

机会信号导航综述

黄高明, 景桐[†], 田威

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)是目前普遍使用的定位手段,其利用多种定位卫星为用户提供全球范围内的高精度位置信息.但由于城市密集区或室内环境对卫星信号的遮挡和吸收作用,使得常用导航方案在这些地区存在定位精度差等问题.机会信号导航(Navigation via signal of opportunity, NAVSOP)通过接收、处理空间中已存在的信号实现对用户的定位,在克服这些问题上优势十分突出,近年来得到学术界的广泛关注.鉴于此,对 NAVSOP 常用定位方法进行总结,并分析其在不同系统中的适用性,详述不同类型 NAVSOP 系统的技术特点和研究现状.针对单一导航系统鲁棒性差的问题,从系统工作方式等方面分析 NAVSOP 在组合导航中应用的优势.最后指出该研究领域仍然存在的问题,并对进一步的研究方向进行展望.

关键词: 导航系统; 室内定位; 机会信号; 机会导航; 协作导航; 组合导航

中图分类号: TN966

文献标志码: A

Survey on navigation via signal of opportunity

HUANG Gao-ming, JING Tong[†], TIAN Wei

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The global navigation satellite system (GNSS) is a commonly used positioning solution, which provides users with worldwide precise location information with multiple positioning satellites. Due to the satellite signals being blocked and absorbed in the deep urban or indoor environment, the conventional navigation solutions are not precise enough for positioning in these areas. Navigation via signal of opportunity (NAVSOP) achieves users positioning by receiving and processing the signals already existed in the environment, which has been attracting significant attention in academic fields for its advantages in overcoming the problems. Common positioning methods used for NAVSOP are summarized, and their applicability in different systems is also analyzed. Technical features and research status for different NAVSOP are represented in detail. Aiming at the problem that the single navigation system has poor robustness, the advantages of application fusing NAVSOP into an integrated navigation system are analyzed from the system operating mode and other aspects. Finally, the existing problems in this field are indicated, and development tendencies of NAVSOP are also expected.

Keywords: navigation system; indoor positioning; signal of opportunity; opportunistic navigation; cooperative navigation; integrated navigation

0 引言

随着卫星技术的发展,全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)已成为应用范围最广、定位精度最高的导航手段.尽管 GNSS 有着不可替代的优势,但天基信号固有的局限性使得这些卫星信号很容易被地面障碍物阻挡或吸收,特别是在室内和城市密集区,GNSS 无法保证在任何时间、任何地点都能提供精确的导航服务.因此,开发既可以独立工作又可以辅助增强 GNSS 鲁棒性的导航技术对于解决这些问题至关重要.机会信号导航

(Navigation via signal of opportunity, NAVSOP)油然而生,成为补充 GNSS 的有效技术手段,受到了学者们的广泛关注.

NAVSOP 将周围环境中所有潜在无线电信号视为机会信号(Signal of opportunity, SOP),并从中提取用以导航的位置和时间信息.这些 SOP 多属于常用的商业通信信号,可随时随地免费获取但并非为导航而专门设计,如 Wi-Fi 信号^[1-4]、电视信号^[5-8]、全球移动通信(Global system for mobile communications, GSM)信号^[9-11]和广播信号^[12-14]等.机会存在性、机

收稿日期: 2018-05-10; 修回日期: 2018-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803379, 61601491); 中国博士后科学基金项目(2017M613370, 2018T111129).

[†]通讯作者. E-mail: jingtong2018@yeah.net.

会可利用性和机会组合性是SOP的特有属性,这些属性对于研发者而言既是优势也是挑战.图1为NAVSOP系统数据处理的一般流程,分为数据预处理、特征参数提取、卡尔曼滤波和位置估计.

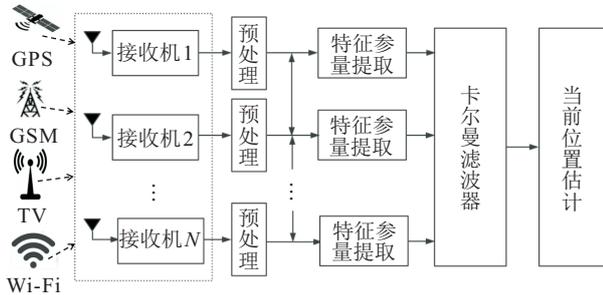


图1 NAVSOP系统工作流程

与传统导航系统相比,NAVSOP在信号选择、信号处理、未知参数估计、时钟同步校准及系统构建等方面都有很大差异.由于NAVSOP通过被动接收、利用空间中已存在的信号进行定位,信号波形、信号基站的空间分布、功率分配情况、站址选择、用户位置等不确定性因素给实现高精度导航带来了困难.这些特点使得传统导航方法无法直接应用,因此必须深入分析NAVSOP的导航特点、定位方法、信号类型与定位算法和定位场景的适应性,才能充分发挥NAVSOP的导航优势.

1 NAVSOP技术优势

1.1 常用导航方案问题分析

常用导航方案^[15]主要包括绝对导航(Absolute navigation, AN)、增量导航(Incremental navigation, IN)和这两种方案的结合. GNSS属于AN的一种,系统误差不会随时间的增加而积累,其信号的载噪比(Carrier-to-noise ratio, CNR)会因距离远、建筑物遮挡等大幅降低,致使无法实现对室内等环境的有效覆盖^[16-17].除GNSS外,AN还包括罗兰C、塔康等地面无线电导航定位系统,而这些地面无线导航方案仍存在以下不足:

1) 导航范围有限.地面无线导航信号由专门建立的发射机提供,受发射机位置和信号功率等因素的限制,系统的导航范围十分有限,通过额外建立发射机来扩大覆盖范围又会使成本大大提高.

2) 需要构建配套接收机.不同地面无线导航系统发射的导航信号在调制方式和频率等方面都有很大差别,定位方法较为固定.一般而言,一种系统有唯一的一类配套接收机,这严重影响了系统的灵活性.

3) 隐蔽性低.由于地面无线导航系统不断向外辐射电磁波,导致这种导航系统的隐蔽性很差,易受到干扰或摧毁.

IN的典型代表是惯性导航系统(Inertial navigation system, INS).INS通过陀螺仪和加速度计等多类传感器估计用户运动和姿态的变化,利用传感器测量的数据,根据初始位置逐步推算出用户当前位置^[18].INS具有较高的数据更新率和带宽输出,在短时间内可以提供精确的导航方案,但存在以下不足:

1) 无法独立提供绝对位置信息^[19].INS的导航高度依赖初始位置,后续的定位结果由初始位置推算得出,其在没有其他传感器辅助的情况下,无法独立输出用户当前位置状态.

2) 导航精度随时间的推移而降低.INS的导航信息通过对导航方程积分得到,由传感器产生的测量误差会在整个导航过程中逐步被积累,整个系统的误差在几十秒内能从厘米级变成米级^[20].

3) 设备性能受到约束.INS的性能与设备体积成正比,高精度INS的成本较高且不易于携带,难以普及.

1.2 NAVSOP技术特点

与常用的导航方案相比,NAVSOP的技术优势十分明显:

1) 信号源充足、信号多样性强.在GNSS应用受限制的区域,SOP比其他导航信号更丰富^[10,21],能够有效解决卫星信号因受到障碍物遮挡,信号强度大幅衰减导致无法提供导航服务的问题.此外,SOP在工作频率、调制方式和信号结构上有很强的多样性,可以提供大量互补、冗余的数据,有利于定位精度的提高.

2) 信号接收功率高且穿透性好. GNSS发射机距离地球表面十分遥远,卫星信号到达接收机处的功率密度远小于周围环境中的SOP^[22].此外,GPS导航系统常用的信号频段和带宽极易受到建筑物的衰减和多径效应的影响.而SOP以较低的频率进行传播,其频率和带宽特性使其可以透过建筑物传播,减少衰减,更有利于抵抗多径的影响^[23].

3) 无需额外建立发射机和接收机. NAVSOP利用周围环境中已存在的无线电信号,无需额外建立发射机.大部分SOP都可被待定位用户免费获取,且可在智能手机上进行数据交互处理^[24].因此,NAVSOP可以很容易地集成在手持移动端,不仅减少了接收机建造成本,还有利于多种SOP的集成.

2 NAVSOP常用定位方法

NAVSOP通过提取信号的多种特征参量实现导航定位,主要包括:接收信号强度(Received signal strength, RSS)^[25-27]、到达角(Angle of arrival,

AOA)^[28-30]、到达时间(Time of arrival, TOA)^[31-33]、到达时间差(Time difference of arrival, TDOA)^[34-36]以及其组合参数^[37-40]等。

基于RSS的定位方法利用与位置有关的信号签名,通过与数据库匹配或模式识别确定用户自身位置^[41-45],也称为指纹定位法^[46-47]。在复杂的室内环境中,由于信号具有极强的空间变化性和微弱的时变性,使得不同位置的信号指纹几乎是唯一的。通过将采集到的指纹与事先构建的指纹数据库进行匹配,即可进行位置的确定。而NAVSOP需要构建多类SOP构成的综合指纹数据库以提高定位精度和应用范围,这仍是亟待解决的问题。

基于AOA的定位方法使用方向性天线或天线阵列获取多个信源相对于用户的来波方向,通过求解方向线的交点确定用户位置。这种方法需要NAVSOP系统具有密集接收机网络才能获得较高的测角精度^[29],且当接收机远离信号源时^[48],定位精度也会随之下降。特别是在手持设备中部署天线系统,实现起来十分困难且成本高昂^[30]。

基于TOA的定位方法要求接收机网络的时钟必须精确同步,适用于这种体系的SOP常要求具有行为可预测性^[49],如GSM信号等。基于TDOA的定位方法不需要信源之间严格的时钟同步,系统常常是差分的^[50-53],参考接收机(Reference receiver, RR)一般部署在已知位置与用户进行有效的通信。提取TDOA信息的方法分为两种:一种是通过RR和用户接收到的信号样本进行互相关处理^[54],获取包含TDOA的峰值信息,这种方法的优点在于不需要知道信号的具体结构,然而由于系统要将RR采集到的样本全部传送给用户端,以保持信息最大的完整性,用户与参考站之间必须建立相当大带宽的数据链;另一种方法通过用户和RR分别提取信号某些特征信息(如同步脉冲)的发现时间^[34],计算两个时间的差值得到TDOA,这种方法的优点在于接收机之间只需传递特征信息参量,因此对数据链的带宽要求不大,但必须知道信号具体的时域结构,且当信号的同步特征存在交叠或周期出现等特点时,系统还需具有解模糊的能力。

3 NAVSOP系统类型

不同的定位方法适用于不同的NAVSOP系统类型,实现两者的最优组合才能最大程度地提高系统导航精度。随着NAVSOP的不断发展,系统利用的信号大致分为两类:一类是传统SOP;另一类是新兴的数据类型,如蓝牙、超宽带(Ultra wide band, UWB)、磁

场和可见光等。本节将介绍几种传统和新兴类型的NAVSOP系统类型,分析不同定位方法的适用性,并结合其发展趋势和研究热点对重点问题进行论述。

3.1 基于Wi-Fi信号的NAVSOP

Wi-Fi导航是室内最常用的导航系统,其不需要额外的硬件和软件处理,只需利用已有的基站设施。Wi-Fi导航系统的定位方法有很多种^[15,45],但由于室内环境十分复杂,多径和非视距(Non line of sight, NLOS)现象影响严重,给基于信号时间和角度信息的定位方法带来了困难。此外,由于节点和用户网络的工作特性,基于时间信息的Wi-Fi定位系统常要求节点以特定的工作方式发送特定的信息,以实现高时间分辨率。特别是随着定位用户的增多,设备之间的通信流量将大大增加,这些方法会严重影响系统的扩展性。因此,指纹定位最适用于此类系统。

指纹定位常用的算法分为确定性匹配方法和概率匹配方法两类^[55]。前者利用两个信号矢量之间的相似度进行判别,主要包括 K 近邻(K -nearest neighbor, KNN)、加权 K 近邻(Weighted K -nearest neighbor, WKNN)等算法。假设一个包含 N 个指纹向量的指纹数据库 $\mathbf{F}_{RSS} = \{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_N\}$,某时刻采集到的指纹样本为 \mathbf{F}_g 。KNN算法通过求得 \mathbf{F}_g 与样本的欧氏距离 $d_i = \sqrt{\|\mathbf{F}_g - \mathbf{F}_i\|_2^2}$ ($i = 1, 2, \dots, N$, $d_i \in \mathbf{d}$),选取其中 K 个最小值代表的指纹向量,即确定 K 个候选位置向量 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_K\}$,定位结果为这 K 个位置向量的坐标平均值,即 $\mathbf{P}_{real} = (1/K) \sum_{n=1}^K \mathbf{P}_n$ 。WKNN则是在选取 K 个位置向量后,分别在每个向量前乘上权重因子 w_n ,即位置估计为 $\mathbf{P}_{real} = \sum_{n=1}^K w_n \mathbf{P}_n$ 。权重因子的选取方法有很多种,具体可参见文献[56];而概率匹配方法则利用贝叶斯公式求出待测点 \mathbf{F}_g 出现在每个参考点位置的后验概率,即

$$p(\mathbf{P}|\mathbf{F}_g) = \frac{p(\mathbf{F}_g|\mathbf{P}_i)p(\mathbf{P}_i)}{p(\mathbf{F}_g)} \quad (1)$$

通过式(1)计算出测量点与所有参考点的后验概率值,并将这些概率值作为权重分别与参考点位置向量乘积后求和,得到待测点坐标。两种匹配算法的区别主要在于:确定性匹配算法的离线阶段将每个参考点获得的多个接入点(Access point, AP)的RSS平均值作为该点的指纹特征量,在线阶段的匹配精度与算法中 K 值的选择也有密切关系。这种方法的系统处理成本相对较低,在室内环境较为简单、离线数据库构建准确的情况下可以获得较高的定位精度,然

而,在相反情况下,由于RSS平均值无法准确表示室内信号RSS的真实分布情况等原因,系统定位精度会有所下降;概率性匹配算法的离线阶段记录参考点信号RSS的概率分布情况,通过比较待定位点位于某参考点的概率来确定其实际位置,一般而言,这种方法环境适应性较强,定位精度更高,但系统处理成本也随之提升。

图2为空旷环境中,利用不同匹配方法时定位均方根误差(Root mean square error, RMSE)与AP数量和噪声标准差之间的关系. 指纹数据库根据信号空间路径损耗模型建立,假设信号发射端强度为30 dB,路径损耗因子为3,加性噪声服从零均值高斯分布模型. 结果显示,随着AP数量的增加,定位精度不断提高,在定位环境较为理想的情况下,两种指纹匹配算法精度差别较小。

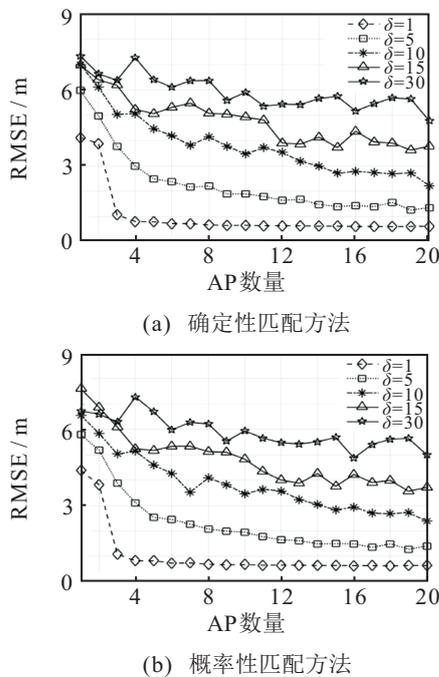


图2 定位精度与AP数量和噪声的关系

针对指纹匹配算法的改进已经开展了大量工作,这里不再赘述. 目前Wi-Fi导航研究的重点是如何解决复杂且工作量巨大的指纹数据库构建、定位设备与数据库构建设备不匹配、数据库构建和指纹匹配同时进行以及开发非入侵方式定位等问题^[57-59]. 文献[60]构建了一种基于Wi-Fi的非入侵式新型室内定位系统(WiFi-based non-intrusive indoor positioning system, WinSMS),可以实时捕获在现有Wi-Fi流量中传输的数据包,通过非入侵的方式使得每个AP都能扫描其他APs的RSS;同时提出了一种基于多项式曲面拟合均值高斯回归(Polynomial surface fitting mean-Gaussian process regression, PSFM-GPR)的指

纹数据库在线构建方法,将AP的RSS分布建模为二次多项式曲面拟合函数,利用高斯过程(Gaussian process, GP)估计剩余误差,得到任一参考点 \mathbf{l}_j 的RSS估计值为

$$s_j = m(\mathbf{l}_j) + K(\mathbf{l}_j, \mathbf{L})[K(\mathbf{L}, \mathbf{L}) + \sigma_\varepsilon^2 \mathbf{I}]^{-1}(\mathbf{S} - m(\mathbf{L})), \quad (2)$$

$$m(\mathbf{l}_j) = \beta_0 + \beta_1 x_j + \beta_2 y_j + \beta_3 x_j^2 + \beta_4 y_j^2 + \beta_5 x_j y_j. \quad (3)$$

式(3)中的所有参数可在WinSMS工作阶段被实时估计和更新. 利用该方法估计出 n 个APs在 m 参考点的RSS值,即可建立一个 $m \times n$ 的在线RSS指纹数据库. 文献[61]的方法与文献[60]相似,提出了一种基于火花算法(Fireworks algorithm, FWA)的高斯过程回归(Fireworks algorithm-gaussian process regression, FWA-GPR),区别在于文献[61]不需要AP位置的先验信息,将包括APs位置在内的多种参数视为待估计的未知参数,并构建代价函数

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \begin{cases} -\log p(\mathbf{r}|\mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}), \\ \gamma. \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\boldsymbol{\theta}$ 为待估计参数向量. FWA通过产生许多火花来表示代价函数 $J(\boldsymbol{\theta})$ 的不同解,利用FWA训练这些参数,通过迭代选取最优解进而估计待测点位置的坐标. 上述两种方法相比于传统信号地图构建方法而言效率更高、实现更容易、环境适应力更强,既可以解决离线数据库构建的资源消耗问题,又能有效克服环境动态变化带来的数据库失配等问题. 而且文献[61]的方法不需要APs位置的先验知识,相比于文献[60]的方法,更适用于大规模系统的构建,但由于其通过不断训练参数向量来求解优化问题,算法的效能在一定程度上会受到迭代次数的限制。

3.2 基于广播信号的NAVSOP

广播信号包括调频(Frequency modulation, FM)广播信号和调幅(Amplitude modulation, AM)广播信号等. 基于FM和AM信号的定位系统主要有两种.

1) 基于信号处理获取相关定位参数的方案.

由于广播信号不包含任何时间信息,发射机之间时钟不同步,因此这种定位系统常常是差分的. 文献[13]构建了一种如图3所示的结构差分定位系统.

AM基站和RR位于已知位置,通过在用户与RR之间的数据链中加入同步脉冲,使得两者的时钟保持同步. RR与用户端通过广义互相关(Generalized

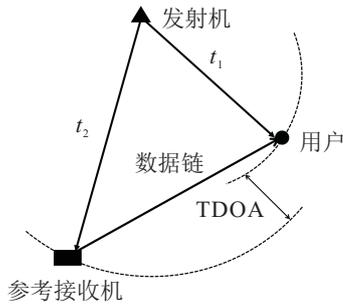


图3 基于TDOA的差分定位系统示意图

cross correlation, GCC) 处理提取 TDOA 信息: 首先对两路信号求得互相关函数, 然后对其进行傅里叶变换得到互功率谱密度函数, 将其乘上一定的加权系数后再转换到时域即得到 GCC 函数^[62], 有

$$R_{xy}^g(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\omega) S_{xy}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega. \quad (5)$$

其中: $\gamma(\omega)$ 为加权函数, $S_{xy}(\omega)$ 为两路信号互功率谱密度函数. 图4为利用不同加权函数 (PHAT 加权、

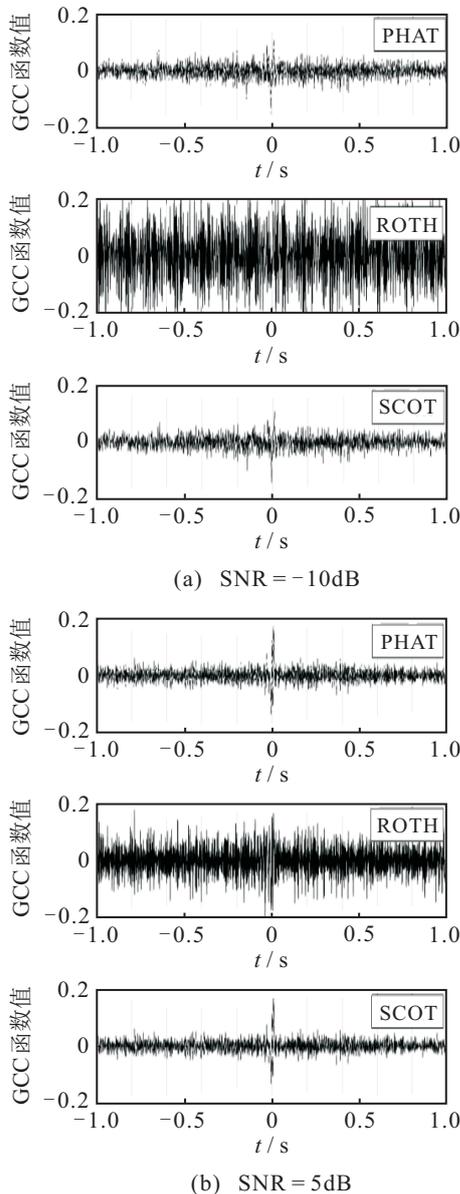


图4 GCC函数在不同加权函数下随SNR变化的关系

ROTH 加权、SCOT 加权) 时, 信号 GCC 函数值在不同信噪比 (Signal noise ratio, SNR) 下的结果, 噪声为高斯白噪声. $\gamma(\omega)$ 的选择严重依赖于噪声的先验知识, 并决定了 $S_{xy}(\omega)$ 的峰值能否得到有效锐化, 是提高系统定位精度的关键. 从结果中可以看出: 在高斯白噪声的条件下, ROTH 加权受噪声干扰影响严重, 随着 SNR 的降低, 其效果严重下降; PHAT 加权与 SCOT 加权的效应相近, 且两者具有较好的抗噪声干扰能力, 函数能够得到有效锐化且波动较为平滑. 系统将得到的一系列 TDOA 观测值乘上信号传播速度, 转换得到发射机到 RR 与用户之间的伪距差, 进而求解用户位置. 此类定位系统构建成本高, 且由于语音调制内容太过随机, 致使定位结果偏差较大. 特别是在噪声先验信息未知的情况下, 算法性能将受到严重影响.

2) 基于信号指纹的室内定位系统.

该定位系统是目前应用 FM 广播信号实现室内定位的研究热点. 相比于 Wi-Fi 信号, FM 广播信号频率更低, 多径效应影响更弱; FM 基站发射功率高、覆盖范围广, 这也使得室外相邻参考点的 RSS 变化不明显, 因此室外 FM 信号指纹定位精度不高. 由于 FM 基站相对稳定, 其室内 RSS 分布有着更强的时间不变性. 文献 [63] 初步证明了 FM 信号指纹定位的有效性; 文献 [64] 通过在室内各位置点测量实际的 RSS, 考虑墙体、视距 (Line of sight, LOS) 路径、NLOS 路径和窗户大小等因素对信号影响的前提下, 提出了一种基于实验观测值的 FM 信号 RSS 经验预测模型来构建指纹数据库, 有

$$RSS(s, t) = \max[RSS_{LOS}(s, t, \alpha, f), RSS_{NLOS}(s, t, \alpha, f, C_1), RSS_{ind, \alpha}(s, t, \alpha)]. \quad (6)$$

其中: s 为待估计点, $RSS_{LOS}(s, t, \alpha, f)$ 为 LOS 信号, $RSS_{NLOS}(s, t, \alpha, f, C_1)$ 为 NLOS 信号, $RSS_{ind}(s, t, \alpha)$ 为其他间接路径信号; α, f 和 C_1 分别为路径损失指数、墙体衰减因子和 NLOS 信号的常数衰减因子, 3 个未知参数利用实测数据估计得出, 并在工作阶段被实时校正. s 点的位置将基于欧氏距离利用指纹匹配算法得出. 文献 [65] 搭建了一个软件无线电平台, 通过离线收集 FM 和数字视频广播 (Digital video broadcasting-terrestrial, DVB-T) 的信道信息, 构建了一个包含两种信号的综合指纹数据库, 定位精度得到大幅提升, 但离线阶段仍耗费了大量资源. 总体而言, 基于广播信号的室外导航系统常与 GNSS 组合使用, 以成本消耗为代价换取定位精度的提升. 而基于指纹匹配的广播信号定位系统在室内具有良好的定

位精度,虽然在一定程度上不及Wi-Fi定位系统,但其普适性更强、应用约束条件更少,因此这类系统的重点研究问题仍是寻找低成本的多类广播信号的综合指纹数据库构建方法。

3.3 基于UWB的NAVSOP

在新兴数据类型中,蓝牙系统虽然具有成本低、功耗小、定位方法简单等特点,但其系统覆盖范围较小且受噪声影响十分严重.ZigBee系统能够较容易地根据用户定义实现若干个节点的自组网,但其带宽窄、传输速率慢、作用距离短等缺点在一定程度上限制了其发展.相比之下,UWB系统因具有带宽大、定位精度高、抗干扰效果好等优势,得到了迅速发展。

基于RSS的定位系统利用UWB信号的弱衰落特性,对系统成本和复杂度要求不高,但当信源距离目标较远时,定位精度会严重下降^[66].基于TOA和TDOA的UWB系统利用UWB信号的高时间分辨率特性有效提高了定位精度,通过在目标节点和已知位置的参考节点之间传输信号来估计位置,LOS下的定位精度可达厘米级,然而,高采样率和时钟同步亚纳秒级精度的要求大大提高了系统成本^[67].文献^[68]提出了一种基于TOA的差分超宽带(Differential ultra-wideband, DUWB)定位系统,分别在测量域和解域减少测距误差:在测量域上,通过 n 个传感器与单个参考信源(Reference source, RS)和单个目标信源(Target source, TS)的真实距离 $r_{i,RS}^t$ 和观测距离 $r_{i,RS}^m$ 求得校正因子 $\eta_i = \frac{r_{i,RS}^t}{r_{i,RS}^m}$,并修正传感器与TS的观测距离 $r_{i,TS}^m$,得到 n 个修正后的目标距离观测值 $r_{i,TS}^c = \eta_i r_{i,TS}^m$.将 $r_{i,TS}^c$ 代入TOA最小二乘(Least squares, LS)解的表达式,求出TS校正后的位置估计.在解域上,首先利用RS的LS坐标估计和真实坐标求出估计误差向量 $e = \hat{S}_{RS} - S_{RS}$,并修正TS的LS的坐标估计,得到TS的校正位置估计为 $\hat{S}_{TS}^c = \hat{S}_{TS} + e$.这种方法的前提是信源和传感器的时钟严格同步,而在实际的应用中常受到多种限制。

目前UWB的研究方向主要有两个,一是研究UWB与其他传感器(如INS)的耦合以及如何提高对UWB观测量的滤波效果.图5为结合UWB距离观测量和INS传感器数据的目标平面定位仿真结果,场景中包含5个UWB基站,NLOS误差服从 $B(0, 1)$ 分布,系统利用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)进行数据融合,以平面定位误差均方根 $RMS_p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 和速度估计误差均方根 $RMS_v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2}$ 表示系统性能。

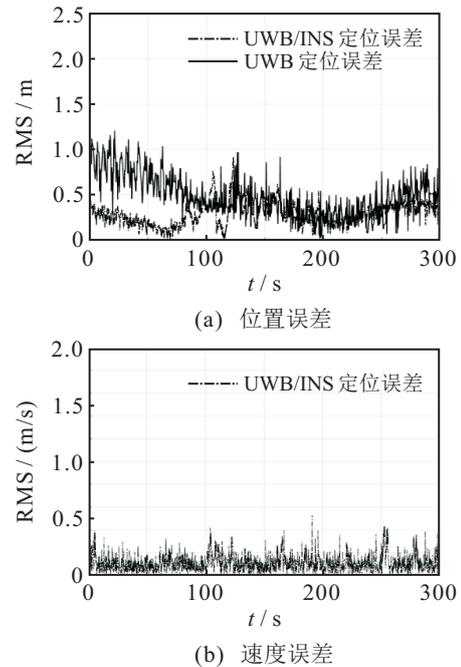


图5 基于UWB和INS的室内组合定位系统误差分析

从结果中可以看出,仅使用UWB距离观测量,系统的定位误差较大,且波动十分明显.相比之下,系统在融合INS传感器数据后,定位精度明显提高,误差基本控制在0.5 m以内.由于UWB距离观测量无法有效改善滤波器对于系统速度估计的平滑效果,仅展示了融合INS加速度信息后的速度估计误差.可以看出,速度误差可控制在0.4 m/s以内.文献^[69]设计了一种基于UWB距离观测量的机器人定位系统,将EKF与扩展无偏有限脉冲响应(Extended unbiased finite impulse response, EFIR)滤波相结合(EKF/EFIR),通过使用概率权值融合两个滤波器的输出得到估计结果,使得EKF/EFIR的输出范围接近两个滤波器中最精确的一个.文献^[70]基于UWB的TDOA量测,将UWB数据与INS相结合,采用最小方差无偏有限脉冲响应(Minimum variance unbiased finite impulse response, MVUFIR)滤波器来克服噪声方差先验知识未知带来的影响.该滤波器选择最小的过程噪声协方差矩阵 Q 为假设值,且假设测量噪声协方差矩阵 R 具有相同的对角元素(非零),最后推导得到的MVUFIR增益近似等于无偏FIR滤波器的增益,可忽略 Q 和 R 的影响。

UWB定位系统的另一个研究方向是解决NLOS、多径效应等现象给定位精度带来的不良影响,如文献^[71]等.UWB定位系统相比于其他常规信号的定位系统而言,定位精度虽然得到了明显的提高,抗干扰效果也更好,但是定位场景必须设有相应的信号发射装置,因此适用范围受到了限制.UWB定

位系统的这些特性使其常被用在辅助机器人等智能设备的电子地图构建和积累误差纠正等方面。

4 NAVSOP在组合导航中的应用

尽管NAVSOP有着独特的优势,但仅基于SOP的单一导航系统仍在导航精度、系统工作效率、鲁棒性等方面存在局限性。将SOP融入到传统的INS/GNSS组合导航方案中^[72-73]形成的SOP/INS/GNSS导航体系,不仅可以解决GNSS无法提供服务时INS因缺少绝对位置信息的定期矫正而产生漂移的问题,还能有效提高系统的工作效率和导航精度。

SOP/INS/GNSS组合导航方案是利用信号频率稳定性、GNSS伪距测量、SOP辐射源位置及SOP特征信息、INS测量信息等,并将这些数据在处理器实现融合的一种综合策略,从而达到在复杂环境中协助GNSS完成同步定位的目的^[74-77]。该体系的工作方式一般分为两个模式:

1) 当系统与多个GNSS卫星(一般为4颗)存在良好的LOS路径时^[78],GNSS工作占主导地位并辅助INS工作。同时,系统会不断从周围环境中提取SOP的观测数据,实现对用户当前位置的估计,以提供更精确的导航结果。

2) 当GNSS信息无法充分获取时,整个系统将只通过SOP提供的测量数据矫正INS。在这种情况下,滤波器将基于GNSS失效前一时刻提供的位置信息,通过融合SOP及INS提供的后续测量数据来跟踪用户的位置。由于SOP位置及时钟状态的先验信息无法事先获取^[79],在整个导航过程中,这些状态以及用户的位置和速度都要得到准确估计^[80-81]。这与机器人研究中的同步定位于地图构建(Simultaneous localization and mapping, SLAM)问题相似,然而,与传统SLAM问题中的静态环境映射不同的是,SOP的状态信息是不断变化且随机的,因此构建NAVSOP的信号地图将更加复杂^[82]。

该种组合导航方案的优势在于:

1) 充分利用了信号的频率稳定性传输,将SOP提供的频率和时间信息耦合到GNSS接收机中,缩小了接收机捕获GNSS信号所需的搜索空间,同时扩大了相干积分时间。

2) 提高了系统的接收机灵敏度,使系统能够采集比CNR更低的信号,有效克服了室内严峻的衰落环境,扩大了系统的覆盖范围。

3) GNSS与多数SOP可同时集成在手机上,降低了系统开发的复杂度。

5 NAVSOP挑战与展望

5.1 NAVSOP面临的挑战

由于GNSS信号在室内和城市密集区会被建筑物阻挡和吸收,导致系统无法提供全天候的导航服务,NAVSOP的普及是未来发展的必然趋势。在这个过程中,研究者要面临以下挑战和亟待解决的问题:

1) SOP的时钟不稳定。在导航系统中,时钟是影响定位精度的主要因素之一,GNSS的时钟可以精确到几纳秒,稳定度极高。而SOP如电视信号^[83],其发射机的时钟较为不稳定,这给基于SOP时间信息的定位带来了很大挑战。

2) 准确估计SOP状态参数存在困难。在没有任何关于SOP先验知识的前提下,表征SOP状态的特性参数如地理位置、时钟漂移和信号传输时间等必须被准确估计,进而绘制导航区域的信号地图,并实现在地图中的相对定位。然而多种因素限制了SOP状态估计的准确性,如不正确的系统模型^[80]、接收机的运动轨迹^[84]等。

3) SOP发射机受到限制。一方面,发射机高度受到限制,在这种情况下,如果不采取任何辅助手段,系统只能进行二维定位;另一方面,发射机的地理分布特性受到限制,在某些区域,尽管SOP发射机的数量众多,但地理位置不满足空间多样性,同样会影响定位精度。

4) SOP资源未得到充分利用。现有NAVSOP系统都是依照既定SOP设计的,信号使用类型较为单一,而空间中还包含多种未被视为信号源的SOP,如飞机的导航信号。这些SOP并不是任何时刻、任何地点都存在的,然而信号的某些属性对于提高系统的定位精度而言可能十分有利。如何将这些概率性存在的SOP融入到系统当中,挖掘信号的特征属性并根据定位需求选择最优的SOP是有待解决的难题。

5) 多路径和NLOS问题严峻。在室外开阔地区,SOP多属于LOS传输,信号处理相对容易。而在室内和城市密集区,接收机跟踪的信号很多是目标信号的反射或散射信号,多路径和NLOS效应会给基于角度和时间信息的系统带来极大的定位误差。针对这些问题,现有算法大都基于特定信号类型的特定结构,无法适用于全部类型的信号。

6) 多接收机协作导航体系仍面临诸多困难。协作导航^[85-86]是NAVSOP扩展成全球范围导航系统的重要支撑技术,然而在SLAM模式下,多传感器融合产生的极高计算负荷会严重影响移动设备的使用寿命。此外,如果接收机网络异步工作或者某些接收机

节点提供错误的测量信息,协作导航系统的定位精度可能会严重低于独立的NAVSOP系统.如何解决这些问题还没有取得实质性的进展.

5.2 NAVSOP展望

NAVSOP系统的发展趋势可归纳为以下几点:

1) 高性能的信号处理算法. 为了实现对复杂SOP的接收,接收机必须具有大带宽、高动态范围以及高采样率等特性. 随之而来的,算法要能够在低信噪比、信号严重重叠的情况下对信号进行盲分选、特征属性分析、合理分组^[29]以及择优提取的处理. 由于SOP的机会存在性,算法要具备十分强的计算能力,系统也必须能快速准确地作出决策.

2) 混合SOP与混合传感器相结合. 关于NAVSOP的研究多数集中在传统无线电信号,少数学者研究了诸如光信号、声信号和磁信号等非无线电信号^[87-90]. 这些非无线电信号和常用无线电信号的综合利用能够获得更好的系统几何分布,特别是能大幅提高室内定位精度. 这种系统必须额外具备与之相配备的传感器,如视觉导航需要照相机、光导航需要光感应器、磁导航需要磁力计等. 因此,混合信号和混合传感器的系统集成必定成为NAVSOP未来研究的重要方向.

3) 基于云端共享的协作式导航. 在这种导航模式下,全球范围的接收机节点不仅能够利用自身周围存在的SOP,还能共享各自对环境中SOP的观测,并将这些观测数据存储在云端服务器,通过数据共享构建全球范围的信号地图. 这样即使GNSS变得不可用,用户仍可以基于云端数据库自动构建任何用户所在区域的信号模型,从而实现自动化的全球导航功能.

参考文献(References)

- [1] Vossiek M, Wiebking L, Gulden P, et al. Wireless local positioning[J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(4): 77-86.
- [2] Alshamaa D, Mourad-Chehade F, Honeine P. Tracking of mobile sensors using belief functions in indoor wireless networks[J]. IEEE Sensors J, 2017, 18(1): 310-319.
- [3] Liu H, Yang J, Sidhom S, et al. Accurate WiFi based localization for smartphones using peer assistance[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2014, 13(10): 2199-2214.
- [4] 王珂璠, 艾浩军, 涂卫平. Wi-Fi指纹聚类在室内感兴趣区域定位中的应用[J]. 计算机应用, 2016, 36(2): 488-491.
(Wang Y F, Ai H J, Tu W P. Wi-Fi fingerprinting clustering for indoor place of interest positioning[J]. J of Computer Applications, 2016, 36(2): 488-491.)
- [5] Rabinowitz M, Spilker J J. A new positioning system using television synchronization signals[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2005, 51(1): 51-61.
- [6] Thevenon P, Serant D, Julien O, et al. Positioning using mobile TV based on the DVBSH standard[J]. Navigation, 2011, 58(2): 71-90.
- [7] Chen L, Thevenon P, Seco-Granados G, et al. Analysis on the TOA tracking with DVB-T signals for positioning[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2016, 62(4): 957-961.
- [8] Ong J T, Yan H, Rao S V B, et al. Indoor DTV reception: Measurement techniques[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2004, 50(2): 192-199.
- [9] Otsason V, Varshavsky A, Lamarca A, et al. Accurate GSM indoor localization[C]. Int Conf on Ubiquitous Computing. Berlin: Springer Heidelberg, 2005: 141-158.
- [10] Varshavsky A, De Lara E, Hightower J, et al. GSM indoor localization[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2007, 3(6): 698-720.
- [11] Borenovic M, Neskovic A, Neskovic N. Vehicle positioning using GSM and cascade-connected ANN structures[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 34-46.
- [12] Chen L, Yang L L, Yan J, et al. Joint wireless positioning and emitter identification in DVB-T single frequency networks[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2017, 63(3): 577-582.
- [13] Webb T A, Groves P D, Cross P A, et al. A new differential positioning method using modulation correlation of signals of opportunity[C]. IEEE/ION Position Location and Navigation. New York: IEEE, 2010: 972-981.
- [14] Moghtadaiee V, Dempster A G. Indoor location fingerprinting using FM radio signals[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2014, 60(2): 336-346.
- [15] Noel W. Signals of opportunity navigation using Wi-Fi signals[D]. Ohio: School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2011.
- [16] Seco-Granados G, López-Salcedo J, Jiménez-Baños D, et al. Challenges in indoor global navigation satellite systems: Unveiling its core features in signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(2): 108-131.
- [17] 徐田来, 崔平远, 崔祜涛. 路网辅助的车载INS/GPS组合导航方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 398-402.
(Xu T L, Cui P Y, Cui H T. Method of land vehicle INS/GPS integrated navigation aided by road network constrains[J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 398-402.)
- [18] Özkan Bebek, Suster M A, Rajgopal S, et al. Personal navigation via high-resolution gait-corrected inertial

- measurement units[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 3018-3027.
- [19] Eggert R J. Evaluating the navigation potential of the national television system committee broadcast signal[D]. Ohio: School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2004.
- [20] Ramanandan A, Chen A, Farrell J A. Inertial navigation aiding by stationary updates[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(1): 235-248.
- [21] Gezici S. A survey on wireless position estimation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 44(3): 263-282.
- [22] Raquet J, Martin R K. Non-GNSS radio frequency navigation[C]. *IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Las Vegas: IEEE, 2008: 5308-5311.
- [23] Zheng L, Xue R. Signals of opportunity navigation methods for complex lower airspace flight[C]. *Int Conf on Cybernetics and Intelligent Systems*. Qingdao: IEEE, 2011: 272-276.
- [24] Farshad A, Li J, Marina M K, et al. A microscopic look at WiFi fingerprinting for indoor mobile phone localization in diverse environments[C]. *Int Conf on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. Montbeliard: IEEE, 2013: 1-10.
- [25] Shu Y, Huang Y, Zhang J, et al. Gradient-based fingerprinting for indoor localization and tracking[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2424-2433.
- [26] 姜向远, 张焕水, 王伟. 一种基于非完全数据的路径损耗模型选择算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(6): 1438-1444.
(Jiang X Y, Zhang H S, Wang W. A model selection algorithm for path loss from incomplete data[J]. *J of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(6): 1438-1444.)
- [27] 于海涛. 基于RSS与CSI混合指纹室内定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2017.
(Yu H T. Indoor locating method research based on RSS and CSI fingerprint[D]. Harbin: School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [28] Faragher M R. Effects of multipath interference on radio positioning systems[D]. Cambridge: Churchill College, University of Cambridge, 2007.
- [29] Martin R K, Yan C, Fan H H, et al. Algorithms and bounds for distributed TDOA-based positioning using OFDM signals[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2011, 59(3): 1255-1268.
- [30] Waadt A E, Wang S, Kocks C, et al. Positioning in multiband OFDM UWB utilizing received signal strength[C]. *Positioning Navigation and Communication*. Dresden: IEEE, 2010: 308-312.
- [31] Dai L, Wang Z, Pan C, et al. Wireless positioning using TDS-OFDM signals in single-frequency networks[J]. *IEEE Trans on Broadcasting*, 2012, 58(2): 236-246.
- [32] Chen L, Julien O, Thevenon P, et al. TOA estimation for positioning with DVB-T signals in outdoor static tests[J]. *IEEE Trans on Broadcasting*, 2015, 61(4): 625-638.
- [33] Yang C, Nguyen T, Blasch E. Mobile positioning via fusion of mixed signals of opportunity[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2014, 29(4): 34-46.
- [34] Raquet J F, Miller M M. Issues and approaches for navigation using signals of opportunity[J]. *Proc of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation NTM*, 2007, 6682(1): 1073-1080.
- [35] Yang J, Wang X, Rahman M J, et al. A new positioning system using DVB-T2 transmitter signature waveforms in single frequency networks[J]. *IEEE Trans on Broadcasting*, 2012, 58(3): 347-359.
- [36] Lu Y S, Lai C F, Hu C C, et al. Path loss exponent estimation for indoor wireless sensor positioning[J]. *KSII Trans on Internet and Information Systems*, 2010, 4(3): 243-257.
- [37] Cong L, Zhuang W. Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(3): 439-447.
- [38] Zhang V Y, Wong K S, Woo K T, et al. Hybrid TOA/AOA-based mobile localization with and without tracking in CDMA cellular networks[C]. *Wireless Communications and Networking Conf. Sydney: IEEE*, 2010: 1-6.
- [39] Catovic A, Sahinoglu Z. The Cramer-Rao bounds of hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(10): 626-628.
- [40] Keunecke K, Scholl G. Deriving 2D TOA/TDOA IEEE 802.11 g/n/ac location accuracy from an experimentally verified fading channel model[C]. *Int Conf on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. Montbeliard: IEEE, 2013: 1-10.
- [41] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]. *Proc of 19th Annual Joint Conf of the IEEE Computer and Communications Societies*. Israel: IEEE, 2000: 775-784.
- [42] Sun G, Chen J, Guo W, et al. Signal processing techniques in network-aided positioning: A survey of state-of-the-art positioning designs[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 12-23.

- [43] 黄越洋, 张嗣瀛, 井元伟, 等. 基于TDOA和RSS的可行域粒子滤波非视距定位算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(8): 1415-1420.
(Huang Y Y, Zhang S Y, Jing Y W, et al. Non-line of sight localization algorithm based on TDOA and RSS by feasible region particle filter[J]. Control and Decision, 2017, 32(8): 1415-1420.)
- [44] Chen X, Zou S. Improved Wi-Fi indoor positioning based on particle swarm optimization[J]. IEEE Sensors J, 2017, 17(21): 7143-7148.
- [45] Yang C, Shao H R. WiFi-based indoor positioning[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 150-157.
- [46] Steiner C, Wittneben A. Efficient training phase for ultrawideband-based location fingerprinting systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2011, 59(12): 6021-6032.
- [47] Chen K, Wang C, Yin Z, et al. Slide: Towards fast and accurate mobile fingerprinting for Wi-Fi indoor positioning systems[J]. IEEE Sensors J, 2018, 18(3): 1213-1223.
- [48] Martin R K, Velotta J S, Raquet J F. Bandwidth efficient cooperative TDOA computation for multicarrier signals of opportunity[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 57(6): 2311-2322.
- [49] Merry L A, Faragher R M, Scheduling S. Comparison of opportunistic signals for localisation[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(16): 109-114.
- [50] Gong F, Zhang X. Hybrid GPS/TDOA location algorithm in non-line-of-sight environment[C]. Int Conf on Computer Science and Network Technology. Dalian: IEEE, 2013: 2033-2036.
- [51] Vankayalapati N, Kay S, Ding Q. TDOA based direct positioning maximum likelihood estimator and the cramer-rao bound[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3): 1616-1635.
- [52] Mcellroy J A. Navigation using signals of opportunity in the AM transmission band[D]. Ohio: School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2006.
- [53] Kim B S. Evaluating the correlation characteristics of arbitrary AM and FM radio signals for the purpose of navigation[D]. Ohio: School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2006.
- [54] Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on Acoustics Speech and Signal Processing, 2003, 24(4): 320-327.
- [55] 程康阳. 基于机会无线信号的室内外定位关键技术的研究与探索[D]. 北京: 北京邮电大学信息与通信工程学院, 2016.
(Cheng K Y. Research on key indoor and outdoor positioning technologies based on opportunistic wireless signal[D]. Beijing: School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.)
- [56] Fang X, Jiang Z, Nan L, et al. Optimal weighted K-nearest neighbour algorithm for wireless sensor network fingerprint localisation in noisy environment[J]. IET Communications, 2018, 12(10): 1171-1177.
- [57] Zhou M, Wong K S, Tian Z, et al. Adaptive mobility mapping for people tracking using unlabelled Wi-Fi shotgun reads[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1): 87-90.
- [58] Raspopoulos M. Multidevice map-constrained fingerprint-based indoor positioning using 3-D ray tracing[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2017, 67(2): 466-476.
- [59] Chen C, Han Y, Chen Y, et al. Indoor global positioning system with centimeter accuracy using Wi-Fi [Applications Corner][J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(6): 128-134.
- [60] Zou H, Jin M, Jiang H, et al. WinIPS: WiFi-based non-intrusive indoor positioning system with online radio map construction and adaptation[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2017, 16(12): 8118-8130.
- [61] Tao Y, Zhao L. A novel system for WiFi radio map automatic adaptation and indoor positioning[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10683-10692.
- [62] Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on Acoustics Speech and Signal Processing, 2003, 24(4): 320-327.
- [63] Fang S H, Chen J C, Huang H R, et al. Is FM a RF-based positioning solution in a metropolitan-scale environment? A probabilistic approach with radio measurements analysis[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2009, 55(3): 577-588.
- [64] Yoon S, Lee K, Yun Y C, et al. ACMI: FM-based indoor localization via autonomous fingerprinting[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2016, 15(6): 1318-1332.
- [65] Carvalho R, Yang S H, Ho Y H, et al. Indoor localization using FM and DVB-T signals[C]. IEEE Consumer Communications and Networking Conf. Las Vegas: IEEE, 2016: 862-867.
- [66] Gigl T, Janssen G J M, Dizdarevic V, et al. Analysis of a UWB indoor positioning system based on received signal strength[C]. The Workshop on Positioning. Hannover: IEEE, 2007: 97-101.
- [67] Gezici S, Tian Z, Giannakis G B, et al. Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.

- [68] Khalaf-Allah M. Differential ultra-wideband (DUWB) for accurate indoor position estimation: Basic concept and simulation results[C]. Electronics, Communications and Photonics Conf. Riyadh: IEEE, 2013: 1-4.
- [69] Xu Y, Shmaliy Y S, Ahn C K, et al. Robust and accurate UWB-based indoor robot localisation using integrated EKF/EFIR filtering[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2018, 12(7): 750-756.
- [70] Zhao S, Huang B, Liu F. Localization of indoor mobile robot using minimum variance unbiased FIR filter[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2016, 15(2): 410-419.
- [71] Wei Z, Chen X, Fang L, et al. Joint positioning technique based on TOF and TDOA[C]. IEEE Int Instrumentation and Measurement Technology Conf. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [72] Youssef A, Krumm J, Miller E, et al. Computing location from ambient FM radio signals [commercial radio station signals][C]. Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans: IEEE, 2005, 2: 824-829.
- [73] 周永余, 陈永冰, 李文魁. 舰船组合导航系统发展评述[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(1): 68-73.
(Zhou Y Y, Chen Y B, Li W K. Review on development of ship's integrated navigation system[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(1): 68-73.)
- [74] 戴卿, 隋立芬, 王凌轩, 等. 北斗/惯导的快速混合高斯UKF算法[J]. 测绘科学, 2018, 43(1): 20-25.
(Dai Q, Sui L F, Wang L X, et al. Gaussian mixture model UKF for BDS/INS navigation system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(1): 20-25.)
- [75] Kassas Z M, Humphreys T E. The price of anarchy in active signal landscape map building[C]. Global Conference on Signal and Information Processing. Austin: IEEE, 2013: 165-168.
- [76] Jr K M P, Kassas Z M, Bhatti J A, et al. Tightly-coupled opportunistic navigation for deep urban and indoor positioning[J]. Proc of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2011, 10(1): 3605-3616.
- [77] Pesyna K M, Wesson K D, Heath R W, et al. Extending the reach of GPS-assisted femtocell synchronization and localization through tightly-coupled opportunistic navigation[C]. IEEE Globecom Workshops. Houston: IEEE, 2011: 242-247.
- [78] Angelis G D, Baruffa G, Cacopardi S. GNSS/Cellular hybrid positioning system for mobile users in urban scenarios[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 313-321.
- [79] Atia M M, Hilal A R, Stellings C, et al. A low-cost lane-determination system using GNSS/IMU fusion and HMM-based multistage map matching[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(11): 3027-3037.
- [80] Shamaei K, Khalife J, Kassas Z M. Ranging precision analysis of LTE signals[C]. The 25th European Signal Processing Conference. Greece: IEEE, 2017: 2719-2723.
- [81] Shamaei K, Kassas Z M. LTE receiver design and multipath analysis for navigation in urban environments[J]. Navigation, 2018, 65(4): 655-675.
- [82] Shamaei K, Khalife J, Kassas Z M. Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2173-2189.
- [83] Durrantwhyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: Part I[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(2): 99-110.
- [84] Kassas Z M, Humphreys T E. Observability analysis of collaborative opportunistic navigation with pseudorange measurements[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 260-273.
- [85] Kassas Z M, Arapostathis A, Humphreys T E. Greedy motion planning for simultaneous signal landscape mapping and receiver localization[J]. IEEE J of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(2): 247-258.
- [86] Morales J J, Kassas Z M. Optimal collaborative mapping of terrestrial transmitters: Receiver placement and performance characterization[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(2): 992-1007.
- [87] Mourikis A I, Trawny N, Roumeliotis S I, et al. Vision-aided inertial navigation for spacecraft entry, descent, and landing[J]. IEEE Trans on Robotics, 2009, 25(2): 264-280.
- [88] Bargshady N, Garza G, Pahlavan K. Precise tracking of things via hybrid 3-D fingerprint database and kernel method particle filter[J]. IEEE Sensors J, 2016, 16(24): 8963-8971.
- [89] Idoudi M, Bourenane E B, Grayaa K. Wireless visual sensor network platform for indoor localization and tracking of a patient for rehabilitation task[J]. IEEE Sensors J, 2018, 18(14): 5915-5928.
- [90] Zeng Q, Wang J, Meng Q, et al. Seamless pedestrian navigation methodology optimized for indoor/outdoor detection[J]. IEEE Sensors J, 2017, 18(1): 363-374.

作者简介

黄高明(1972—), 男, 教授, 博士, 从事信息对抗及其应用等研究, E-mail: hgaom@163.com;

景桐(1995—), 男, 硕士生, 从事机会信号定位的研究, E-mail: jingtong2018@yeah.net;

田威(1984—), 男, 博士, 从事多传感器信息融合的研究, E-mail: tianwei09@tsinghua.org.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)