

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0083- 06

无缝 GPS/ INS 组合导航系统的设计与实现*

何晓峰, 胡小平, 唐康华

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对 GPS 卫星信号失锁条件下 GPS/ INS 组合导航性能大幅度下降的缺点, 设计了一种基于 ANFIS 的无缝组合导航方法, 当卫星数目不低于 4 颗时采用伪距/ 伪距率的卡尔曼滤波算法, 一旦卫星数目少于 4 颗时采用 ANFIS 系统估计导航误差, 抑制 INS 的误差积累, 从而实现无缝导航。动态车载实验表明, 该方法切实可行, 相对于传统的紧组合方法, 有效地提高了组合导航系统的定位精度和抗干扰能力。

关键词: 组合导航; 卡尔曼滤波; 自适应神经模糊推理系统; 无缝; 紧组合

中图分类号: V241. 5 文献标识码: A

Design and Evaluation of a Seamless GPS/ INS Integrated Navigation System

HE Xiao-feng, HU Xiao-ping, TANG Kang-hua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new seamless integrated navigation algorithm was proposed on the basis of ANFIS in order to enhance the performance of GPS/ INS integrated navigation system during GPS outages. The algorithm adopted Kalman filter with pseudorange and pseudorange rate observations when the number of GPS satellites was not less 4. Otherwise, ANFIS was used to estimate the navigation errors and restrain the increasing INS errors. Experiments show that the new algorithm can improve the performance of integrated system effectively and enhance the horizontal position accuracy than traditional tight integration algorithms.

Key words: integrated navigation; kalamm filtering; adaptive neuro-fuzzy inference system; seamless; tight integration

GPS(Global Positioning System) 以其全球性、全天候、低成本、高精度且误差随时间不积累等优点成为目前应用最广泛的一种导航系统, 但是 GPS 存在信号容易受干扰、动态性能差、输出频率低等不足。惯性导航系统 INS(Inertial Navigation System) 作为一种完全自主、不与外界发生光电联系的导航系统, 具有良好的隐蔽性、强抗干扰性、高机动和完整的导航信息等优点。INS 的主要缺点是误差随时间积累增长和每次使用前需要进行初始对准。对比分析 GPS 和 INS 各自的优缺点, 可知二者具有天然的、完美的互补性质, 这使 GPS/ INS 组合导航成为可能。20 世纪 80 年代以来, 现代控制理论的巨大成就和计算机技术的进步为 GPS/ INS 组合导航系统的产生和发展提供了理论基础与技术保障。美、德、英、法等国的军方和民用部门从一开始就十分重视 GPS/ INS 组合导航系统的研究, 投入了大量的精力研发可靠实用的组合导航系统, 取得了丰硕的成果。30 多年来, 组合导航已成为最具发展应用潜力的导航技术之一, GPS/ INS 组合导航系统广泛应用于飞机导航与精密进场着陆、导弹精确制导、卫星定轨定姿、航天航空遥感、舰船导航、重力测量、智能交通等海陆空天领域。

然而, 当飞机做大机动飞行、导弹进入充斥电子干扰的敌占区、车辆驶入高楼林立的城市“峡谷”时, 由于 GPS 卫星信号受遮挡、干扰或处于高动态环境中, 容易发生卫星信号失锁现象, 此时系统一般工作于纯惯性导航方式, 定位精度将随时间迅速降低。这种组合导航系统性能下降的状况, 对于机载、舰载等武器平台是不能容忍的, 在战时将是致命的隐患; 对于航空重力测量来说, 将导致测量精度下降甚至测量结果不可用。因此, 应用领域迫切需要实现 GPS/ INS 组合系统的无缝导航。近年来, 无缝导航已成为组合导航系统发展的必然趋势和研究热点。

* 收稿日期: 2007- 08- 12

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA12Z319); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20069998009)

作者简介: 何晓峰(1979-), 男, 博士生。

为实现无缝导航,提高卫星失锁条件下组合导航系统的精度,国内外学者提出了许多解决方法,这些方法大致分为两类。第一类方法采用人工智能来辅助卡尔曼滤波算法^[1-7],由于这类方法主要基于位置速度的松组合方式,当卫星数目低于4颗时,GPS接收机无法解算位置速度信息,所以利用神经网络或模糊推理系统输出的预测值作为卡尔曼滤波器的观测值;或者是在卫星失锁期间直接使用神经网络代替卡尔曼滤波器,一旦卫星信号恢复,重新启用卡尔曼滤波器进行组合导航。该类方法过分依赖于人工智能方法,没有充分利用卫星的资源。第二类方法采用伪距/伪距率的紧组合导航方式^[8,10],充分利用GPS资源,即使只接收到一颗卫星信号也可以进行组合导航计算。该类方法可以在一定程度上减小卫星失锁导致的系统误差增长,但是当接收到的卫星信号质量不高时,引入较大的观测误差,系统精度可能得不到改善,反而还会下降。

结合上述两类方法各自的优势,本文研究基于自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neural-fuzzy Inference System, ANFIS)的紧组合导航方法,在可用卫星不少于4颗时采用伪距/伪距率的卡尔曼滤波器,并且训练神经网络得到有效的ANFIS系统,在卫星失锁时利用ANFIS系统估计导航误差,从而实现无缝导航。

1 无缝组合导航原理

所谓无缝导航是指在导航过程中按照载体需求以一定频率不间断地输出满足精度要求的导航参数^[13]。根据定义,无缝GPS/INS组合导航在卫星信号质量降低或失锁的情况下,系统仍能保证导航精度不降低,直至卫星信号恢复。

无缝GPS/INS组合导航系统主要由INS、GPS天线、接收机和导航计算机组成。INS根据惯性测量元件(IMU)测量得到的三轴角速率、比力信息进行导航解算,得到载体的位置、速度和姿态角信息。GPS天线接收来自卫星的射频信号,传输至GPS接收机,接收机将射频信号下变频为中频信号,再进行信号捕获、跟踪、解码,得到每颗卫星的星历、伪距、伪距率、载波相位等数据,当锁定卫星数目不少于4颗时,利用最小二乘法可解算出天线的位置、速度信息。导航计算机接收INS和GPS接收机的输出信息,采用无缝导航算法进行信息融合,输出位置、速度和姿态信息。

以紧组合为例,导航信息融合作为无缝组合导航的核心,主要由卡尔曼滤波器、ANFIS系统和综合模块三部分组成。卡尔曼滤波器以INS的误差方程和器件误差模型作为系统状态方程,以伪距/伪距率的INS估计值与GPS接收机测量值之差作为观测量,对于状态方程和观测方程进行离散化,输入初始参数驱动滤波器,就可以对GPS/INS数据进行最优估计和误差估计。ANFIS系统能够较好地非线性系统进行建模,惯性导航是典型的非线性系统,因此利用训练数据建立模糊推理结构,采用神经网络训练模糊推理隶属度函数,使模糊推理系统稳定且满足精度要求,从而得到可用的ANFIS系统。该ANFIS系统对输入的INS导航信息进行在线估计,输出导航误差。综合模块根据卫星状态信息对卡尔曼滤波与ANFIS系统的输出信息进行加权计算作为导航误差的估计值,并且将导航信息通过反馈回路校正INS的导航解算,从而抑制惯性导航的发散。

图1为无缝组合导航的原理框图,其中 ρ_{GPS} 、 $\dot{\rho}_{GPS}$ 分别为GPS测量得到的伪距、伪距率值, ρ_{INS} 、 $\dot{\rho}_{INS}$ 分别为INS估计得到的伪距、伪距率值。相对于传统的组合导航系统,该原理框图增加了ANFIS系统与综合模块。

2 组合导航算法设计

2.1 ANFIS系统

组合导航技术的智能化是未来发展的趋势之一^[11]。ANFIS系统把模糊推理与神经网络

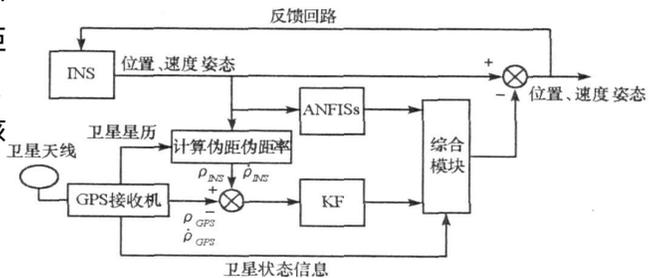


图1 无缝组合导航原理框图

Fig. 1 Structure of seamless integrated navigation

络融为一体^[1],利用神经网络的自学习功能来训练模糊推理中隶属度函数的参数,优化蕴涵经验知识的 if-then 模糊规则。

首先,对于输入的位置、速度姿态数据按照网络分割的方法建立一个初始的模糊推理系统。图 2 为一个两输入 x, y , 单输出 f 的模糊推理系统,对于一阶 T-S 模糊模型^[12],第 i 条 if-then 普通模糊规则 R_i 为

$$R_i: \text{if } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ then } f_i = p_i x + q_i y + r_i \quad (1)$$

其中, A, B 分别为输入 x, y 的模糊集合。

ANFIS 网络结构中第 1、4 层的结点为自适应结点,第 2、3、5 层的结点为固定结点。第 1 层中 A, B 的隶属函数可以是任意的参数化隶属函数,例如取钟型函数

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{(x - c_i)/a_i}{b_i} \right|^{2b_i}} \quad (2)$$

其中, $\{a_i, b_i, c_i\}$ 为待辨识的前提参数;第 2 层结点均为求积计算,第 3 层结点对于输入进行归一化计算,输出称为归一化激励强度;第 4 层结点计算如式(1)所示;第 5 层结点为求和计算

$$f = \sum [(w_{1x}) p_i + (w_{1y}) q_i + w_{1r} r_i] = M\rho \quad (3)$$

其中, ρ 为待辨识的结论参数集 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 。

其次,对于输入的位置、速度姿态数据,若固定前提参数,则采用最小二乘法求得(3)式的最优解

$$\hat{\rho} = (A^T A)^{-1} A^T f \quad (4)$$

若固定(4)式得到的结论参数,采用神经网络的 BP 算法,将误差反传并应用最速下降法可以更新前提参数。将上述计算不断进行迭代,直至模糊推理系统的误差满足设定的精度要求,于是得到优化的前提参数和结论参数,从而确定了 ANFIS 系统。

最后,利用核对数据来检验模型及其参数的有效性,一旦确认有效,ANFIS 系统就可以融入无缝导航系统进行使用。

对于无缝组合导航系统而言,输入的数据包含 INS 在静止、匀速直线运动、变速运动、转弯等各种情况下的典型数据,数据量应适中,若过大将增加系统的复杂性。第 1 层结点均采用(2)式的钟型函数。

对于位置、速度、姿态共 9 个导航参数,采用上述方法以导航参数为输入量,以对应的导航参数误差为输出量,分别建立 9 个 ANFIS 系统即得到图 1 中的 ANFISs。

2.2 紧组合的卡尔曼滤波器设计

导航解算采用地球固联坐标系,相对于当地水平坐标系具有系统误差模型简单、计算速度快和精度高等优点。取组合系统的 17 维误差状态为

$$X = [\delta\varphi \quad \delta r \quad \delta v \quad \delta\omega \quad \delta g \quad \delta a_u \quad \delta a_{ru}]^T \quad (5)$$

其中, $\delta\varphi$ 为失准角, δr 为位置误差, δv 为速度误差, $\delta\omega$ 为陀螺漂移, δg 为加速度计零偏, δa_u 为接收机钟差误差, δa_{ru} 为接收机钟差漂移误差。

中高精度的陀螺加速度计的器件误差和接收机钟差、钟差漂移,可以近似认为是随机过程,所以应用一阶高斯马尔可夫过程建立误差方程。将系统误差状态方程表述成矩阵形式为

$$\dot{X}(t) = F(t) X(t) + G W(t) \quad (6)$$

其中,系统矩阵 $F(t)$ 、系统噪声 $W(t)$ 和系数矩阵 G 的具体形式详见文献[10]。

对于第 i 颗卫星而言,利用 INS 估计得到的伪距减去 GPS 测量得到的伪距,并且线性化可得到伪距的观测方程,同理可以得到伪距率的观测方程,写成矩阵形式如下:

$$Y_i(t) = H_i(t) X(t) + \eta_i \quad (7)$$

其中, $Y_i(t) = [\delta\rho_i \quad \delta\dot{\rho}_i]^T$ 为伪距伪距率误差, $\eta_i = [v_{\rho} \quad v_{\dot{\rho}}]^T$ 为观测噪声,系数矩阵为

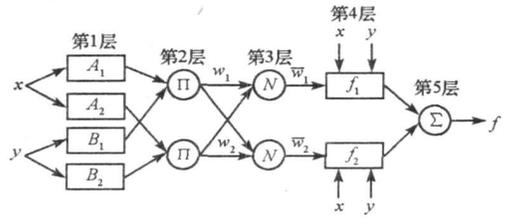


图 2 ANFIS 系统的网络结构图
Fig. 2 Scheme of an ANFIS

$$H_i(t) = \begin{pmatrix} 0_{1 \times 3} & e_{i1} & e_{i2} & e_{i3} & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 6} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 0 & 0 & e_{i1} & e_{i2} & e_{i3} & 0_{1 \times 6} & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$[e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3}]$ 为接收机至第 i 颗卫星的单位方向矢量。

联立所有观测到的卫星观测方程即为卡尔曼滤波器的观测方程。将系统误差方程与观测方程离散化,得到离散化的状态空间模型,应用卡尔曼滤波算法进行导航误差的最优估计,具体计算公式见文献[8-10]。

2.3 综合模块的设计

综合模块的设计主要考虑以下因素:可见卫星数目;卫星信号质量;ANFIS系统应用的风险性。设计原则为在保证可靠性的基础上提高系统精度。

由于卡尔曼滤波算法在噪声为理想情况下理论上是最优的,当可见卫星数目不少于4颗时,采用基于紧组合方式的卡尔曼滤波器是十分可靠的,工程应用较多。如果由于各种原因卫星信号质量降低,则伪距/伪距率观测量的噪声将增大,从而降低卡尔曼滤波的精度,因此一般工程中对仰角低于 10° 或者信号处理增益低于40dB的卫星剔除不用,以免引入较大的测量误差。虽然利用大量典型数据对于ANFIS系统进行了训练,得到了满意的系统参数,但是在实际系统中由于载体自身或外界存在众多随机干扰和不确定性因素,如果仅仅使用ANFIS将给组合导航系统带来较大的风险。

鉴于以上分析,假设 S 为综合模块的输出向量, O_{KF} 为卡尔曼滤波器的输出, O_{ANFIS} 为ANFIS系统的输出,则

$$S = \begin{cases} O_{KF} & \text{可用卫星数目} \geq 4 \\ O_{ANFIS} & \text{其他情况} \end{cases} \quad (8)$$

其中,可用卫星是指满足信号质量的卫星。

3 实验结果与分析

组合导航系统的INS由导航级精度的二频激光陀螺和石英加速度计组成;GPS采用低成本ALLSTARGPS接收机,水平定位精度10m,高程精度12m,测速精度0.2m/s。基准位置速度由NovAtelOEM4构成的差分GPS系统提供,位置精度优于0.1m,速度精度为0.02m/s。实验于2006年4月8日在长沙市星沙开发区开阔的国家级公路上进行,实验车辆为依维柯。

为便于评测系统精度,将位置速度误差从地球固联坐标系转换到当地水平坐标系。设计了两种条件下的实验方案,第一种方案GPS信号失锁30s;第二种方案GPS信号失锁300s。通过对两种实验方案的结果进行分析比较来检验算法的性能。

第一种实验方案:GPS信号失锁30s。图3为在GPS时间533771~533800s共计30s卫星失锁情况下,采用1颗卫星的卡尔曼滤波器与ANFIS系统输出的位置、速度误差曲线比较图。更为详细的统计结果见表1,其中对于分别采用卡尔曼滤波器使用1、2、3颗卫星、不使用卫星(卫星数为0)的最优预测和采用ANFIS系统的五种状况进行了位置、速度误差精度的对比。

第二种实验方案:GPS信号失锁300s。图4为在GPS时间533501~533800s共计300s卫星失锁情况下,采用2颗卫星的卡尔曼滤波器与ANFIS系统输出的位置、速度误差曲线比较图。类似于表1,表2对于五种数据融合算法进行了位置、速度误差精度的对比。

从纵向来看,在两种方案中,ANFIS系统估计的位置、速度精度相对于卡尔曼滤波方法有较大的提高;随着可见卫星的减少,卡尔曼滤波方法观测方程不断减少,系统可观性逐渐减弱,组合导航系统精度不断降低。

从横向比较两种实验方案可知,随着卫星失锁时间的延长,采用卡尔曼滤波器的位置、速度精度快速下降,而ANFIS系统位置、速度精度相当,没有明显的降低,这是由于ANFIS系统是经过卫星信号未失锁时的大量有效数据训练且已稳定的。

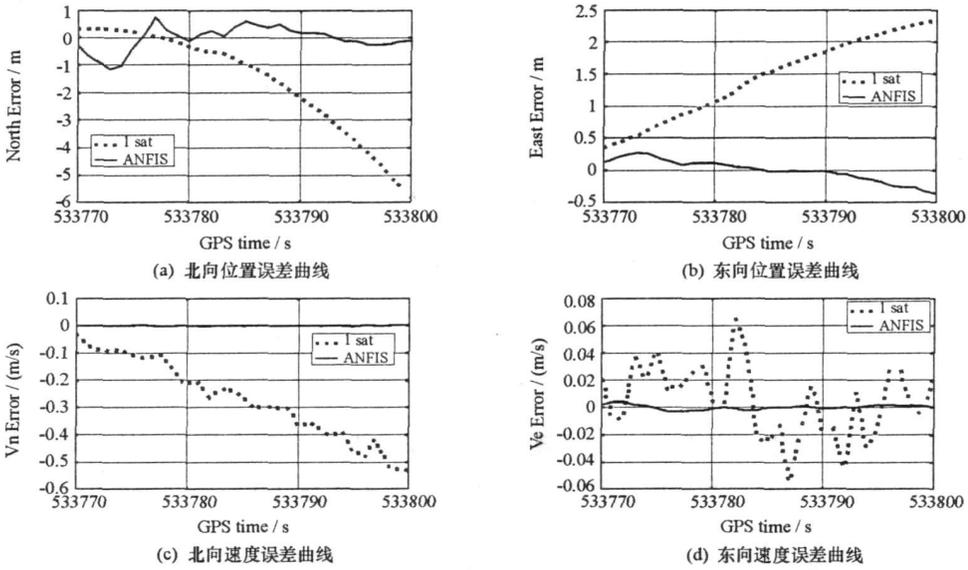


图 3 卫星失锁 30s 时系统的位置、速度误差曲线

Fig. 3 Position and velocity error values during 30s outage

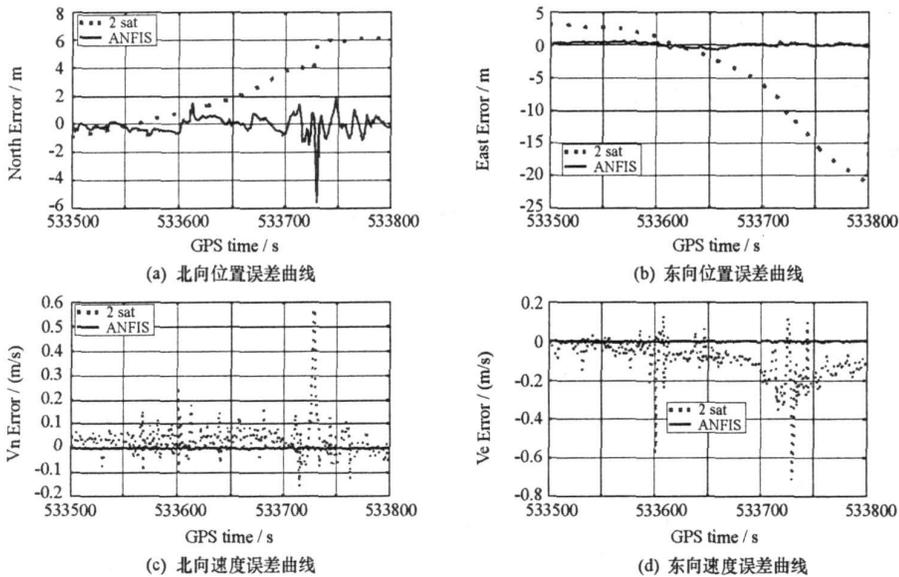


图 4 卫星失锁 300s 时系统的位置、速度误差曲线

Fig. 4 Position and velocity error values during 300s outage

表 1 卫星失锁 30s 时系统的位置、速度误差

Tab. 1 Position and velocity error values during 30s outage

状况	位置误差(m)				速度误差(m/ s)			
	北向		东向		北向		东向	
	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max
0sat	4.60	9.91	4.90	11.11	0.39	0.67	0.06	0.11
1sat	2.51	5.82	1.57	2.32	0.31	0.53	0.03	0.07
2sat	1.69	2.97	0.51	0.71	0.12	0.21	0.26	0.39
3sat	2.33	4.14	2.89	6.03	0.32	0.58	0.13	0.21
ANFIS	0.45	1.14	0.17	0.36	0.001	0.003	0.002	0.004

表2 卫星失锁 300s 时系统的位置、速度误差

Tab.2 Position and velocity error values during 300s outage

状况	位置误差(m)				速度误差(m/s)			
	北向		东向		北向		东向	
	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max
0sat	85.98	121.05	96.25	128.59	6.012	11.808	1.513	2.571
1sat	23.05	27.13	7.30	8.83	0.248	0.798	0.108	0.672
2sat	3.44	6.16	9.05	21.26	0.079	0.570	0.133	0.715
3sat	1.97	5.43	4.73	9.29	0.078	0.483	0.079	0.603
ANFIS	0.66	5.61	0.31	0.79	0.003	0.014	0.003	0.023

4 结论

基于 ANFIS 系统和紧组合方式, 提出并实现了一种 GPS/INS 无缝组合导航方法。此方法在卫星数目不足 4 颗时, 主要采用 ANFIS 系统估计系统误差, 从而保证了在 GPS 短时间内不可用条件下的组合导航系统精度。

(1) 卫星信号良好时, ANFIS 系统得到了实时训练, 关键参数得到实时、有效更新, 保证了 ANFIS 系统的可靠性;

(2) 卫星信号失锁时, 采用 ANFIS 系统代替卡尔曼滤波进行组合导航计算, 方法简单易行, 而且保证了组合导航的高精度。

在以上研究的基础上, 进一步研究 ANFIS 系统与卡尔曼滤波器的综合加权计算方法, 对于推广应用用于低成本的微惯性测量单元/GPS 组合导航系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] Hiliuta A, Landy R, Jr, Gagnon F. Fuzzy Corrections in a GPS/INS Hybrid Navigation System[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 591-599.
- [2] Abdel-hamid W. Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications[D]. University of Calgary, 2005.
- [3] 陶俊勇, 温熙森, 陶利民. 组合导航系统的神经元信息融合模型[J]. 国防科技大学学报, 2002, 22(3): 81-85.
- [4] Wang J H. Intelligent MEMS INS/GPS Integration For Land Vehicle Navigation[D]. University of Calgary, 2006.
- [5] Abdel-hamid W, Abdelazim T, El-sheimy N, et al. Improvement of MEMS-IMU/GPS Performance Using Fuzzy Modeling[J]. GPS Solution, 2006, 10(1): 1-11.
- [6] El-sheimy N, Chiang K W, Noureldin A. The Utilization of Artificial Neural Networks for Multisensor System Integration in Navigation and Positioning Instruments[J]. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2006, 55(5): 1606-1615.
- [7] Mosavi M R. Comparing DGPS Corrections Prediction Using Neural Network, Fuzzy Neural Network, and Kalman Filter[J]. GPS Solution, 2006, 10(2): 97-107.
- [8] 王艳东. 智能 GNSS/INS 组合导航系统应用研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.
- [9] 李涛, 吴美平, 江明. 激光陀螺 SINS/GPS 组合导航车载试验系统[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 104-108.
- [10] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [11] HE Xiaofeng, HU Xiaoping, WU Meiping. Trends in GNSS/INS Integrated Navigation Technology[J]. Coordinates, 2007, 3(3): 26-28.
- [12] Yue J, Liu J, Liu X. Identification of Nonlinear System Based on ANFIS with Subtractive Clustering[C]//The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 2006.
- [13] Hosokawa Y, Takahashi N, Taga H. A System Architecture for Seamless Navigation[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004.