

多源融合导航技术综述*

赵万龙, 孟维晓, 韩 帅
(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

摘 要: 随着定位与导航技术的快速发展, 基于位置的服务给人们带来越来越好的用户体验。但是单一的导航源往往达不到用户的精度要求, 同时也不具备足够好的鲁棒性和可靠性。多源融合导航基于信息融合技术, 将来自不同导航源的同构或者异构的导航信息按照相应的融合算法进行融合, 从而得到最佳的融合结果。相对于传统的单一导航源, 多源融合导航可以充分利用每一个导航源的优势, 从而提供最好的定位与导航服务。对多源信息融合以及多源融合导航技术进行分析和概述, 同时阐述常用的多源融合算法及多源融合导航的性能评估。

关键词: 定位与导航; 信息融合; 多源融合导航; 融合算法

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: CN11-1780(2016)06-0054-07

A Survey of Multi-source Information Fusion Navigation

Zhao Wanlong, Meng Weixiao, Han Shuai
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With the rapid development of positioning and navigation technologies, Location Based Services (LBS) have provided better and better experiences for users. However, single positioning source cannot always meet the precision requirement, meanwhile, the robustness and reliability are not considerable enough. Based on the information fusion technology, homogeneous and heterogeneous information from different navigation sources is fused in the multi-source data fusion navigation to achieve the best fusion result. Compared with traditional single source based navigation, multi-source information fusion navigation takes full advantage of all fusion sources. Data fusion and multi-source data fusion navigation are analyzed and summarized in this paper as well as multi-source fusion algorithm and its performance evaluation.

Key words: Positioning and navigation; Information fusion; Multi-source information fusion navigation; Fusion algorithm

引 言

随着信息技术的快速发展, 基于位置的服务 LBS (Location Based Services) 已成为目前的一个热门研究方向^[1]。以往的导航服务基本上采用一种导航手段进行定位, 其在适用范围上往往受到局限, 精度上也有待提高。结合信息融合技术, 采取多源信息融合导航则可以解决上述问题。

信息融合又称数据融合, 是一种多层次、多方面的处理过程。信息融合技术首先在军事领域诞生, 至今已有 40 余年的历史。信息融合通过对数据进行检测、相关组合与估计, 进而提高状态估计精度^[2]。将信息融合技术应用在导航领域, 采用多源融合导航手段进行定位, 可以解决单一导航源定位精度不高的问题, 提高导航系统的可靠性和鲁棒性。本文将从多源信息融合技术的发展概述出发, 分析多源融合导航的技术特点, 系统地介绍多源融合导航系统中可用导航源分析、融合导航架构、多源融合算法以及性能评估。

1 信息融合技术发展概述

信息融合是指对多个载体内的信息进行综合、处理以达到某一目的。随着计算机技术、信息技术

* 基金项目: 国家重大专项子课题 (NO.2014ZX03004003)

收稿日期: 2016-06-30

以及传感器技术的发展,信息融合技术能够综合处理不同信息源在时间及空间上的数据信息,并且得出对被测对象或目标一致性的估计或描述,这种估计或描述较单一信息源有更高的可靠性和更小的模糊度^[3]。

自从信息融合诞生以来,一直都是人们研究的热点技术。上个世纪九十年代,信息融合技术更是被美国列为最优先发展的二十项关键技术之一。现如今,信息融合技术广泛应用于海洋监视、遥测遥感、空地防御系统以及多源融合导航等领域^[4,5]。1973 年,以 Bar-shalom 对“概率数据互联滤波器”的研究为标志^[6],信息融合技术正式形成。在学术研究领域,信息融合技术受到了广泛的关注。

《Information Fusion》期刊于 1998 年正式成立,时刻关注信息融合领域的最新研究成果。近年来,国际上亦有大量的文章对信息融合技术进行了研究。例如文献[7]提出了一种基于最小线性方差的最优集中式信息融合估计方法,文献[8]对意见发掘和信息融合的关系进行了深入的讨论,文献[9]对基于矩阵因式分解的信息融合技术展开了深入研究等等。相比国外,国内虽然对信息融合技术的研究起步较晚,但是也已经取得了大量的成果。潘泉等人发表了《多源信息融合理论与应用》、《数据融合技术及其应用》、《多源遥感影像数据融合技术》等专著^[10-12]。李方伟等人在文献[13]中对基于信息融合的网络安全态势评估模型进行了设计,文献[14]则提出了一种动态适应的无线传感器网络数据融合算法。

虽然关于信息融合技术的研究在国内外都已经取得了巨大成果,但仍然有很多内容值得深入研究和探讨,如信息融合在多源融合导航技术中的应用。本文重点对多源融合导航技术及信息融合在多源融合导航中的应用进行分析和介绍。

2 多源融合导航概述

2.1 全源导航介绍

2010 年 11 月,美国国防部高级研究计划局(DARPA)首次提出全源导航 ASPN(All Source Positioning and Navigation)的概念^[15]。全源导航旨在研究低成本、高鲁棒性的无缝导航手段。在我国,近年来伴随着北斗发展战略研究工作的开展,很多单位、学者就全源导航发表了自己的观点。在科技部、基金委“十三五”战略研究中,有较强的声音主张在“十三五”部署全源导航方面的研究课题。

美国的全源导航是针对美军在地下、水下、室内、城市、高山峡谷、GPS 服务被干扰、被阻断等场景下的导航定位问题而提出的。目前,在不存在一种普适的导航定位手段的背景下,我国对全源导航的研究主要是通过对多种导航数据源进行融合,进而达到导航定位目的。全源导航与传统的多源融合导航的区别在于,全源强调的是一般性,而多源强调的是其中的特殊性。在全源定位导航系统中,定位算法所面临的变量是所有可能的变量,这种算法具有非常强的普适性。而多源系统,可以理解为是全源系统的一种特殊情况。多源融合导航可以作为全源导航研究的基础和前提,关于多源融合导航的研究将会为我国未来全源导航技术的发展奠定坚实的基础。

2.2 可用导航源分析

在分析多源融合导航技术之前,首先需要了解都有哪些导航源可以用来实现多源融合。现有的导航系统种类多样,例如卫星导航、惯性导航、光/声学导航、重力/磁力导航以及典型室内定位方法等等。下面对这些导航手段进行简单介绍。

2.2.1 卫星导航

卫星导航系统由三个部分组成,分别为导航卫星、地面台站以及用户定位设备。卫星导航有多普勒测速、时间测距等方法。多普勒测速是用户测量实际接收到的信号频率与卫星发射的频率之间的多普勒频移,并根据卫星的轨道参数算出用户的位置。时间测距则是通过测量卫星信号的传播时间,继而通过特定方程式的数学模型计算,得出用户位置信息。

典型的卫星导航系统包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO、中国的北斗卫星导航系统^[16]、日本的 QZSS 准天顶定位系统以及印度的 IRNSS 等等。每一种卫星导航系统都具有各自

的特点, 在未来可以共同为全球提供稳定的卫星导航服务。

2.2.2 惯性导航

惯性导航技术是通过陀螺和加速度计测量目标的角速率和加速度, 然后通过积分运算计算出目标的位置信息以及速度信息^[17]。惯性导航的基本原理如图 1 所示。在 x 轴和 y 轴方向上分别对分项加速度求积分, 从而得到速度信息。然后在已知初始速度的情况下再次求积分, 得到测量目标的位置坐标 (x, y) 。

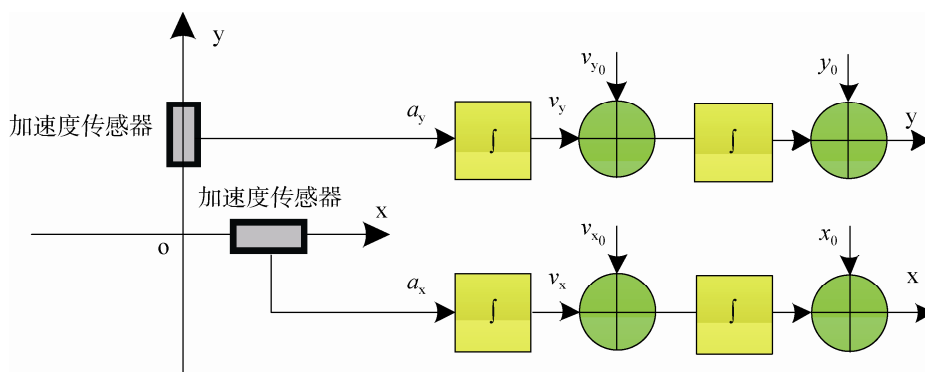


图 1 惯性导航基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of inertial navigation

2.2.3 光/声学导航

光学导航主要为可见光通信定位^[18], 可见光通信定位将配备信号控制装置的 LED 灯发光的明暗变化作为 ID 信号发送, 接收到 ID 信号的便携终端将其转换成位置信息。该技术的定位精度约为 1m。

声学导航系统主要应用于水下潜艇的定位。与其他导航系统相比, 声学导航具有以下优点: 既可以用于水面, 也可以用于水下导航; 能够实时准确地测量载体的速度、艏向等信息。

2.2.4 重力/磁力导航

重力导航是在重力测量、重力异常及垂线偏差的测量和补偿的基础上发展起来的。磁力导航则是根据地球上不同位置的地磁场各不相同, 首先采用地磁传感器测量地磁矢量数据库, 然后在线定位时根据匹配算法, 将实时测量的地磁场与地磁矢量数据库进行比对, 从而获取当前用户位置信息。

重力/磁力导航的基本原理都属于模型匹配定位。首先离线构造重力/磁力场模型, 然后在线进行匹配定位。其基本原理如图 2 所示。

2.2.5 典型室内定位方法

得益于卫星导航系统的存在, 室外定位很大程度上满足了人们对定位导航服务的要求。但是由于室内环境中可见星的遮挡问题, 卫星导航无法使用。目前室内定位方法主要包括无线传感器网络定位、超宽带定位、蓝牙定位、WLAN 定位等等。其中 WLAN 定位具有定位成本低、实现方便的特点, 被认为是最具有前景的定位手段^[19]。WLAN 室内定位主要有基于匹配算法的指纹定位和基于接收信号强度 RSS (Received Signal Strength) 测距的无线定位^[20]。

2.3 多源融合导航架构

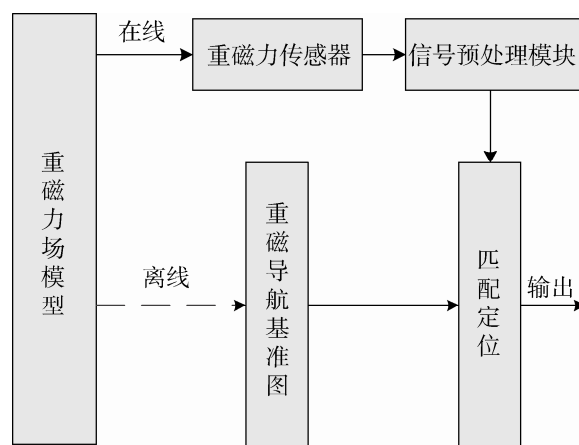


图 2 重力/磁力导航基本原理

Fig. 2 Schematic diagram of gravity and magnetism navigation

根据多源融合导航的特点,本文提出一种多源融合导航的总体框架,如图3所示。首先搜集可用的导航源作为初始融合源,对导航源按照其定位原理进行分类,得到抽象融合源。然后经过数据优化选择,对抽象源进行优化。经过了优化的数据源根据其属性特点,选择相应的融合算法进行融合处理。最终输出融合结果,同时进行数据反馈。

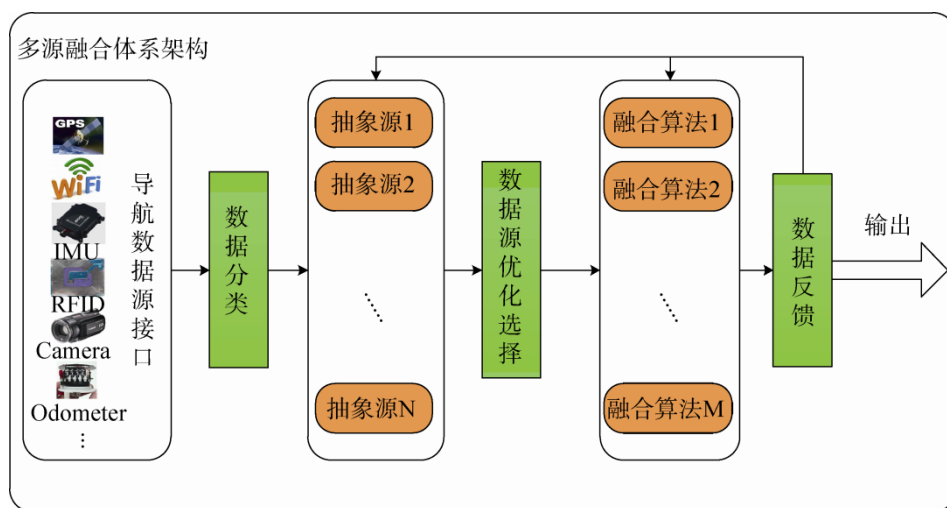


图3 多源融合体系结构

Fig. 3 Multi-source fusion structure

3 多源融合算法

在多源融合导航系统中,多源融合算法是充分利用导航源实现融合定位的关键步骤。下面就几种典型的融合算法进行介绍。

3.1 加权融合算法

加权算法是一种最简单直观的融合算法。在加权融合算法中,将多个融合源提供的位置信息分别冠以相应的权重,从而获取最后的融合结果^[21]。其基本原理如图4所示。

融合结果 $F(x)$ 可以表示为

$$F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \cdots + w_n f_n(x) \quad (1)$$

其中, $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ 表示融合单元, w_1, w_2, \dots, w_n 表示权重因子,且需要满足所有权重因子的和为1。

加权融合具有算法简单、实现方便的特点,但是当权重因子选取不当的时候,并不能获得较佳的融合结果。

3.2 基于贝叶斯估计的滤波融合算法

贝叶斯统计理论相对于经典统计理论的主要优势是,其对先验知识进行了充分的利用,将每一次检验过程动态地认为是对先验知识的不断修正过程。贝叶斯估计方式充分利用先验信息,系统预测准确,但是它需要明确地了解量测的先验模型,而在实际应用中较难取得所有传感器的先验信息。

针对线性高斯系统,其概率密度函数可以由均值和方差表示。此时采用卡尔曼滤波估计状态的最小方差,可以得出最优结果。事实上,作为贝叶斯滤波的一个特例,卡尔曼滤波就是在线性滤波的前提下,以最小均方误差为最佳准则。采用最小均方误差作为最佳准则是因为在这种准则下的理论比较简单。对于非线性系统来说,贝叶斯滤波中的状态后验概率密度函数将难以求解。为此,贝叶斯滤波的各种近似解相继出现,例如扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波、粒子滤波等等。

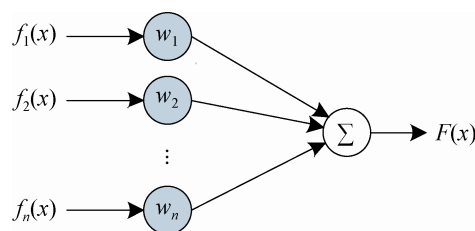


图4 加权融合算法原理

Fig. 4 Schematic diagram of weight-based fusion algorithm

在多源融合导航系统中, 基于卡尔曼滤波的联邦滤波器已广泛使用。不同于传统的集中式卡尔曼滤波器, 联邦滤波是一种分散化卡尔曼滤波^[22]。分散化滤波一般用于大系统中, 它解决了大系统存在的状态估计等问题, 并降低了计算量, 防止过大的高阶运算量, 同时具有容错性能好、设计灵活等特点, 非常适合多源融合定位中的信息融合处理。联邦滤波器工作流程主要分为四个步骤, 分别为信息分配、时间更新、量测更新和信息融合。通过以上四个过程, 即便在卡尔曼子滤波器中部分信息丢失, 也可以在融合过程重新合成, 从而得到全局最优解。多源融合导航系统中的联邦滤波器基本原理如图 5 所示。

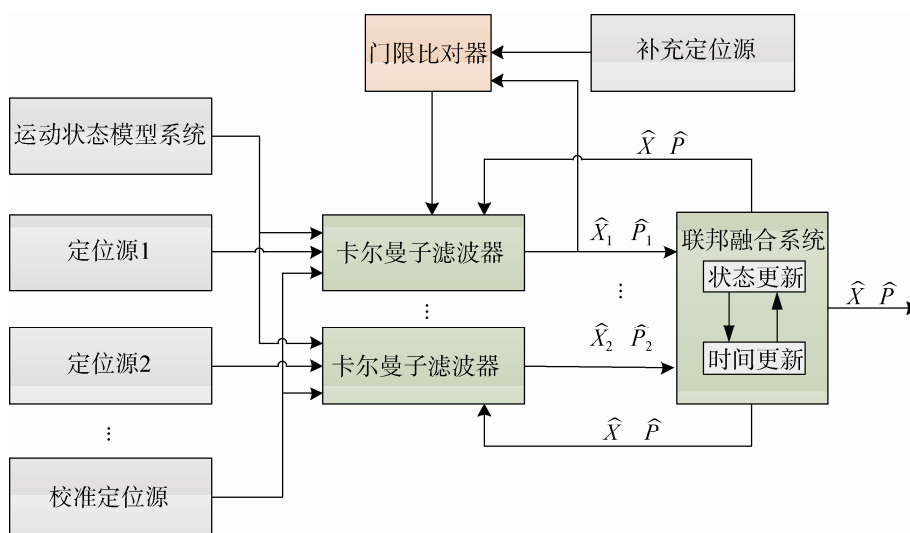


图 5 联邦滤波器原理

Fig. 5 Schematic diagram of federated filter

3.3 基于因子图的融合算法

因子图是指基于贝叶斯网络或者马尔科夫随机游走模型的概率图像模型。以全局函数 $g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 为例, 其为具有 5 个变量的实值函数, 将其分解为 5 个局部函数之积。

$$g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = f_A(x_1)f_B(x_2)f_C(x_1, x_2, x_3)f_D(x_3, x_4)f_E(x_3, x_5) \quad (2)$$

因子图的因式分解特性为多源信息融合的精度提高提供了可能性^[23]。在基于因子图的多源融合导航算法中, 将每一个导航源视作一个变量节点, 变量节点在函数节点实现局部融合, 最终通过基于和积算法的消息传递过程, 得到最终的融合结果。基于因子图的多源融合算法基本原理如图 6 所示。图中初始状态为 x_k^0 , 在 f_w 节点加入噪声 w_k 得到下一个状态 x_k^1 。在 f 节点加入融合源 $\varphi_{x_k}^1, \varphi_{x_k}^2, \dots, \varphi_{x_k}^n$, 进而得到融合结果 x_k^n 。当添加和删除导航源时, 启用或者弃用相应的函数节点。在融合过程中, 充分利用因子图的这一特性, 可以实现多源融合导航的即插即用性^[24]。

3.4 交互式多模型融合算法

交互式多模型算法是一种高效的混合估计方案, 已经成功应用于很多问题。交互式多模型算法是一种具有马尔科夫切换系数的算法, 其估计算法采取递推形式, 主要分为四个步骤, 分别是模型条件初始化、

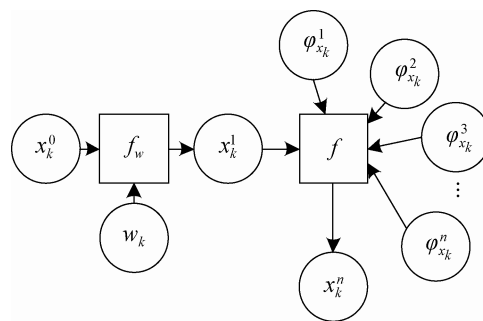


图 6 基于因子图的多源融合算法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of factor graph based multi-source fusion algorithm

模型条件滤波、模型概率更新以及估计融合。交互式多模型融合算法基本原理如图 7 所示。

此种算法性能非常依赖于所使用的模糊集，而大量模型在提高估计精度的同时也带来了极大的计算量，所以模糊集的选取是交互式多模型算法研究中的重要问题。

4 多源融合导航的性能评估

一般来说，信息融合的性能评估体系主要包括五类指标，分别是完整性、正确性、通用性、连续性和及时性。而在多源融合导航中，由于导航系统的独特性，定位精度成为性能评估的首要指标，也是导航服务评价体系中最直观的体现；同时多源融合导航还要兼具完好性、连续性、可靠性以及鲁棒性等性能。值得一提的是，除了这些传统的性能以外，一些学者借鉴硬件中的即插即用性指标，提出了多源融合导航系统的即插即用性要求。即插即用性可用于评价添加和删除导航源过程中融合系统的适配性。

多源融合导航性能可以采用蒙特卡洛方法进行评估。蒙特卡洛方法又称为统计实验法，它依据大数定律，采用统计抽样理论近似求解。在多源融合导航系统中，首先建立概率模型，进而得到统计抽样，再用得到的数据进行性能评估分析。蒙特卡洛方法适应性强，可以在计算机上大量重复实验，在多源融合导航的性能评估中发挥着重要的作用。

5 结束语

多源融合导航技术由于其精度上优于单一导航源，并且具备更好的鲁棒性以及可靠性，在未来将会得到更多的研究和发展。本文从信息融合技术出发，阐述了信息融合的研究背景和基本原理，继而探讨了多源融合导航技术。首先介绍了全源导航的概念，然后在分析目前可用的多种导航源之后，提出了一种多源融合导航的架构体系。之后探讨了多源融合导航的核心内容——多源融合算法，阐述了四种典型的多源融合算法的基本原理。最后分析了多源融合导航的性能评估指标和方法，完善了多源融合导航研究的结构体系。在未来，多源融合导航技术有两方面需要深入研究的内容：其一是根据不同的实际应用场景设计自适应的融合导航系统；其二是基于多源融合导航技术，开展全源导航研究，实现导航系统一体化。

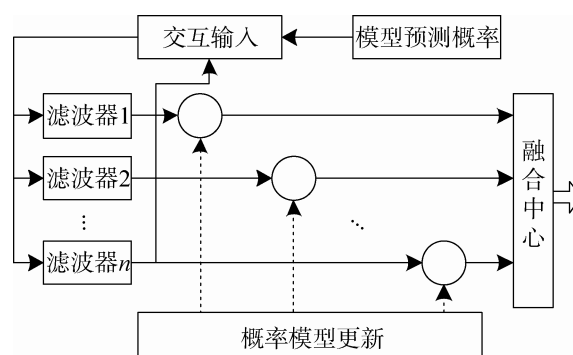


图 7 交互式多模型融合算法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of interacting multiple model fusion algorithm

参考文献

- [1] Shin K G, Ju Xiaoen, Chen Zhigang, Hu Xin. Privacy Protection for Users of Location-based Services[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2012, 19(1): 30–39.
- [2] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Han Chongzhao, Zhu Hongyan, Duan Zhansheng. Multi-source Information Fusion[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [3] Khaleghi Bahador, et al. Multisensor Data Fusion: a Review of the State-of-the-art[J]. Information Fusion, 2013, 14(1): 28–44.
- [4] Zheng Y F. Integration of Multiple Sensors into a Robotic System and Its Performance Evaluation[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989, 5(5):658–669.
- [5] Da R, Lin C F. A New Failure Detection Approach and Its Application to GPS Autonomous Integrity Monitoring[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1995, 31(1): 499–506.
- [6] Bar-Shalom Y. Extension of the Probabilistic Data Association Filter in Multi-target Tracking[C]//The 5th Symposium

- on Nonlinear Estimation, 1974: 16–21.
- [7] Tian T, Sun S, Li N. Multi-sensor Information Fusion Estimators for Stochastic Uncertain Systems with Correlated Noises[J]. Information Fusion, 2016, 27: 126–137.
- [8] Balazs J A, Velásquez J D. Opinion Mining and Information Fusion: a Survey[J]. Information Fusion, 2016, 27: 95–110.
- [9] Zitnik M, Zupan B. Data Fusion by Matrix Factorization[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 36(1): 41–53.
- [10] 潘泉, 等. 多源信息融合理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Pan Quan, et al. Multi-source Information Fusion Theory and Its Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [11] 康耀红, 蔡希尧. 数据融合技术及其应用[J]. 计算机科学, 1994, 21(5): 64–66.
- [12] 贾永红. 多源遥感影像数据融合技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2005.
Jia Yonghong. Data Fusion Technique for Multisource Remotely Sensed Images[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2005.
- [13] 李方伟, 张新跃, 朱江, 等. 基于信息融合的网络安全态势评估模型[J]. 计算机应用, 2015, 35(7): 1882–1887.
Li Fangwei, Zhang Xinyue, Zhu Jiang, et al. Network Security Situational Awareness Model Based on Information Fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(7): 1882–1887.
- [14] 乐俊, 张维明, 肖卫东, 等. 无结构动态适应无线传感器网络数据融合算法[J]. 通信学报, 2012, (9): 53–65.
Yue Jun, Zhang Weiming, Xiao Weidong, et al. Structure-free and Dynamic-adaptive Data Fusion Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Journal on Communications, 2012, (9): 53–65.
- [15] Zhou Y B, Lai J, Guo Xiye, et al. A Research on All Source Navigation and Positioning and Its Critical Technology[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume III, Springer Berlin Heidelberg, 2015: 801–808.
- [16] 刘基余. 北斗卫星导航系统的现况与发展[J]. 遥测遥控, 2013, 34(3).
Liu Jiyu. Status and Development of the Beidou Navigation Satellite System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2013, 34(3).
- [17] Woodman O J, Woodman C O J. An Introduction to Inertial Navigation[R]. University of Cambridge, 2007.
- [18] 江运力. 室内可见光通信定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
Jiang Yunli. Indoor Visible Light Communication Position Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [19] Talvitie J, Renfors M, Lohan E S. Distance-based Interpolation and Extrapolation Methods for RSS-based Localization with Indoor Wireless Signals[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1340–1353.
- [20] Xia Ying, Ma Lin, Zhang Zhongzhao, Zhou Caifa. WLAN Indoor Positioning Algorithm Based on Semi-supervised Manifold Learning[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 7(7).
- [21] Zhe Dong, Wu Y, Sun D. Data Fusion of the Real Time Positioning System Based on RSSI and TOF[C]//Proceeding of Intelligent Human Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2013, 503–506.
- [22] Xu Y, Liang X. Information Fusion for Radar/Infrared Compound Seeker Based on Federated Filter[J]. International Journal of Digital Content Technology & Its Applications, 2011, 5(4): 218–229.
- [23] Aliaksei Makarau, Palubinskas G, Reinartz P. Alphabet-based Multisensory Data Fusion and Classification Using Factor Graphs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 6(2): 969–990.
- [24] Zhao Wanlong, Meng Weixiao, Chi Yonggang, Han Shuai. Factor Graph Based Multi-source Data Fusion for Wireless Localization[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2016, 592–597.

[作者简介]

赵万龙 1988 年生, 博士生, 主要研究方向为信息融合、多源融合导航、大数据。

孟维晓 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星导航无线信号处理、多天线技术、宽带无线通信理论。

韩 帅 1981 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线网络与通信、卫星定位与导航。