

文章编号 1004-924X(2007)02-0261-06

MIMU 信号频谱分析及降噪方法

马建军, 郑志强, 吴美平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 根据误差信号的频谱特性将 MIMU(Micro Inertial Measurement Unit) 误差信号分为长期误差和短期误差两类, 分析了两类误差的来源和传统组合导航系统的降噪性能。利用 Allan 方差法对 MIMU 长期误差进行分析建模; 针对短期误差的频谱特性, 使用最优低通滤波器滤除高于运动特性频带上限的部分; 通过小波阈值降噪方法减小混叠在运动特性频带中的短期误差。GPS/MIMU 组合导航仿真结果表明, 经过 MIMU 信号预处理的组合系统, 在 GPS 信号有效时定位误差减小了 20%, 而当 GPS 信号丢失时, 累积误差降低了近 80%。

关键词: 微机电惯性传感器; 频谱分析; Allan 方差; 小波阈值滤波; 组合导航

中图分类号: V241.62; TP391 文献标识码: A

Spectral analysis and de-noising of MIMU raw measurement

MA Jian-Jun, ZHENG Zhi-Qiang, WU Mei-ping

(College of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: On the time-frequency view, the errors of MIMU signal were classified into long-term errors and short-term errors according to their spectral signature, and the error resources and performance of de-noising in GPS/MIMU integrated system were analyzed. Allan variance method was used to model and compensate the long-term errors, and the short-term errors whose frequency higher than the upper band of motion dynamic was eliminated by optimal low-pass filter, the wavelet threshold filter was used to reduce the remained short-term errors. Simulation results show that the performance of integrated GPS/MIMU system has been improved by 20% when GPS is available and 80% while GPS blockages after pre-processing for MIMU signal.

Key words: MEMS IMU; spectral analysis; Allan variance; wavelet threshold filtering; integrated navigation

1 引言

目前导航系统主要以 GPS 为主要导航信息

源, 其定位和测速精度高, 且基本不受地域、时间限制, 但是当载体做大机动飞行或有地形遮挡时, GPS 导航信息有可能中断或动态误差过大而不能使用。另外, GPS 接收机数据的更新频率比较

低,难以满足某些场合下的实时控制要求。另一广泛应用的导航系统是惯性导航系统(INS),利用加速度计和陀螺敏感载体的导航状态,其优点是自主性和隐蔽性好,能连续提供多种较高精度的导航参数的输出信息,频带宽;但其缺点是误差(尤其是位置误差)会随时间积累。将 GPS 和 INS 组成组合导航系统可以各自取长补短,用 GPS 提供的精确定位信息对 INS 进行校正,当 GPS 信息丢失时可以利用 INS 解算的位置速度短期精度进行补偿,整个系统提高了 GPS 失锁期间的鲁棒性,而且削弱了 INS 长期误差。但是,高精度的惯性导航系统成本高、尺寸大,使得长期以来组合导航系统的应用受到很大的制约。

随着微机电技术的发展,基于 MEMS 技术的低成本惯性传感器的出现,使得组合导航系统得到了很大的发展空间。但与高成本器件相比, MEMS 惯性传感器具有较大的噪声且稳定性较差,导致长期精度很差。因此对 MIMU 信号进行误差分析,尽量消除噪声,对提高组合系统性能有十分重要的意义。

本文从时频分析的角度出发,对 MIMU 误差信号进行分析,将误差归为长期误差和短期误差两类,针对长期误差采用随机建模的方法进行补偿,对于短期误差运用最优低通滤波器和小波阈值滤波方法进行处理,并对 GPS/MIMU 组合导航进行了仿真实验,模拟了 GPS 信号丢失情况下的组合导航定位,对比分析了传统方法和本文方法的组合性能。

2 MIMU 信号频谱分析

根据文献[1],MIMU 动态信号在频域内主要包括动态特性、随机扰动和白噪声。根据频谱特性可以将 MIMU 测量误差分为短期误差(高频部分)和长期误差(低频部分)两类,如图 1 所示,可以看到两类误差分别处于不同的频带,其中长期误差主要包括加速度计偏差和陀螺漂移以及测量白噪声等;短期误差主要包括随机扰动(例如载体的振动)及其产生的相关噪声等。虽然采用高精度器件,可以降低大部分长期误差,但是器件成本将会大大增加,而且由于工作环境的原因,决定了 MIMU 仍然会存在较大的短期误差,因此对 MIMU 误差进行分类,并分别进行消除是很有意义的。

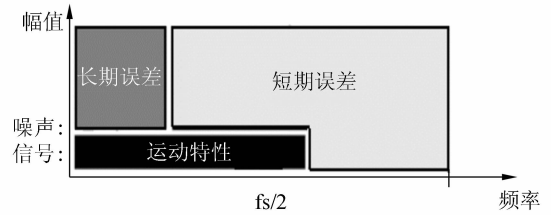


图 1 MIMU 误差分类

Fig. 1 Error classification of MIMU

长期误差处于低频带,主要是通过将建立的误差状态模型列入组合滤波状态方程的方法,在组合滤波过程中,利用 GPS 信号(例如位置和速度)进行校正补偿;而短期误差位于高频带,一小部分可以通过 INS 机械编排的数值积分过程而平滑消除,但仍然会存在大量的残留误差,如图 2 所示。也就是说,组合系统性能是有带宽限制的,其中频带下限由 GPS 信号观测偏差(包括电离层延迟、对流层延迟以及多径效应等)决定,而频带上限主要受 MIMU 短期误差影响。在利用组合滤波过程中, GPS 量测采样频率(1 Hz)远远小于 MIMU 的采样频率(通常是几百 Hz),所以, MIMU 输出信号的误差变换只能以组合滤波的频率,也就是 GPS 信号更新频率得到检测,而在此期间由于 MIMU 的高采样率,误差值已经是通过多次累加的积累值了。由此可见,利用 GPS 信号组合主要可以消除部分长期误差,包括陀螺漂移、加速度计偏差、刻度因子以及由于初始对准产生的误差。这些误差量通常在组合过程中引入对应维数状态向量变量进行建模。因此,通过充分长时间的观测周期,这些误差可以被限定在一个有限的范围内。而对于其他因素,估计过程的精度主要依赖于载体动态性能,例如,高动态有利于低频误差的估计。

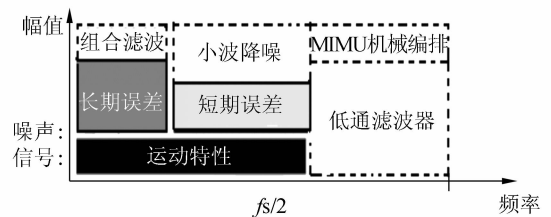


图 2 MIMU 误差消除过程

Fig. 2 Error processing of MIMU

短期误差可以分为两部分,一部分高于运动

特性频带上限,一部分处于运动特性频带内。对于高于运动特性频带上限的短期误差,可以通过设计一个最优低通滤波器将其消除掉。这样就只剩下混杂在运动特性频带内的一部分短期误差,这部分短期误差主要包括混叠在运动特性中的噪声和载体振动或抖动信号,由前面的分析可知,组合滤波由于受奈奎斯特采样定理限制,不能利用 GPS 信号或外部信号进行区分滤除,需要在 MIMU 数据进行机械编排之前对其进行预滤波处理。

3 基于 Allan 方差的 MIMU 误差建模

1966 年,David Allan 在研究振荡器稳定性时提出了一种简单的方差分析方法,称为 Allan 方差分析方法^[2]。该方法最初被用来表征精确振荡器的相位和频率不稳定性。由于惯性传感器本身也具有振荡器的特征,Allan 方差分析在惯性传感器领域中得到推广和应用。

Allan 方差与功率谱密度的关系为:

$$\sigma^2(T) = 4 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4 \pi f T}{(\pi f T)^2} df, \quad (1)$$

其中, $\sigma^2(T)$ 为 Allan 方差, $S_{\Omega}(f)$ 表示随机过程 $\Omega(T)$ 的功率谱密度。这说明:当通过一个传递函数为 $\sin^4 \pi f T / (\pi f T)^2$ 的滤波器时,Allan 方差与传感器输出的噪声总能量成正比。由此,Allan 方差提供了一种方法,可以辨别并量化数据中存在的不同噪声项。

3.1 Allan 方差形式表示的噪声项

各噪声项同 Allan 标准差之间的关系归纳如表 1,仅列出 5 种基本噪声^[3],斜率为 Allan 标准差图中的直线斜率:

表 1 各种误差项与 Allan 方差的关系

Tab.1 Relationship between noise and Allan variance

噪声类型	参数	Allan 标准差	斜率
量化噪声	Q	$\sigma_Q = \sqrt{3}Q/T$	-1
角随机游走	N	$\sigma_N = N/\sqrt{T}$	-1/2
偏差非稳定性	B	$\sigma_B = B/0.6648$	0
速率随机游走	K	$\sigma_K = K \sqrt{T/3}$	1/2
速率斜坡	R	$\sigma_R = RT/\sqrt{2}$	1

如果各种误差是独立统计的,则 Allan 方差可以表示成一个或多个误差源的组合:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_N^2 + \sigma_B^2 + \sigma_K^2 + \sigma_R^2, \quad (7)$$

则 Allan 标准差由下式表示:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \sqrt{\sigma_{\text{total}}^2} \\ &= f(\sigma_Q, \sigma_N, \sigma_B, \sigma_K, \sigma_R) \\ &= \sum_{n=-2}^2 A_n T^{n/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, A_{-2} 为量化噪声的拟合方程系数, A_{-1} 为角度随机游走的拟合方程系数, A_0 为零偏不稳定性的拟合方程系数, A_1 为速度随机游走的拟合方程系数, A_2 为随机斜坡的拟合方程系数。这些系数可以在最小均方意义下通过拟合得到,从而可以得到 MIMU 各项性能指标。

3.2 静态数据分析

选用的 MIMU 为一国产低成本微惯性测量组件,其尺寸仅为 9.6 cm×7.8 cm×8.1 cm,重量为 0.82 kg,耗电量为 2 W,其主要技术指标见表 2。

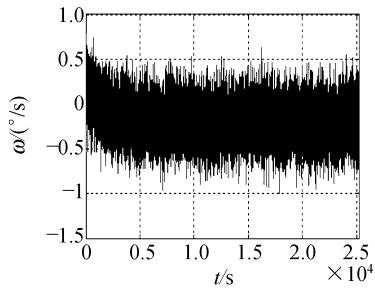
表 2 MIMU 的主要技术指标

Tab.2 Main specification of MIMU

参数	陀螺仪	加速度计
测量范围	±200°/s	±5 g
偏差可重复性	<0.3°/s,1σ	<2 mg,1σ
随机漂移	<1.8°/hrHz ^{1/2}	<0.3 mg/Hz ^{1/2}
比例因子稳定性	<0.5%,1σ	<0.2%,1σ
偏差变化	<0.8°/s,1σ	<5 mg,1σ

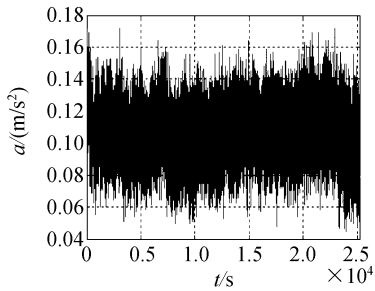
对 MIMU 进行了 7 h 的静态数据采集,采样频率为 100 Hz,每秒纪录一次,采样的原始信号如图 3(a)、3(b)为 X 轴陀螺和加速度计的输出数据,图 3,图 3(c)、3(d)为对应数据 Allan 方差图。为保证估计误差小于 25%,对 7 h 样本长度而言,有效的簇时间长度约为 2 800 s,由于簇时间越长计算越不准确,因此本文选取的簇时间长度为 1 000 s。

由图 3(c)可以看出陀螺 Allan 标准方差曲线可以分为具有明显特征的三段,三段渐近线斜率分别为 -1/2、0 和 +1/2 的直线,在簇时间低于 100 s 时,短期随机误差表现为角随机游走;在簇时间为 100 s 附近时,Allan 方差曲线比较平缓,表明陀螺中存在偏差非稳定性;当簇时间大于



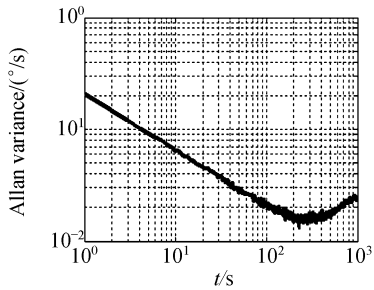
(a)陀螺输出

(a)Output of gyroscope



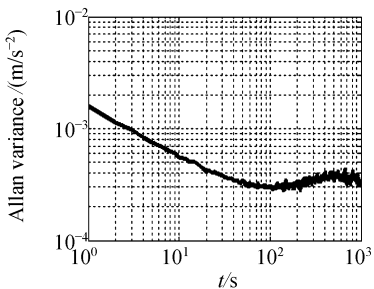
(b)加速度计输出

(b)Output of accelerometer



(c)陀螺 Allan 方差图

(c)Allan variance plot of gyroscope



(d)加速度计 Allan 方差图

(d)Allan variance plot of accelerometer

100 s,认为陀螺的长期随机误差表现为速率随机游走。加速度计 Allan 标准方差曲线可以分为具有明显特征的两段,两段渐近线斜率分别为 $-1/2$ 和 0 的直线,对应的噪声特性分别为加速度随机游走和偏差不稳定性。可以确定,加速度计的误差源中,加速度随机游走和偏差不稳定性占有支配地位,表 3 和表 4 分别为陀螺和加速度计随机误差辨识的结果。

表 3 陀螺误差辨识

Tab. 3 Identification results of gyroscope errors

	$N[^\circ/\sqrt{s}]$	$B[^\circ/s]$	$K[^\circ/s/\sqrt{s}]$
陀螺	0.032 5	0.024 ± 0.003	0.001 5

表 4 加速度计误差辨识

Tab. 4 Identification results of accelerometer errors

	$N[m/s/\sqrt{s}]$	$B[m/s^2]$
加速度计	0.007 6	0.003 54

4 基于小波变换的 MIMU 信号降噪

为提高 MIMU 的使用精度,常采用数字滤波的方法,其中最常用的滤波器是 Kalman 滤波器,但应用 Kalman 滤波器需建立系统的误差模型,而 MIMU 短期误差通常包含在运动特性频带内,无法建立其精确的系统模型。小波分析以其优良的多分辨率分析特性特别适用于非平稳信号处理,特别是利用小波分析去噪不需要系统的误差模型,较适于 MIMU 信号滤波。

4.1 小波变换

小波分析是傅里叶分析的延伸,大部分信号的频域分析方法运用傅里叶变换可以得到较好的结果,但傅里叶变换也有着严重的缺陷:傅里叶级数的正弦与余弦系数为常数,不能反映振幅变化的情况;求傅里叶系数需要考虑时间域上所有信息,不能反映局部信息的特征。为了克服这一缺陷,D. Gabor(1946)提出了一种短时傅里叶变换(STFT),将信号映射成时间和频率的二维函数,短时傅里叶变换实质上是单分辨率的分析,要改变分辨率,则必须重新选取时间窗口函数,即高频与低频的时间局部化不能同时满足。

小波变换发展了短时傅里叶变换的局部化思想,在信号的低频部分具有较高的频率分辨率和

图 3 静态数据及 Allan 方差图

Fig. 3 Static data and Allan variance plot

较低的时间分辨率,在信号的高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,是一种窗口大小(面积)固定但其形状可以改变的时频局部化分析方法,具体数学理论可以参见文献[4]。为了比较 FT、STFT 和 WT 性能,且考虑到 MIMU 采样频率通常为 50~200 Hz,仿真信号采用采样率分别为 200 Hz、100 Hz 和 50 Hz,包含了模拟动态频率范围 1~90 Hz,间隔 2 Hz 的正弦信号。其中 STFT 使用 Hamming 窗函数,窗口大小选择 4 和 512 分别进行变换,小波函数使用“DB5”,尺度范围从 1 至 6,变换结果如图 4 所示。

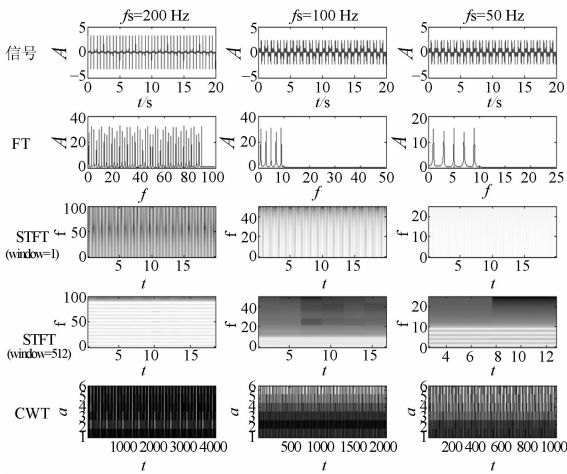


图 4 FT、STFT 和 CWT 对比

Fig. 4 Comparisons between FT、STFT and CWT

由图 4 可知小波系数不仅象傅里叶系数那样,是随频率不同而变化的,而且对于同一个频率指标 j ,在不同时刻 k ,小波系数也是不同的。由于小波函数具有紧支撑的性质,即某一区间外为 0。这样在求各频率水平不同时刻的小波系数时,只用到该时刻附近的局部信息,小波变换的“时间—频率窗”的宽度可变,检测高频信号时变窄,检测低频信号时变宽。

4.2 小波阈值滤波

由于小波变换是线性变换,所以对带噪信号 $f(k) = s(k) + n(k)$ 做离散小波变换后,得到的小波系数 $w_{j,k}$ 仍由两部分组成,一部分是真实信号 $s(k)$ 对应的小波系数,记为 $u_{j,k}$,另一部分是噪声 $n(k)$ 对应的小波系数,记为 $v_{j,k}$ 。Donoho^[5] 提出的小波阈值去噪方法在最小均方误差(MSE)意义上是有效的,并且已经取得了广泛的应用,此方法的基本步骤如图 5 所示。

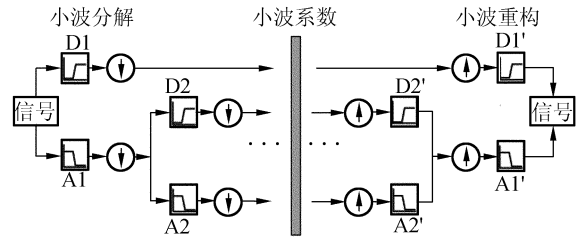


图 5 小波阈值滤波

Fig. 5 Wavelet threshold filtering

- (1)对带噪信号 $f(k)$ 作小波变换,得到一组小波系数 $w_{j,k}$;
- (2)通过对 $w_{j,k}$ 进行阈值处理,得出估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$,使得 $\|\hat{w}_{j,k} - u_{j,k}\|$ 尽量小;
- (3)利用 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波重构,得到估计信号 $\hat{f}(k)$,即为去噪后的信号。

4.3 MIMU 信号小波降噪

图 6 中,(a)所示为从 MIMU 提取的陀螺静态原始输出,(b)、(c)、(d)分别为 3、4、5 尺度小波滤波后得到的信号。从图中可以很明显地看出,信号中的噪声被有效的抑制,并且随着变换尺度的增加,分辨率越来越高,滤波的效果也越来越好。

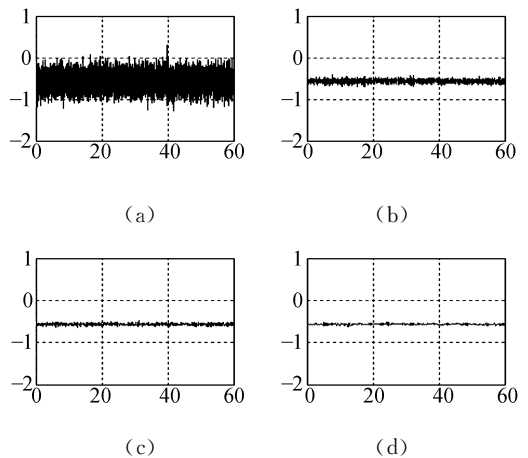


图 6 MIMU 信号小波降噪

Fig. 6 Wavelet de-noising results of MIMU signal

5 组合导航仿真

仿真从东经 120°、北纬 40°、高度为 5 000 m 的高空以 300 m/s 的速度匀速向北水平飞行的过程,仿真时间设为 300 s,其中 120~150 s 模拟 GPS 信号丢失。

图 7 所示为整个 300 s GPS/MIMU 组合导航

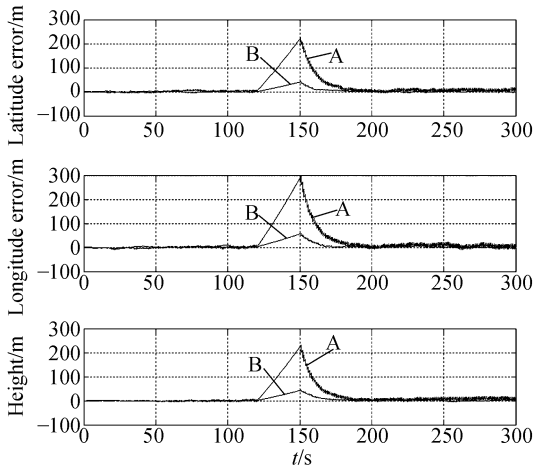


图 7 组合导航位置误差

Fig. 7 Position errors of GPS/MIMU integrated system

的仿真结果, A 线为直接运用 Kalman 滤波进行输出校正的位置误差, B 线为 MIMU 信号经过预处理后进行输出校正的组合位置误差。由图中可以看出, 在 GPS 信号有效的时间里, 直接组合的定位误差大约为 10 m 左右, 在 GPS 丢失的 30 s 时间结束时, 累积纬度误差达到 200 m, 经度误差达到近 300 m, 高度误差也超过 200 m。而 MIMU 信号经过预处理后的组合位置误差在 GPS

信号有效时, 定位精度比直接进行 Kalman 滤波组合的定位误差减小了 20% 左右, 而且在 30 s 的 GPS 信号丢失的过程结束时, 纬度、经度和高度的累积误差均仅为 50 m 左右, 与直接进行 Kalman 滤波组合的定位误差相比减小了近 80%。

6 结 论

本文从时频分析的角度出发, 对 MIMU 误差信号进行分析, 将误差分为长期误差和短期误差两类。对于长期误差采用 Allan 方差分析方法进行建模和补偿; 对于短期误差, 利用低通滤波器滤除高于运动特性频带上限的短期误差项, 对于混叠在运动特性频带内的高频短期误差, 运用小波阈值滤波方法进行处理。通过 GPS/MIMU 组合导航仿真实验表明, 对 MIMU 误差信号建模和噪声滤除可以有效提高组合性能, MIMU 信号经过预处理后的组合位置误差在 GPS 信号有效时, 组合的定位误差由 10 m 降低到 8 m 左右, 而且在 30 s 的 GPS 信号丢失的过程结束时, 纬度、经度和高度的累积误差分别由 200 m、300 m 和 200 m 减少到 50 m 左右, 误差减小了近 80%。

参考文献:

- [1] CZOMPO T. Use of spectral methods in strapdown ISS data processing[J]. *J. Geodesy*, 1991, 65(2): 122-129.
- [2] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. *IEEE*, 1966, 54(2): 221-230.
- [3] IEEE standard specification format guide and test procedure for linear, Single-Axis, Non-gyroscopic Accelerometers [S]. *IEEE Std*, 1999, 1293-1998.
- [4] 成礼智. 小波的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
CHENG L Z. *Theory and application of wavelet*[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [5] DONOHO D L. De-noising via soft thresholding[J]. *IEEE Trans. Info. Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [6] SKALLOUD J; BRUTON A M, SCHWARZ K. Detection and filtering of short-term (1/f) noise in inertial sensor [J]. *J. Inst. Navig.*, 1999, 46(2): 97-107.
- [7] SARDY S. Minimax threshold for denoising complex signal with waveshrink[J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2000, 48(4): 422-428.
- [8] 解旭辉, 刘危, 张明亮, 等. 微惯性测量组合关键技术与应用[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(2): 154-159.
XIE X H, LIU W, ZHANG M L, et al.. Key technologies and applications of micromechanical inertial measurement units[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (2): 154-159. (in Chinese)
- [9] 高宪军, 翟林培. GPS/INS 组合导航系统的研究[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(2): 146-150.
GAO X J, ZHAI L P. GPS/INS integrated navigation system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (2): 146-150. (in Chinese)

作者简介: 马建军 (1980—), 男, 湖南洪江人, 在读博士研究生, 研究方向为惯性导航、组合导航与信息融合; E-mail: mjj460@163.com

郑志强 (1965—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 研究方向为导航、制导与控制; E-mail: xyzheng@sohu.com