

# MEMS IMU 辅助的高性能 GPS 接收机设计

唐康华, 吴美平, 胡小平

国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

## Design of MEMS IMU Aided High-performance GPS Receiver

TANG Kang-hua, WU Mei-ping, HU Xiao-ping

*Mechatronics and Automation School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

**Abstract:** Research and development continues to extend the capabilities and to increase the robustness of GPS receivers. In the high dynamic situation, the design of GPS receiver always involves the opposition between loop bandwidth for the noise and bandwidth for the dynamic performance. The acquisition and tracking loop of GPS receiver using MEMS IMU (MIMU) aided measurements was designed, according to the sample of MIMU aided GPS receiver. At the same time, in order to reduce GPS receiver to rely on the requirements of MIMU, the optimal bandwidth of the MIMU aided GPS receiver was designed. Using simulation and low dynamic vehicle tests, the designed algorithm was validated. The simulation and test results show that anti-jamming performance of MIMU aided GPS receiver has 13 dB improvement. On the dynamic condition, the accuracy of the designed GPS receiver is almost as same as that of commercial GPS receiver. And GPS receiver aided by MIMU can also provide the information of attitude.

**Key words:** GPS receiver; MIMU aiding; optimal loop bandwidth; acquisition and tracking

**摘要:**高性能稳健性的GPS卫星接收机仍然是当前研究和发展的热点。在高动态条件下,GNSS接收机设计总是涉及到跟踪动态性能所要求的环路带宽和噪声所要求的环路带宽一对矛盾体。以微惯性测量单元(MIMU)辅助的GPS接收机为实例,设计了MIMU辅助的GPS接收机搜索算法和跟踪算法,同时为减少GPS接收机对惯性器件的性能的依赖,设计了基于MIMU辅助的最优GPS接收机的环路带宽。通过仿真和车载试验对所设计的方法进行验证,仿真和试验结果表明,MIMU辅助的GPS接收机动态性能取决于MIMU的性能指标和环路的带宽,而抗干扰性能至少有13 dB的提高;跑车试验中,商用GPS接收机和研制的GPS接收机精度大体相当。同时系统还能够提供姿态角信息。

**关键词:**GPS接收机;MIMU辅助;最优环路带宽;搜索和跟踪

## 1 引言

高性能稳健性的GPS卫星接收机仍然是当前研究和发展的热点。近年来,为了进一步提高陆基发射武器动态性能和抗干扰能力,提高武器在恶劣的敌对环境中的生存能力。高动态、高抗干扰惯性辅助卫星接收机得到极大的发展。美国Draper实验室于2000年证明了GPS/IMU深组合系统比一般GPS接收机的抗干扰性能提高了15 dB,动态性能也得到极大的改善,并于2001

年申请了专利<sup>[1]</sup>。2005年7月18日,L-3 Communications, Interstate Electronics Corporation (IEC)发布新一代用于精确制导武器、导弹、无人轰炸机的FaSTAPT<sup>TM</sup>抗干扰技术和GPS/INS深组合系统<sup>[2]</sup>。但是国外的相关技术或产品对我国封锁或者人为降低可靠性,有关高动态、高性能的核心技术也难以得到,相应的技术必须自主开发。

通常把GPS用户的速度大于515 m/s和加速度大于5g的情况称为高动态。在高动态条件下,由于多普勒频率的影响,卫星信号容易失锁,

收稿日期:2006-11-06;修回日期:2007-06-21

作者简介:唐康华(1976-),男,湖南邵阳人,博士生,主要研究方向为GPS导航、组合导航技术。

E-mail:tt\_kanghua@hotmail.com

为了能够跟踪 GPS 卫星信号,接收机跟踪环路带宽必须设计充分,然而对于跟踪环路的噪声来说,带宽越窄则跟踪精度越高。显然动态性能所要求的环路带宽和噪声所要求的环路带宽是一对矛盾体<sup>[3,4]</sup>。因此为了提高测量精度,同时保证环路动态跟踪性能,必须采取其他手段。本文针对 GPS 信号的跟踪动态性能所要求的环路带宽和噪声所要求的环路带宽是一对矛盾体,提出了利用 MIMU 辅助的信息来提高 GPS 接收机性能,设计了 MIMU 辅助的 GPS 接收机搜索算法和跟踪算法,同时为了减少 GPS 接收机对惯性器件性能的依赖,设计了基于 MIMU 辅助的最优 GPS 接收机的环路带宽。最后用仿真和车载试验对所设计的算法进行了验证。

## 2 MIMU 辅助的卫星导航接收机

为了改善 GPS 接收机在高动态条件下或低信噪比条件下的性能,在 GPS 跟踪环路中引入 MIMU 辅助信息。MIMU 辅助的卫星接收机示意图如图 1 所示。

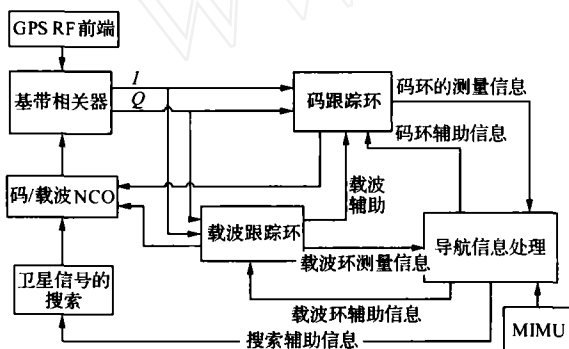


图 1 MIMU 辅助卫星接收机原理示意图

Fig. 1 Sketch of MIMU aided GPS receiver

其中,  $I, Q$  分别表示同相和正交信号, NCO 表示数控振荡器。图 1 包含 MIMU 辅助的卫星信号搜索、跟踪部分和导航信息处理部分,其中导航信息处理部分主要综合处理 MIMU 及 GPS 测量信息,得到导航解和 GPS 接收机环路的辅助信息。

在 MIMU 辅助的 GPS 接收机中,多普勒测量通过导航信息处理部分得到。载波信号的多普勒频率可表示为<sup>[5]</sup>

$$f_{\text{dopp}} = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{V}_{\text{RX}} - \mathbf{V}_s) \cdot \mathbf{I}_s \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为载波 L1 频点的波长,  $\mathbf{V}_{\text{RX}}$  为接收机天线的速度,  $\mathbf{V}_s$  为卫星的速度,  $\mathbf{I}_s$  为卫星到接收机单位视线矢量。方程(1)可以在地固参考坐标系下

计算,如地心地固坐标系或当地地理坐标系。

通常由载体引起的多普勒频移可以通过惯性传感器估算,多普勒频率估算的精度主要依赖于惯性传感器的质量。假定外部多普勒估计的误差主要来源于惯性器件的误差,对方程(1)求偏导得

$$\sigma_{\text{dopp}}^2 = \frac{\mathbf{I}_s \mathbf{E} (\delta \mathbf{V}_{\text{RX}} (\delta \mathbf{V}_{\text{RX}})^T) \mathbf{I}_s}{\lambda^2} \quad (2)$$

其中,  $\delta \mathbf{V}_{\text{RX}}$  表示卫星接收机的速度误差。

根据惯性导航原理,地心地固系(e)中的 SINS 的误差状态方程为<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{X}^e(t) = \begin{bmatrix} \delta R^e \\ \delta V^e \\ \boldsymbol{\varepsilon}^e \\ \delta \boldsymbol{\omega}^b \\ \delta \boldsymbol{\alpha}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta V^e \\ -F^e \boldsymbol{\varepsilon} + C_b^e \delta \boldsymbol{a}^b - 2\Omega_{ie}^e \delta V^e + N^e \delta R^e \\ -\Omega_{ie}^e \boldsymbol{\varepsilon}^e + C_b^e \delta \boldsymbol{\omega}^b \\ -A \delta \boldsymbol{\omega}^b + \bar{\mathbf{w}}_{\boldsymbol{\omega}} \\ -B \delta \boldsymbol{a}^b + \bar{\mathbf{w}}_{\boldsymbol{a}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\delta R^e, \delta V^e, \boldsymbol{\varepsilon}^e, \delta \boldsymbol{\omega}^b, \delta \boldsymbol{\alpha}^b$  分别表示地心地固系(e)中的位置误差、速度误差、失准角、陀螺漂移随机分量和加速度计零偏随机分量,  $A = \text{diag}(\beta_{\omega_x}, \beta_{\omega_y}, \beta_{\omega_z})$ ,  $B = \text{diag}(\beta_{a_x}, \beta_{a_y}, \beta_{a_z})$  为对角阵,其元素为对应的随机过程相关时间倒数。使用方程(3)采用 Kalman 滤波器可以估计出速度误差,从而估计出多普勒频移偏差。

## 3 MIMU 辅助的 GPS 信号搜索与跟踪

MIMU 辅助的卫星信号搜索与跟踪是利用卫星接收机提供的星历和 MIMU 提供的实时位置与速度信息,实时估算出多普勒频移,从而实现 GPS 信号的捕获和跟踪。

### 3.1 MIMU 辅助的 GPS 信号搜索

根据参考文献[7]如果载体高速运动,必须考虑多普勒影响,若一个载体独自产生  $\pm 5$  Hz 多普勒频移,那么载体向卫星的运动速度为 3 343.5 Km/h,大部分高速航天器的速度在此速度范围内。而对于 MIMU 辅助的 GPS 信号捕获,卫星的多普勒影响可以由概略星历估算出,而载体的多普勒可以由 MIMU 估算出来。图 2 描述了基于 MIMU 辅助卫星信号捕获框图。

图 2 中输入信号分别与本地产生的同相、正交相载波信号相乘来达到载波剥离的目的。同相和正交相复制的采样载波信号表示如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{SIN}_{\text{replica}}^{(\text{acq})}(t_n) &= \sin(2\pi(f_{\text{IF}} + f_k)t_n + \Delta\phi_{\text{dyn}}(t_n)) \\ \text{COS}_{\text{replica}}^{(\text{acq})}(t_n) &= \cos(2\pi(f_{\text{IF}} + f_k)t_n + \Delta\phi_{\text{dyn}}(t_n)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $t_n = t_0 + n\Delta t$ ;  $\Delta t$  为 GPS 采样时间间隔;  $\Delta\phi_{\text{dyn}}(t_n)$  为载波动态引入的相位项, 可用方程 (5) 定义:

$$\Delta\phi_{\text{dyn}}(t_n) = -2\pi \frac{\Delta R_{\text{LOS}}(t_n)}{\lambda_{L1}} \quad (5)$$

其中,  $\Delta R_{\text{LOS}}(t_n)$  为卫星到接收机在时间间隔  $[t_0, t_n]$  视线距离的变化 (LOS 增量), 从导航信息处理计算距离增量;  $\lambda_{L1}$  是 GPS L1 载波的波长。

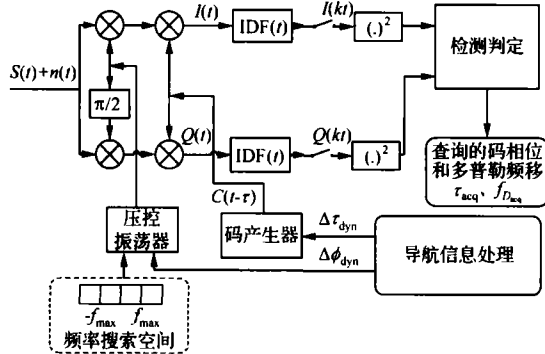


图 2 MIMU 辅助的 GPS 信号的捕获框图

Fig. 2 Sketch of MIMU aided GPS signal acquisition

通过下列方程可以计算得到复制的量化的伪随机码:

$$PRN_{\text{replica}}^{(\text{acq})}(t_n) = PRN(t_n - \Delta\tau_{\text{dyn}}(t_n)) \quad (6)$$

其中,  $PRN$  为跟踪的 GPS C/A 伪随机码;  $\Delta\tau_{\text{dyn}}(t_n)$  为码动态引入的相位项, 可根据方程 (7) 定义:

$$\Delta\tau_{\text{dyn}}(t_n) = \frac{\Delta R_{\text{LOS}}(t_n)}{c} \quad (7)$$

其中,  $c$  为光速。

对于在频率搜索空间  $[-f_{\text{max}}, f_{\text{max}}]$  中的每一个多普勒频移搜索值, 计算输入信号和本地产生信号的相关函数, 若相关值大于门限值, 则认为 GPS 信号存在, 从而可以得到信号的码移和多普勒频移粗估值。

为了提高相对信噪比, 对 1 ms 的能量数据进行累加。在能量的累加过程中, 根据式 (4) 和式 (6) 使用惯性数据不断地调整本地产生的码相位和本地产生的载波相位, 最后对累加的能量进行检测, 得到搜索的码移  $\tau_{\text{acq}}$  和多普勒频移  $f_{D_{\text{acq}}}$ 。

### 3.2 MIMU 辅助的 GPS 信号跟踪

在 GPS 卫星接收机中, 载波环比码环更容易失锁。在 MIMU 辅助的接收机中, 采用载波环对码环的辅助跟踪, 使得动态性对码环的影响很小。由于动态性能对码跟踪环的影响较小, 所以在此重点描述基于 MIMU 辅助的卫星接收机载

波跟踪环的设计。图 3 框图描述了 MIMU 辅助的载波跟踪环。

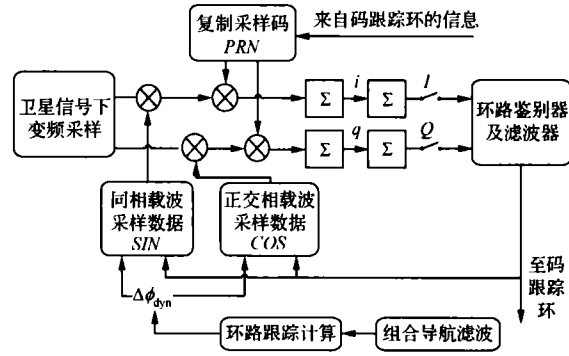


图 3 MIMU 辅助的 GPS 信号的跟踪框图

Fig. 3 Sketch of MIMU aided GPS tracking loop

在 MIMU 辅助的载波跟踪环路中, 当前历元累计的多普勒估计 ( $\phi_{\text{acm}}(t_m)$ ) 按照如下步骤计算<sup>[8]</sup>。

首先计算中间临时变量  $\phi_{\text{temp}}(t_m)$ :

$$\delta\phi(t_m) = \arctan \left( \frac{Q(t_m)}{I(t_m)} \right)$$

$$\phi_{\text{temp}}(t_m) = \phi_{\text{frac}}(t_m) + \delta\phi(t_m) + 2\pi \left( f_{D_{\text{acq}}} \Delta t_{\text{track}} - \frac{\Delta R_{\text{LOS}}(t_m) - \Delta R_{\text{LOS}}(t_{m-1})}{\lambda_L} \right) \quad (8)$$

其中,  $\Delta R_{\text{LOS}}(t_m) - \Delta R_{\text{LOS}}(t_{m-1})$  为两个连续历元卫星至接收机视线距离变化之差, 可以从导航信息处理中求解。

接下来, 载波相位的小数部分估计值  $\phi_{\text{frac}}(t_m)$  和累加载波相位整周部分估计值  $N_{\phi}(t_m)$  表示为

$$\phi_{\text{frac}}(t_m) = \text{frac}(\phi_{\text{temp}}(t_m)) \quad (9)$$

$$N_{\phi}(t_m) = N_{\phi}(t_{m-1}) + \text{round}(\phi_{\text{temp}}(t_m))$$

其中,  $\text{frac}(\cdot)$  表示取小数部分,  $\text{round}(\cdot)$  表示取整数部分。

最后, 计算累加的多普勒频移:

$$\phi_{\text{acm}}(t_m) = 2\pi N_{\phi}(t_m) + \phi_{\text{frac}}(t_m) \quad (10)$$

## 4 基于 MIMU 辅助的卫星接收机跟踪环路的最优带宽设计

GPS 接收机跟踪环的跟踪误差主要包含两部分: 热噪声误差和由载体动态性引起的瞬时误差。对于 GPS 接收机环路带宽的设计来说, 总是涉及这两相反方面的折衷考虑: 一方面, 由于热噪声或干扰的原因要求窄的跟踪带宽; 另一方面, 由

于载体动态性能要求宽的跟踪环带宽。因此,同时考虑低信噪比和载体动态性能时,存在一个环路带宽的折衷考虑即最优环路带宽的确定。

对于载波环路来说,载体动态引入误差与载波环路滤波器的阶数和环路带宽有关,可以由下式确定<sup>[9]</sup>:

$$R_e = \frac{dR^n/dt^n}{\omega_n^n} = \frac{\alpha^n dR^n/dt^n}{B_n^n} \quad (11)$$

其中,  $dR^n/dt^n$  为相位的  $n$  阶导数,单位为  $\text{rad/s}^n$ ,  $n$  为环路的阶数,  $B_n$  为环路的等效噪声带宽,  $\omega_n$  为环路的自然角频率,  $\alpha = B_n/\omega_n$ , 对于一阶环  $\alpha = 0.25$ , 二阶环  $\alpha = 3\sqrt{2}/8$ , 三阶环  $\alpha = 5/6$ 。

在 MIMU 辅助 GPS 接收机中,多普勒测量可以通过 MIMU 来测量,然后引入到接收机跟踪环路中,故接收机动态性能主要和 MIMU 测量的多普勒频率误差有关,也就是和 MIMU 的性能有关,根据方程(2)和(3)可以求得载体的多普勒误差与 MIMU 性能指标(陀螺漂移和加表的零偏)的关系,其表达式可以近似表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} \delta V &= (B + g\alpha(0) + gDt) \\ \delta f_{\text{MIMU}} &= (B + g\alpha(0) + gDt)/\lambda \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\delta V$  为载体速度误差,  $\delta f_{\text{MIMU}}$  是 MIMU 估计的多普勒频率误差,  $B$  为加表的零偏,  $D$  为陀螺的漂移,  $g$  为重力加速度,  $\alpha(0)$  为初始姿态角误差。

在普通的 GPS 接收机中,最优带宽是输入信号信噪比的函数。根据估计的信噪比和动态性能确定的最优带宽为<sup>[11]</sup>

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\frac{B_n}{c/n_0} \left[ 1 + \frac{1}{c/n_0 \cdot T} \right] \frac{\lambda_L}{2\pi} + \frac{\alpha^n R^{(n)}}{3 B_n^n}} \quad (13)$$

其中,  $c/n_0$  为噪声功率密度比,  $T$  为预检积分时间,  $\lambda_L$  为载波波长。

但是在 MIMU 辅助的 GPS 接收机中,最优带宽是输入信号的信噪比和 MIMU 的性能指标的函数。根据估计的信噪比和 MIMU 的性能指标来确定最优带宽。载波环路总的跟踪误差与输入信号的信噪比和 MIMU 的性能指标的关系可表示为

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\frac{B_n}{c/n_0} \left[ 1 + \frac{1}{c/n_0 \cdot T} \right] \lambda_L + \frac{\alpha^n \Delta f_{\text{IMU}}^{(n-1)}}{3 B_n^n}} \quad (14)$$

其中,  $\Delta f_{\text{IMU}}$  表示多普勒误差,由 MIMU 性能确定,可由方程(12)近似得到。为了使总的跟踪误差最小,根据信噪比不断校正环路的带宽达到最优的性能。方程(14)对带宽  $B_n$  求导数  $\partial\sigma_{\text{PLL}}/\partial B_n = 0$  得到

$$\begin{aligned} &\frac{1}{c/n_0} \left( 1 + \frac{1}{2Tc/n_0} \right) \left( \frac{\lambda_L}{2\pi} \right)^2 - \\ &\left( (2n) \frac{\alpha^n}{3} \Delta f_{\text{IMU}}^{(n-1)} \right)^2 B_n^{-(2n+1)} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

从而可以得到  $n$  阶载波跟踪环最优环路带宽为

$$(B_n)_{\text{PLL}} = \sqrt[2n+1]{\left( (2n) \frac{\alpha^n}{3} \Delta f_{\text{IMU}}^{(n-1)} \right)^2 / \left( \frac{1}{c/n_0} \left( 1 + \frac{1}{Tc/n_0} \right) \left( \frac{\lambda_L}{2\pi} \right)^2 \right)} \quad (16)$$

使用同样的方法可以获得  $n$  阶码环最优环路带宽为

$$(B_n)_{\text{DLL}} = \sqrt[2n+1]{\left( (2n) \frac{\alpha^n}{3} \delta V^{(n-1)} \right)^2 / \left( \frac{1}{2c/n_0} \left( 1 + \frac{1}{Tc/n_0} \right) \lambda_c^2 \right)} \quad (17)$$

由于载波跟踪环即使在宽的带宽条件下,跟踪精度也是非常高的,所以常用载波跟踪环的多普勒频率测量来辅助码跟踪环。使用载波辅助码跟踪环,载体动态引入误差很小,可以忽略不计。

### 5 仿真分析及试验结果

为了验证 MIMU 辅助的高性能 GPS 接收机的性能,分别进行了仿真和低速跑车试验,仿真和试验结果如下。

#### 5.1 MIMU 辅助的 GPS 接收机性能仿真分析

下面以二阶跟踪环为例说明 MIMU 辅助的 GPS 接收机的抗干扰性。普通 GPS 接收机的载波跟踪环带宽在仿真中设为 18 Hz,而在 MIMU 辅助的 GPS 接收机中,典型的载波跟踪环带宽为 2 Hz。当干扰源的功率分别为 0.1 w, 1 w, 10 w, 100 w, 1 kw, 10 kw 时,分别对普通的 GPS 接收机和 MIMU 辅助的 GPS 接收机的抗干扰性能进行仿真,仿真结果如图 4 所示。

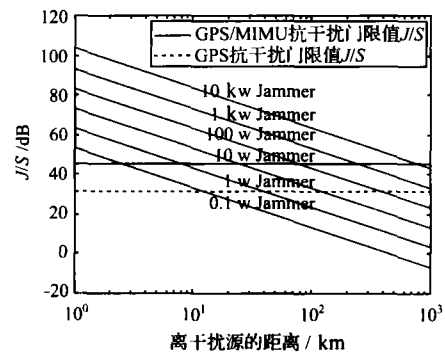


图 4 抗干扰性能的分析结果

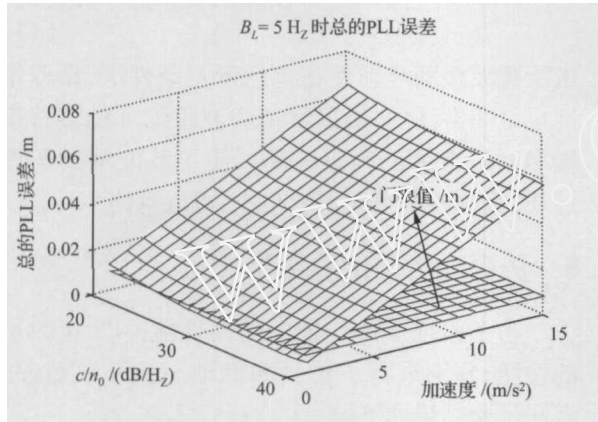
Fig. 4 The resulting of anti-jamming performance

从图4可以看出MIMU辅助的GPS接收机比一般的GPS接收机跟踪抗干扰性能至少有13 dB的提高。

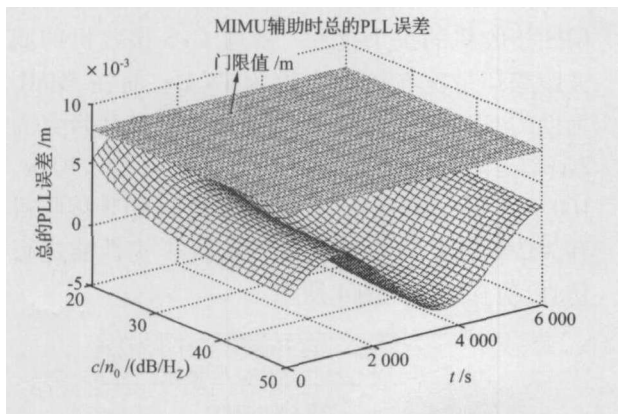
若简单考虑惯性器件误差为零偏,则MIMU辅助的GPS接收机动态跟踪误差可表示为<sup>[10]</sup>

$$e(t) = \frac{B}{\omega_L} \cos(\omega_L t) + \frac{Dg}{\omega_L^2} \frac{\sin(\omega_L t)}{\omega_L} \quad (18)$$

其中,  $B$  为加速度计的零偏,  $D$  为陀螺的漂移,  $g$  为重力加速度,  $\omega_L^2 = g/R$  为舒拉频率,  $\omega_L$  为环路带宽。根据方程(13)和(18)分别仿真带宽为5 Hz的纯GPS载波动态跟踪性能和带宽为2 Hz的惯性辅助的GPS载波动态跟踪性能,其中在惯性辅助的GPS动态性能仿真中采用  $D = 1.0^\circ/h$ ,  $B = 0.01 \text{ m/s}^2$ 。仿真结果如图5所示。



(a) 5 Hz时纯GPS PLL跟踪性能



(b) 当  $B_L = 2 \text{ Hz}$  时,惯性辅助的PLL跟踪性能

图5  
Fig. 5

从图5(a)可以看出在没有MIMU辅助时,总的环路跟踪误差很容易超过门限值,也就是GPS卫星信号很容易失锁;而在图5(b)MIMU辅助的GPS接收机中,由于载体的动态性引起的多普勒

频率可由MIMU测量,因此动态跟踪性能主要和惯性器件的性能有关。

从图5(b)得知,由于采用GPS/MIMU组合导航可以估计MEMS惯性器件误差,并对其进行修正。经过GPS/MIMU组合导航修正后的MIMU能够满足高动态GPS接收机锁定的要求。

### 5.2 MIMU辅助的GPS接收机低动态跑车试验

为了验证MIMU辅助高性能GPS接收机的性能,在PC机上构建如图6所示试验系统。

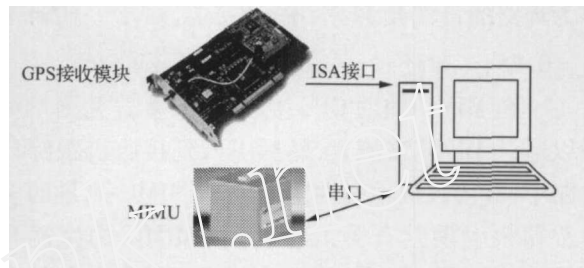


图6 MIMU辅助的GPS接收机试验系统框图  
Fig. 6 MIMU aided GPS receiver experiment system

其中,GPS接收模块仅包含射频和基带,可以通过ISA接口访问和控制基带,闭合跟踪环路。MIMU采用XW\_IMU5200惯性测量单元,MIMU的性能如表1所示。

表1 XW\_IMU5200的性能指标  
Tab. 1 XW\_IMU5200 specifications

	陀螺	加速度计
输入范围	$\pm 200^\circ/s$	输入范围 $\pm 2, \pm 5, \pm 10g$
偏值启动稳定性(固定温度)	$\leq 100^\circ/h, 1\sigma$	偏值启动稳定性(固定温度) $0.5 \text{ mg}, 1\sigma$
偏值运行稳定性(任意温度)	$50\text{-}200^\circ/h, 1\sigma$	偏值运行稳定性(任意温度) $1 \text{ mg}, 1\sigma$
噪音(15 min)	$4\text{-}15^\circ/h, 1\sigma$	噪音(15 min) $0.1 \text{ mg}, 1\sigma$
白噪声(角度随机游走)	$0.3^\circ/\sqrt{t-h}$ ( $0.005^\circ/s/\sqrt{t-Hz}$ )	白噪声(角度随机游走) $0.4 \text{ mg}/\sqrt{t-Hz}$
标度因数误差	$\leq 5\ 000 \times 10^{-6}$ (0.5%)	标度因数误差 $\leq 5\ 000 \times 10^{-6}$ (0.5%)
未对准	$\leq 5 \text{ mrad}$	未对准 $\leq 5 \text{ mrad}$
带宽	50 Hz	带宽 50 Hz

从表1看出,由于MEMS陀螺精度太差,所以在试验中增加一磁强计使得滤波中航向角可观。

首先用跟踪试验来验证文中设计接收机跟踪环路,通过试验得到所设计跟踪环路能对可见星进行有效跟踪。选取通道1的卫星跟踪情况

来说明,如图 7 所示。

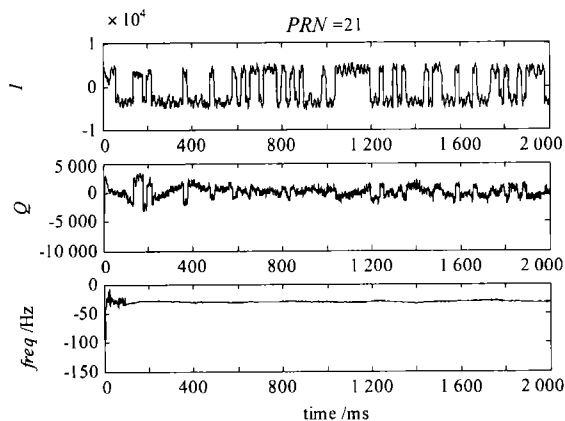


图 7 PRN = 21 时 MIMU 辅助 GPS 接收机跟踪的结果  
Fig. 7 Tracking results of MIMU aided GPS receiver tracking loop

图 7 显示了通道 1 所接收到的卫星在 MIMU 辅助下的同相和正交相的跟踪结果及多普勒频率结果。

动态车载试验地点选在国防科技大学主楼前环线上。为了验证精度,在试验车上安装另一套商用的 GPS 系统:Thales 公司 DG-14 接收机,跑车的轨迹如图 8 所示,试验车沿该图轨迹跑了 8 圈。

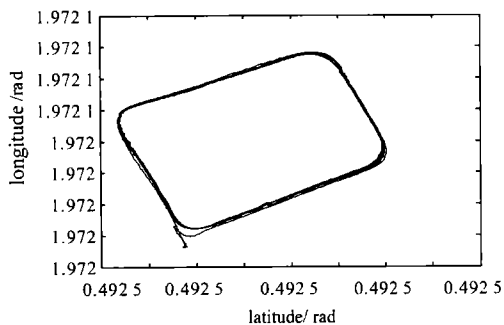


图 8 跑车试验运动轨迹  
Fig. 8 Vehicle test movement route

跑车位置误差(和 Thales DG-14 比较)如图 9 所示。

从图 9 可知,和商用 GPS 接收机相比较,研制的 GPS 接收机位置误差水平优于 3 m(统计的标准差),高程优于 10 m。若考虑两天线之间的安装误差,商用 GPS 接收机和研制的 GPS 接收机精度大体相当。

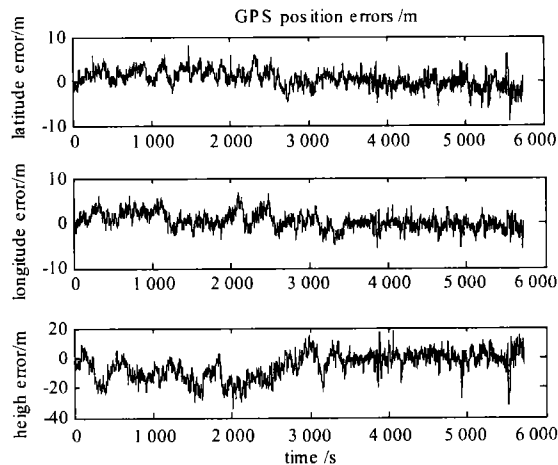


图 9 MIMU 辅助 GPS 位置误差(和 Thales DG-14 比较)  
Fig. 9 MIMU aided GPS receiver position errors compared to Thales DG-14

## 6 结束语

本文实现了低成本 MIMU 辅助的 GPS 接收机设计,针对普通 GPS 接收机搜索和跟踪中存在的问题,设计了 MIMU 辅助的卫星信号搜索和跟踪技术,同时为了减少对 MIMU 的依赖,设计了基于 MIMU 辅助的 GPS 接收机环路最优带宽。最后通过仿真和低动态车载试验可以得到:

1. 采用 MIMU 辅助 GPS 接收机设计可以很好地解决热噪声所要求的带宽和动态性能所要求的带宽这一对矛盾体。
2. 在当前国内的惯性器件水平下,若不对 MEMS 惯性器件进行修正,则当前的 MIMU 不能满足 PLL 锁定的要求,由于采用 GPS 信息估计出 MEMS 惯性器件误差,并对其进行修正,可以满足卫星高动态接收机的锁定要求。同时,通过 MIMU 辅助的 GPS 接收机最优带宽的设计,可以进一步减少对惯性器件的依赖。
3. 仿真表明 MIMU 辅助的 GPS 接收机动态性能取决于 MIMU 的性能指标和环路的带宽,而抗干扰性能至少有 13 dB 的提高;通过车载试验可知,和商用 GPS 接收机相比较,研制的 GPS 接收机位置误差水平优于 3 m(统计的标准差),高程优于 10 m,商用 GPS 接收机和研制的 GPS 接收机精度大体相当。同时系统还能够提供姿态角信息。
4. 若在条件允许的情况下,可采用 GPS 信号仿真器进一步完成高动态和抗干扰性测试。

## 参考文献:

- [1] GUSTAFSON D, DOWDLE J, FLUECKIGER K. A High Anti-Jam GPS-Based Navigator [A]. ION NTM 2000 [C]. Salt Lake City: [s. n.], 2000. 438-446.
- [2] L-3 Communications, Interstate Electronics Corporation. New Generation of Deeply Integrated Anti-jamming Software and Hardware [EB/OL]. <http://www.L-3Com.com>, 2005-07.
- [3] MAO W L, TSAO H W, CHANG F R. Intelligent GPS Receiver for Robust Carrier Phase Tracking in Kinematic Environments [J]. IEE Proceeding Sonar Navig, 2004, 151(3):171-180.
- [4] SIMON D, EL-SHERIEF H. Fuzzy for Logic Digital Phase-Locked Loop Filter Design [J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 1995, 3(2):211-218.
- [5] KIM Hyun-soo, BU Sung-chun, JEE Gyu-in, et al. An Ultra-tightly Coupled GPS/INS Integration Using Federated Kalman Filter [A]. ION GNSS 2003 [C]. Portland: [s. n.], 2003. 2 878-2 885.
- [6] DONG Xu-rong, ZHANG Shou-xin, HUA Zhong-Chun. GPS/INS Integrated Navigation and Application [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998. (董绪

荣,张守信,华仲春. GPS/INS 组合导航定位及应用 [M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.)

- [7] TSUI J B-Y. Fundamentals Global Positioning System Receivers: a Software Approach (2nd edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005. 34-40.
- [8] SOLOVIEW A, VanGRAAS F, GUNAWARDENA S. Implementation of Deeply Integrated GPS/Low-Cost IMU for Reacquisition and Tracking of Low CNR GPS Signals [A]. ION NTM 2004 [C]. San Diego: [s. n.], 2004. 923-935.
- [9] SUN Li. The Study on GPS Receiver System [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998. 75-76. (孙礼. GPS 接收机系统的研究 [D]. 北京:北京航空航天大学,1998.75-76.)
- [10] KREYE C, EISSFELLER B, AMERES G. Architectures of GNSS/INS Integrations-theoretical Approach and Practical Tests [EB/OL]. <http://forschung.unibw-muenchen.de/papers/gawoe8szer4vfebo15xj338yybw.pdf>, 2004-09-20.
- [11] JWO D J. Optimization and Sensitivity Analysis of GPS Receiver Tracking Loops in Dynamic Environments [J]. IEE Proceeding Sonar Navigation, 2001, 148(4):241-250.

(责任编辑:雷秀丽)

(上接第127页)

图综合阶段,质量功能配置技术与故障分析技术相互配合实现制图综合过程的质量控制。

4. 知识库内容更加丰富。制图综合知识是制图综合专家在长期综合过程中形成的宝贵财富,但这些知识中很大一部分现在依旧无法用逻辑语言进行表示,目前计算机水平无法进行识别,因此现有的大部分制图综合知识库都忽略了这部分知识。在基于数据库的 DFQ 制图综合知识库中对这部分知识也予以了足够的重视。这对于指导自动制图综合系统的人机协同具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Dept of Geography University of Zürich. Constraint Analysis [EB/OL]. <http://agent.ign.fr/deliverable/DA2.html>, 1998.
- [2] BARDER M, WEIBER R. Detecting and Resolving Size and Proximity Conflicts in the Generalization of Polygonal Maps [A]. Proceeding 18th International Cartographic Conference [C]. Stockholm: [s. n.], 1997. 1 525-1 532.
- [3] PAIVA J A de C. Topological Equivalence and Similarity in Multi-representation Geographic Database [D]. Zurich: [s.

n.], 1998.

- [4] QIAN Hai-zhong. Study of Automated Cartographic Generalization and Intellectualized Generalization Process Control [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006. (钱海忠. 自动制图综合及过程控制的智能化研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学,2006.)
- [5] WANG Jia-yao, WU Fang. Theory and Method of Digital Map Automated Cartographic Generalization [M]. Beijing: PLA Press, 1998. (王家耀,武芳. 数字地图自动制图综合原理与方法 [M]. 北京:解放军出版社,1998.)
- [6] Dept of Geography University of Zürich. Selection of Basic Measures [EB/OL]. <http://agent.ign.fr/deliverable/DC1.html>, 1999.
- [7] WU He-hai. Research on Theory, Technique and Method of Map Generalization [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 2004. (毋河海. 地图综合基础理论与技术方法研究 [M]. 北京:测绘出版社,2004.)
- [8] JOAO E M. Causes and Consequences of Map Generalization [M]. London: Taylor and Francis, 1998.
- [9] LEI Wei-gang. Uncertainty and Data Processing of Linear Features Generalization of Spatial Data [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (雷伟刚. 空间数据线要素综合的不确定性数据处理 [D]. 上海:同济大学,2004.)

(责任编辑:丛树平)