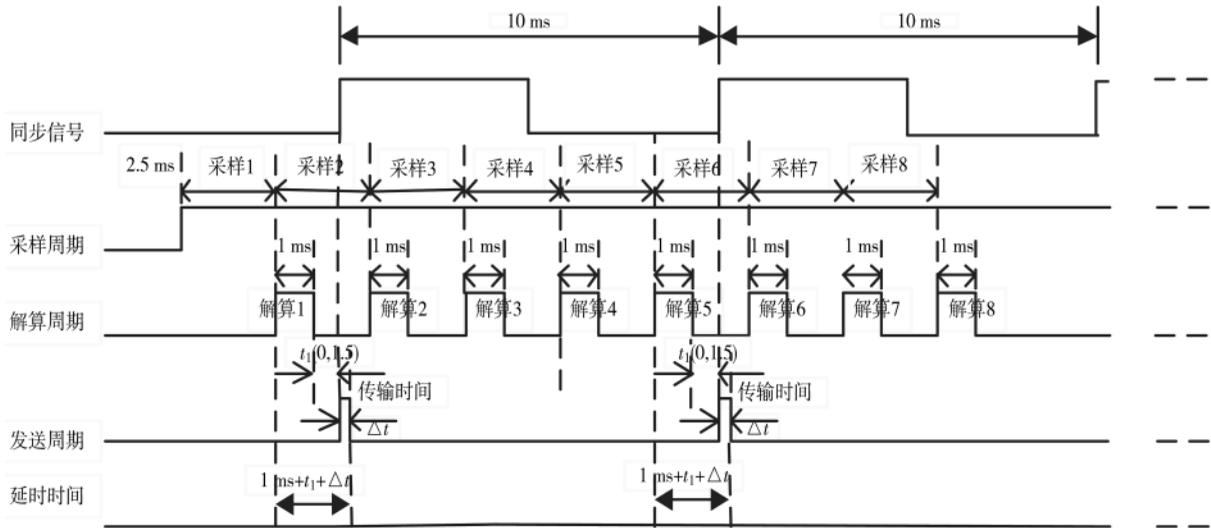


图 12 同步信号时刻解算周期外

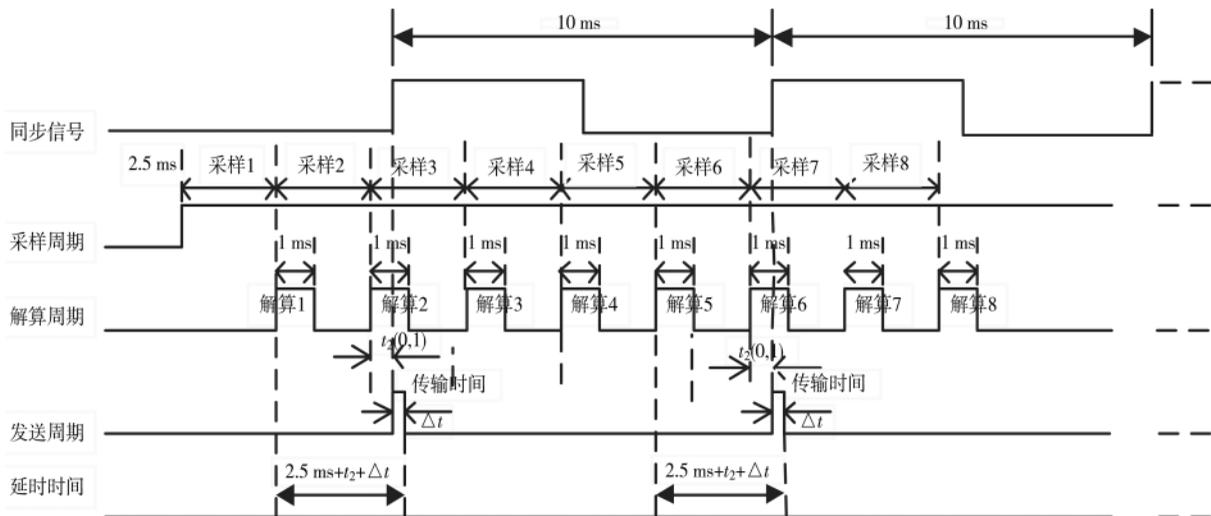


图 13 同步信号时刻解算周期内

统姿态状态快速反应能力。

参考文献

- [1] 袁保伦. 四频激光陀螺旋转式惯导系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007, 10.
- [2] 王建中. 激光陀螺捷联惯性导航系统 IMU 误差标定[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 40(3): 313-318.
- [3] 黄凤荣, 郭兰, 申钱法, 等. 晶振误差对长航时高精度捷联惯性导航系统的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 25-29.
- [4] 王建中, 杨璐. 高速实时系统数据采集与传输[J]. 计算机科学, 2016, 43(11A): 204-206.
- [5] 毛玉良. 激光陀螺捷联惯导系统误差辨识与修正技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [6] 陶渊博, 李四海, 鲁政. 一种棱镜式激光陀螺跳模特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 122-128.
- [7] 刘转. 基于石英挠性加速度计的导向钻井工具姿态动态

测量[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.9.

- [8] 杨云涛, 武文远, 吕海斌, 等. 基于激光陀螺自适应补偿的船体变形测量方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(2): 166-170.

(收稿日期: 2020-06-06)

作者简介:

王建中(1979-), 男, 教授, 高级工程师, 主要研究方向: 计算机信息技术、惯性导航。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所