

基于方差分量估计的自适应融合导航

杨元喜¹, 高为广²

(1. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 2. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

Integrated Navigation by Using Variance Component Estimates of Multi-sensor Measurements and Adaptive Weights of Dynamic Model Information

YANG Yuan-xi¹, GAO Wei-guang²

(1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract :The accuracy of the measurement vectors of the multi-sensor is usually different. In order to balance the contributions of the various navigation sensors to the last output, the principle of variance components estimation is applied. An integrated navigation estimator is given at first, based on the multi-sensor measurements. The variance components are applied for optimal balance of the contributions of the local navigation outputs that resulted from measurement vectors of the multi-sensors. On the basis of the integrated navigation output, the kinematic predicts are fused by using an adaptive filtering principle. An integrated navigation example by using simulated data is performed and analyzed.

Key words :integrated navigation; multi-sensor; variance component estimation; adaptive data fusion

摘 要 :多源传感器观测信息的精度一般不一致,利用方差分量估计理论可以合理地顾及各传感器观测信息在融合导航解中的权比。首先给出基于多源观测信息的融合导航解算模式,进而基于方差分量估计讨论了各传感器观测信息在融合导航解中的合理平衡问题,然后应用自适应因子顾及动力学模型预报信息的贡献,给出了计算过程,并利用模拟数据进行了试算与比较。

关键词 :组合导航;多传感器;方差分量估计;自适应融合

1 引 言

多传感器组合导航是导航定位发展的趋势。多传感器组合导航观测信息丰富且各传感器的观测信息一般不具有相同类型的系统误差,于是多传感器融合导航可为减弱各传感器系统误差提供

辅助信息,并为诊断和剔除各传感器异常误差和状态异常误差提供冗余信息,从而从整体上提高导航定位的精度和可靠性。多传感器导航一般采用分布式滤波(distributed filtering 或 decentralized filtering)^[1]或联邦滤波(federated filtering)^[2~4]。

多传感器导航的分布式滤波可分为两个阶段, 首先基于观测方程和动力模型进行局部滤波, 然后进行整体滤波。这种滤波计算量大, 且容错能力差^[4]。

近 10 多年来, 基于信息分享原理的联邦滤波受到了重视^[2, 4]。联邦滤波的基本思想是, 先利用主传感器(或称参考传感器)进行主滤波(MF = master filter), 利用各独立传感器观测信息及相应的局部状态方程进行局部滤波(LF = local filter), 然后基于主滤波结果和各局部滤波结果进行综合加权滤波。从表面上看, 这种滤波省时, 近似最优。但是联邦滤波法隐含一个假设前提, 即各局部状态方程应该是互相独立的, 实际上, 多传感器的观测信息可以保证是独立的, 但状态方程是载体的运动方程, 既然多传感器相应于同一载体, 则不可能有多个互相独立的状态方程, 而且在每个观测历元均有新的状态估值, 加上同一载体的运动方程误差, 则多传感器的局部滤波之间均含有前一个历元的状态估值误差和载体运动方程的误差^[5], 但联邦滤波法在第二阶段的整体滤波时并未考虑各局部滤波输出量之间的相关性。文献[6]研究了局部滤波器之间的相关性, 但解算显得过于复杂, 本文作者曾给出了动、静态滤波融合导航解^[7], 但未考虑各传感器信息的最优平衡问题。

本文采用 Carlson 的联邦滤波思想, 提出了基于各传感器观测信息融合的滤波解, 并基于方差分量估计平衡各传感器观测信息在最终融合导航结果中的权比。这种融合滤波解能克服各局部导航解之间的相关性, 从而保证了最终融合解的严格性、合理性和可靠性。

2 基于方差分量估计的多传感器融合导航

设某载体上有 r 个传感器 1, 2, ..., r , 对于载体导航, 我们一般只关心载体的位置、速度和加速度, 于是在理论上, 同一载体的多个导航传感器应具有相同的位置、速度和加速度, 即使多传感器不能位于同一位置, 也可根据其几何关系化算至同一位置。设在 t 时刻各传感器观测向量 $L_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, r$), 相应的协方差矩阵 $\Sigma_j(t)$, 载体从 $t-1$ 到 t 时刻的状态转移向量为 $X(t)$, 则状态方程和观测方程为

$$\bar{X}(t) = \Phi_{t, t-1} \hat{X}(t-1) + w(t) \quad (1)$$

$$L_j(t) = A_j(t) \hat{X}(t) + \Delta_j(t) \quad (2)$$

式中, $\Phi_{t, t-1}$ 为状态向量的转移矩阵, $w(t)$ 为状态误差向量, 其协方差矩阵为 $\Sigma_w(t)$, $A_j(t)$ 为设计矩阵, $\Delta_j(t)$ 为 $L_j(t)$ 的误差向量。

为了合理地利用各传感器的导航解, 可先由各传感器观测信息及相应的观测方程(2)求得观测历元的局部导航解或抗差导航解 \hat{X}_j 和相应的协方差矩阵 $\Sigma_{\hat{X}_j}$ 或权矩阵 $P_{\hat{X}_j}$, 并进行简单融合, 得

$$\hat{X}^0 = P_{\hat{X}^0}^{-1} (P_{\hat{X}_1} \hat{X}_1 + \dots + P_{\hat{X}_r} \hat{X}_r) \quad (3)$$

式中

$$P_{\hat{X}^0} = \sum_{j=1}^r P_{\hat{X}_j} \quad (4)$$

然而, 仅由各局部传感器的输出量 \hat{X}_j 和 $P_{\hat{X}_j}$ 进行简单融合有时是不够的。因为各局部传感器输出量难以可靠、合理地估计自身的可靠性, $\Sigma_{\hat{X}_j}$ 和 $P_{\hat{X}_j}$ 仅反映各传感器内部观测信息的精度(离散程度), 不能反映该传感器在融合导航解中的可靠性。于是, 有必要采用方差分量估计重新调整各传感器导航输出量的权矩阵。为此, 可构造如下极值条件

$$\Omega = \sum_{j=1}^r V_j^T \tilde{P}_j V_j = \min \quad (5)$$

式中, \tilde{P}_j 为经方差分量估计调节后的观测权矩阵。基于此可得融合导航解为

$$\hat{X}^0 = \left(\sum_{j=1}^r A_j^T \tilde{P}_j A_j \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^r A_j^T \tilde{P}_j L_j \right) \quad (6)$$

利用方差分量估计原理^[8, 9], 可得融合导航解的迭代解为

$$\begin{aligned} \hat{X}^k &= \left(\sum_{j=1}^r A_j^T \tilde{P}_j^k A_j \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^r A_j^T \tilde{P}_j^k L_j \right) = \\ & \left(\sum_{j=1}^r N_j^k \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^r U_j^k \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$N_j^k = A_j^T \tilde{P}_j^k A_j \quad U_j^k = A_j^T \tilde{P}_j^k L_j \quad (8)$$

$$\tilde{P}_j^k = (\hat{\sigma}_j^2)^k \Sigma_j^{-1} \quad (9)$$

$$(\hat{\sigma}_j^2)^k = \frac{(V_j^k)^T \tilde{P}_j^{k-1} V_j^k}{r_j} \quad (10)$$

$$r_j = n_j - \text{tr}(N_j^k (N^k)^{-1}) \quad (11)$$

$$N^k = \sum_{j=1}^r N_j^k \quad (12)$$

式中, Σ_j^{-1} 为初始协方差矩阵的逆, n_j, r_j 分别为 L_j 的维数和多余观测数。

基于式(7)求得的 \hat{X}^k 的协方差阵为

$$\Sigma_{\hat{X}^k} = \left(\sum_{j=1}^r N_j^k \right)^{-1} \hat{\sigma}_0^2 \quad (13)$$

式中

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^r \mathbf{V}_j^T \hat{\mathbf{P}}_j \mathbf{V}_j}{\sum_{j=1}^r n_j - m} \quad (14)$$

m 为未知参数个数。

如此求得的融合导航解不仅保证了融合导航解的可靠性,而且保证了各局部导航解输出量在最终融合解中的合理贡献。

3 考虑动力学模型的自适应融合导航解

由式(7)求得的融合导航解中不含有动力学模型信息,为合理利用动力学模型信息,可采用自适应估计原理^[5,10]。

由式(1)可写出 t 时刻动力学模型信息的预报方程

$$\bar{\mathbf{X}}(t) = \Phi_{t,t-1} \hat{\mathbf{X}}(t-1) \quad (15)$$

$$\Sigma_{\bar{\mathbf{X}}(t)} = \Phi_{t,t-1} \Sigma_{\hat{\mathbf{X}}(t-1)} \Phi_{t,t-1}^T + \Sigma_{\mathbf{u}(t)} \quad (16)$$

将 $\hat{\mathbf{X}}^k$ 写成 $\hat{\mathbf{X}}(t)$, $\Sigma_{\hat{\mathbf{X}}^k}$ 写成 $\Sigma_{\hat{\mathbf{X}}(t)}$, 则自适应融合解为

$$\hat{\mathbf{X}}_t = (\alpha \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}(t)} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}(t)})^{-1} (\alpha \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}(t)} \bar{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}(t)} \hat{\mathbf{X}}(t)) \quad (17)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{X}}_t} = (\alpha \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}(t)} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}(t)})^{-1} \quad (18)$$

式中

$$\mathbf{P}_{\bar{\mathbf{X}}(t)} = \Sigma_{\bar{\mathbf{X}}(t)}^{-1} \quad \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}(t)} = \Sigma_{\hat{\mathbf{X}}(t)}^{-1} \quad (19)$$

α 为自适应因子^[10],其表达式为

$$\alpha = \begin{cases} 1 & |\Delta \bar{\mathbf{X}}| \leq c_0 \\ \frac{c_0}{|\Delta \bar{\mathbf{X}}|} \left(\frac{c_1 - |\Delta \bar{\mathbf{X}}|}{c_1 - c_0} \right) & c_0 < |\Delta \bar{\mathbf{X}}| \leq c_1 \\ 0 & |\Delta \bar{\mathbf{X}}| > c_1 \end{cases} \quad (20)$$

式中, $c_0 = 1.0 \sim 1.5$, $c_1 = 3.0 \sim 4.5$, $|\Delta \bar{\mathbf{X}}|$ 为

$$|\Delta \bar{\mathbf{X}}| = \|\bar{\mathbf{X}}(t) - \hat{\mathbf{X}}(t)\| / \sqrt{\text{tr}(\Sigma_{\bar{\mathbf{X}}(t)})} \quad (21)$$

上述基于多传感器观测信息的融合方法计算相对简单,理论严密。基于观测信息的融合可保证各局部融合导航解之间不相关。如果状态先验权矩阵和各传感器观测向量的先验权矩阵稳定可靠,则基于式(3)的融合解简单直观,若验前协方差矩阵或权矩阵不可靠,则必须采用方差分量估计重新估计各传感器观测向量的权矩阵,并用自适应估计方法调节状态预测信息的权矩阵。

4 计算与比较

假设载体在 X 轴, Y 轴和 Z 轴方向的运动模

型分别如下

$$X = 12t + \frac{1}{2} a_x t^2$$

$$Y = 15t + \frac{1}{2} a_y t^2$$

$$Z = 13t + \frac{1}{2} a_z t^2$$

式中, t 表示时间, X , Y 和 Z 表示相应轴向的位置,单位为 m , a 为加速度扰动,下标 x , y 和 z 表示轴向,加速度扰动分别满足 $a_x \sim N(0, 0.1 \text{ m}^2)$, $a_y \sim N(0, 0.2 \text{ m}^2)$ 和 $a_z \sim N(0, 0.15 \text{ m}^2)$,三个观测系统同时对 X 方向、 Y 方向和 Z 方向上的位置进行连续观测,其采样间隔为 1 s 。且每个观测系统各分量在每个历元模拟 5 个观测值。观测量在 X 方向、 Y 方向和 Z 方向上的取值分别如下。

传感器 1

$$X_{1j} = X + e_{X_{1j}}$$

$$Y_{1j} = Y + e_{Y_{1j}}$$

$$Z_{1j} = Z + e_{Z_{1j}}$$

传感器 2

$$X_{2j} = X + e_{X_{2j}}$$

$$Y_{2j} = Y + e_{Y_{2j}}$$

$$Z_{2j} = Z + e_{Z_{2j}}$$

传感器 3

$$X_{3j} = X + e_{X_{3j}}$$

$$Y_{3j} = Y + e_{Y_{3j}}$$

$$Z_{3j} = Z + e_{Z_{3j}}$$

式中, e 表示观测噪声,下标 j 表示某个传感器序号。各式中的噪声项 e 满足均值为零,方差取值分别如下

$$\Sigma_1 = \begin{bmatrix} 5 & & \\ & 10 & \\ & & 8 \end{bmatrix} \quad (\text{m}^2)$$

$$\Sigma_2 = \begin{bmatrix} 10 & & \\ & 5 & \\ & & 6 \end{bmatrix} \quad (\text{m}^2)$$

$$\Sigma_3 = \begin{bmatrix} 12 & & \\ & 8 & \\ & & 9 \end{bmatrix} \quad (\text{m}^2)$$

基于以上运动模型和位置观测模型,连续生成 2 000 s 的观测值,其中在 500 ~ 600 s, 1 200 ~ 1 600 s 之间载体变速运动。系统噪声矩阵取为

$$\Sigma_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} Q \Delta t^3 & \frac{1}{2} Q \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} Q \Delta t^2 & Q \Delta t \end{bmatrix}$$

式中,速度谱密度 Q 可以取 $0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ 。位置和速度初始方差分别取 0.2 m^2 和 $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 。共进行如下 3 个方案的解算。

- 方案 1 :Carlson 联邦滤波融合。
- 方案 2 基于方差分量估计的融合。
- 方案 3 顾及动力学模型的自适应方差分量估计融合。

由于 X 、 Y 和 Z 轴方向误差图类同,在此只列出 X 轴方向误差图,见图 1 至图 3。

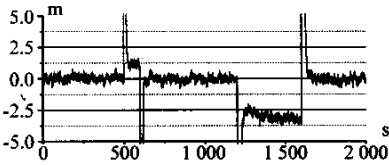


图 1 联邦滤波融合导航解误差
Fig.1 Error of federated filter outputs

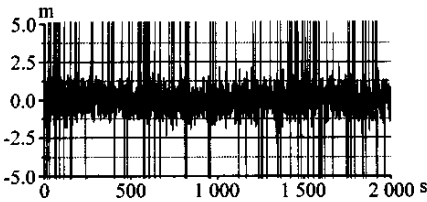


图 2 基于方差分量估计的融合导航解误差
Fig.2 Error of integrated navigation outputs based on variance component estimation

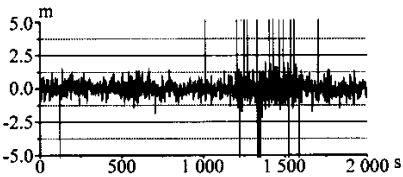


图 3 顾及动力学模型的自适应融合导航解误差
Fig.3 Error of adaptively integrated navigation outputs combining kinematic model information

分析上述计算结果,可以看出:

- 当载体观测存在异常或状态产生异常扰动时,联邦滤波融合解的容错性极差,于是对于高精度导航,这种融合算法不可取。
- 基于方差分量估计融合导航解合理调整了各传感器的权比,保证了各局部传感器导航解

在融合解中的合理贡献。
3. 顾及动力学模型的方差分量估计融合解,通过自适应因子 α 合理利用动力学模型预报信息,进一步提高了融合导航解的精度,见图 3 及表 1 最后一列。

表 1 各种融合解中误差比较
Tab.1 Standard error comparison m

中误差	联邦滤波	方差分量估计融合	顾及状态方程融合
σ_x	46.481	0.774	0.462
σ_y	135.088	0.747	0.541
σ_z	45.764	0.745	0.477

4. 基于式(10)、式(11)的方差分量估计虽然能重新平衡各传感器的信息使用效率,但应用方差分量估计的前提是,每个传感器必须有足够的观测信息,否则估计的方差分量的可靠性较差,导致权矩阵不可靠。对于多传感器导航定位,若个别传感器的观测信息不丰富,则此时不能采用方差分量估计调整各传感器观测信息。

综上所述,当载体观测信息的先验方差不可靠或状态方程产生异常扰动时,联邦滤波融合解不能较好地平衡各传感器的合理贡献,也不能抑制异常的影响。而基于方差分量估计融合算法在有足够观测信息的情况下,不仅计算简单、易于实现,而且实时、合理地分配了各传感器观测信息在融合解中的贡献,自适应地合理地利用了动力学模型信息,达到优化融合的目的,其融合导航解具有较强的先验方差调节功能和自适应功能。在组合导航融合解算法中,不失为一种值得参考的方法。

参考文献：

[1] KERR T. Decentralized Filtering and Redundancy Management for Multisensor Navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems , 1987 , 23(1) 83-119.
[2] CARLSON N A. Federated Filter for Fault-Tolerant Integrated Navigation System[A]. Proceedings of Position Location and Navigation Symposium[C]. [s. l.] [s. n.],1988.
[3] CARLSON N A. Federated Filter for Computer-Efficient , Near-Optimal GPS Integration[A]. Proceedings of IEEE DLANS '96[C]. [s. l.] [s. n.],1996 , 306-314.

- [4] CARLSON N A ,BERARDCCI M P. Federated Kalman Filter Simulation Results. Navigation[J]: Journal of Institute of Navigation , 1994 , 41(3) : 297-321.
- [5] YANG Y , XU T , HE H. On Adaptively Kinematic Filtering[J]. Selected Papers for English of Acta Geodetica et Cartographica Sinica , 2001 , 25-32.
- [6] LIU G. Data Processing and Simulation of Integrated Navigation Systems[D]. Zhenzhou : Institute of Surveying and Mapping , Information Engineering University , 2002.
- [7] YANG Y. Kinematic and Static Filtering for Multi-sensor Navigation Systems[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University , 2003 , 28(4) : 386-388.
- [8] KOCH K R. Einfuehrung in die Bayes-Statistik[M]. Berlin , Heidelberg , New York : Springer , 2000.
- [9] KOCH K R , KUSCHE J. Regularization of Geopotential Determination from Satellite Data by Variance Component[J]. Journal of Geodesy , 2002 , 76 : 259-268.
- [10] YANG Y , HE H , XU G. Adaptively Robust Filtering for Kinematic Geodetic Positioning[J]. Journal of Geodesy , 2001 , 75(2/3) : 109-116.
- [11] YANG Y , XU T. An Adaptive Kalman Filter Based on Sage Windowing Weights and Variance Components[J]. The Journal of Navigation , 2003 , 56(2) : 231-240.

欢迎订阅《测绘学报》

《测绘学报》创刊于 1957 年 ,是由中国科协主管 ,中国测绘学会主办的反映我国测绘科学技术发展水平的国家级综合性学术刊物 ,影响因子和被引频次居中文核心期刊测绘类首位 ,是我国最具影响力的测绘期刊 ,是中国科技期刊影响因子前 40 名中的惟一的测绘期刊。也是我国提交国际测绘科技交流的主要文献。

《测绘学报》发表中、英两种文字的论文 ,着重报道我国测绘科技最新的重要研究成果及其应用 ,内容涉及大地测量、工程测量、遥感、航空摄影测量、地图学、地理信息系统、矿山测量、海洋测绘、地籍测绘、地图印刷、测绘仪器 ,信息传输等测绘学科及其相关相邻学科。荣获中国科协的优秀学术期刊奖 ,被多个国际检索系统所收录。

《测绘学报》设有学术论文、测绘工程研究、博士论文摘要、测绘信息动态等栏目。

《测绘学报》(季刊) ,定价 :6.00 元 ,邮发代号 :2-224。

编辑部地址 :北京复外三里河路 50 号 ,邮编 :100045 ,电话 :010-68531317(兼传真)(010)68531192

作者：[杨元喜](#)，[高为广](#)
作者单位：[杨元喜\(西安测绘研究所, 陕西, 西安, 710054\)](#)，[高为广\(信息工程大学, 测绘学院, 河南, 郑州, 450052\)](#)
刊名：[测绘学报](#) 
英文刊名：[ACTA GEODAETICA ET CARTOGRAPHICA SINICA](#)
年，卷(期)：2004, 33(1)
被引用次数：39次

参考文献(11条)

1. [KERR T](#) [Decentralized Filtering and Redundancy Management for Multisensor Navigation](#) 1987(01)
2. [CARLSON N A](#) [Federated Filter for Fault-Tolerant Integrated Navigation System](#) 1988
3. [CARLSON N A](#) [Federated Filter for Computer-Efficient, Near-Optimal GPS Integration](#)[外文会议] 1996
4. [Carlson N A;BERARDCI M P](#) [Federated Kalman Filter Simulation Results](#) [Navigation](#) 1994(03)
5. [YANG Y;XU T;He H](#) [On Adaptively Kinematic Filtering](#) 2001
6. [Liu G](#) [Data Processing and Simulation of Integrated Navigation Systems](#) 2002
7. [YANG Y](#) [Kinematic and Static Filtering for Multi-sensor Navigation Systems](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2003(04)
8. [KOCH K R](#) [Einfuehrung in die Bayes-Statistik](#) 2000
9. [KOCH K R;KUSCHE J](#) [Regularization of Geopotential Determination from Satellite Data by Variance Components](#) 2002
10. [YANG Y;HE H;Xu G](#) [Adaptively Robust Filtering for Kinematic Geodetic Positioning](#)[外文期刊] 2001(75)
11. [YANG Y;XU T](#) [An Adaptive Kalman Filter Based on Sage Windowing Weights and Variance Components](#) [外文期刊] 2003(02)

本文读者也读过(8条)

1. [杨元喜](#) [动态定位自适应滤波解的性质](#)[期刊论文]-[测绘学报](#)2003, 32(3)
2. [杨元喜](#). [张菊清](#). [张亮](#). [YANG Yuan-xi](#). [ZHANG Ju-qing](#). [ZHANG Liang](#) [基于方差分量估计的拟合推估及其在GIS误差纠正的应用](#)[期刊论文]-[测绘学报](#)2008, 37(2)
3. [高为广](#). [杨元喜](#). [张双成](#). [GAO Wei-guang](#). [YANG Yuan-xi](#). [ZHANG Shuang-cheng](#) [基于当前加速度模型的抗差自适应Kalman滤波](#)[期刊论文]-[测绘学报](#)2006, 35(1)
4. [杨元喜](#). [何海波](#). [徐天河](#) [论动态自适应滤波](#)[期刊论文]-[测绘学报](#)2001, 30(4)
5. [刘长建](#). [柴洪洲](#). [吴洪举](#). [马高峰](#). [LIU Chang-jian](#). [CHAI Hong-zhou](#). [WU Hong-ju](#). [MA Gao-feng](#) [扩展的Helmert型方差分量估计公式](#)[期刊论文]-[测绘学报](#)2008, 37(1)
6. [高为广](#). [原亮](#). [杨华](#). [GAO Wei-guang](#). [YUAN Liang](#). [YANG Hua](#) [BP神经网络在GPS导航中的应用](#)[期刊论文]-[测绘工程](#)2006, 15(5)
7. [杨元喜](#). [高为广](#) [基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2004, 29(10)
8. [杨元喜](#). [高为广](#). [YANG Yuanxi](#). [GAO Weiguang](#) [两种渐消滤波与自适应抗差滤波的综合比较分析](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2006, 31(11)

1. [黄贤源, 隋立芬, 范玉茹](#) [基于噪声随机模型的加权观测融合方法](#)[期刊论文]-[测绘科学技术学报](#) 2009(1)
2. [韩厚增, 王坚](#) [自适应UKF在GNSS/INS紧组合导航中的应用研究](#)[期刊论文]-[大地测量与地球动力学](#) 2013(6)
3. [王炯琦, 矫媛媛, 周海银](#) [基于UKF神经网络的姿态测量信息融合算法](#)[期刊论文]-[系统仿真学报](#) 2010(10)
4. [杨帅, 王民北, 贾娟, 柏溢](#) [智能车载终端数据处理优化设计](#)[期刊论文]-[电视技术](#) 2006(11)
5. [王炯琦, 周海银, 赵德勇, 吴翊](#) [多姿态敏感器测量的信息融合定姿方法研究](#)[期刊论文]-[上海航天](#) 2009(6)
6. [张显云](#) [基于抗差方差分量的自适应联合平差及其应用](#)[期刊论文]-[测绘通报](#) 2008(8)
7. [刘志平, 张书华](#) [方差-协方差分量估计的概括平差因子法](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2013(8)
8. [王坚, 许长辉, 高井祥](#) [GPS/GALLIEO导航系统的抗差EKF模型研究](#)[期刊论文]-[测绘科学](#) 2009(6)
9. [柴艳菊, 欧吉坤](#) [GPS/DR组合导航中一种新的数据融合算法](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2005(12)
10. [蒋庆仙](#) [关于MEMS惯性传感器的发展及在组合导航中的应用前景](#)[期刊论文]-[测绘通报](#) 2006(9)
11. [王坚, 王金岭, 高井祥](#) [基于抗差EKF的GNSS导航模型研究](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2008(4)
12. [高为广, 杨元喜, 崔先强, 张双成](#) [IMU/GPS组合导航系统自适应Kalman滤波算法](#)[期刊论文]-[地球空间信息科学学报\(英文版\)](#) 2007(1)
13. [YANG Yuanxi, GAO Weiguang](#) [A new learning statistic for adaptive filter based on predicted residuals](#)[期刊论文]-[自然科学进展\(英文版\)](#) 2006(8)
14. [高为广, 杨元喜, 崔先强, 张双成](#) [IMU/GPS组合导航系统自适应Kalman滤波算法](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2006(5)
15. [王双红, 聂建亮](#) [自适应交互集合Kalman滤波的动态精密单点定位](#)[期刊论文]-[自动化仪表](#) 2013(5)
16. [杨元喜, 张晓东](#) [基于严密Helmert方差分量估计的动态Kalman滤波](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(9)
17. [肖胜红, 边少锋, 黄晓颖](#) [利用ICCP的水下地磁修正惯导方法研究](#)[期刊论文]-[舰船电子工程](#) 2011(5)
18. [林雪原, 何友](#) [三星定位性能分析及其与SINS的融合方法](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2008(2)
19. [GUO Hang, YU Min, GAO Weiguang, LIU Jingnan](#) [Integrated Data Processing Method for GPS and INS Field Test over Rocky Mountain](#)[期刊论文]-[地球空间信息科学学报\(英文版\)](#) 2006(4)
20. [高为广, 张双成, 王飞, 王利](#) [GPS导航中的抗差自适应Kalman滤波算法](#)[期刊论文]-[测绘科学](#) 2005(2)
21. [李成仁, 岳东杰, 于双, 赵元忆](#) [自适应方差分量估计方法在GPS/GLONASS组合单点定位中的应用](#)[期刊论文]-[勘察科学技术](#) 2013(5)
22. [段举举, 沈云中](#) [GPS / GLONASS组合静态相位相对定位算法](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2012(6)
23. [张艳, 石晟玮, 郭军海](#) [基于样条约束的弹道融合抗差估计方法](#)[期刊论文]-[弹道学报](#) 2011(1)
24. [张菊清, 张亮](#) [基于Helmert方差分量估计的拟合推估法及其在地图数字化误差纠正中的应用](#)[期刊论文]-[测绘通报](#) 2008(2)
25. [聂建亮, 程传录, 郭春喜, 蒋光伟](#) [基于粒子群优化算法的多因子自适应滤波](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2013(2)
26. [郭海荣, 杨元喜, 何海波, 徐天河](#) [导航卫星原子钟Kalman滤波中噪声方差-协方差的确定](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2010(2)
27. [崔先强, 杨元喜](#) [分类因子自适应抗差滤波](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2006(4)
28. [CUI Xianqiang, YANG Yuanxi](#) [Adaptively robust filtering with classified adaptive factors](#)[期刊论文]

文]-[自然科学进展 \(英文版\)](#) 2006 (8)

29. 蔡艳辉, 程鹏飞 [GNSS接收机伪距和载波相位测量噪声直接估计方法](#)[期刊论文]-[计量学报](#) 2013 (3)
30. 王志刚, 边少锋 [基于ICCP算法的重力辅助惯性导航](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2008 (2)
31. 杨元喜, 高为广 [基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(信息科学版\)](#) 2004 (10)
32. 曾安敏, 张丽萍 [多种序贯平差方法的比较](#)[期刊论文]-[大地测量与地球动力学](#) 2007 (2)
33. 杨元喜, 张菊清, 张亮 [基于方差分量估计的拟合推估及其在GIS误差纠正的应用](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2008 (2)
34. 曾安敏, 张丽萍 [多种序贯平差方法的比较](#)[期刊论文]-[大地测量与地球动力学](#) 2007 (2)
35. 孙小荣 [GPS/GIS集成环境下的车载定位与地图匹配模型研究](#)[学位论文]硕士 2005
36. 聂建亮, 张卉 [基于自适应Kalman滤波的BP神经网络在导航中的应用](#)[期刊论文]-[大地测量与地球动力学](#) 2007 (3)
37. 聂建亮, 张卉 [基于自适应Kalman滤波的BP神经网络在导航中的应用](#)[期刊论文]-[大地测量与地球动力学](#) 2007 (3)
38. 张晓东, 杨元喜, 崔先强 [可量测影像序列的组合定位算法及其在1:50 000地图测绘中的应用](#)[期刊论文]-[测绘学报](#) 2010 (3)
39. 高为广 [自适应融合导航理论与方法及其在GPS和INS中的应用](#)[学位论文]硕士 2005
40. 杨元喜, 张丽萍 [中国大地测量数据处理60年重要进展第一部分:函数模型和随机模型进展](#)[期刊论文]-[地理空间信息](#) 2009 (6)
41. 孙中苗 [航空重力测量理论、方法及应用研究](#)[学位论文]博士 2004

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_chxb200401004.aspx