

单基站 DTMB 信号约束的 PDR 运动参数修正

刘晓燕, 陈 亮, 焦振航, 卢祥晨

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘 要: 目前, 全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)在室外开阔环境可提供稳定可靠的定位服务, 但由于卫星信号的遮挡和衰减, 在 GNSS 弱信号环境依然存在着无法高精度定位的挑战. 基于运动传感器的行人航迹推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)是比较有效的定位补充方案, 但是定位过程中需要校准初始航向角, 且面临着误差累积的关键问题. 数字地面多媒体广播(Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)信号频率低、穿透力强, 且信号发射塔在城市中的布设基本完善, 在定位方面具有很大潜能. 基于此, 本文提出一种单基站 DTMB 信号约束的 PDR 运动参数修正方法. 本文开发了一套完整的基于软件无线电的 DTMB 信号接收机, 并研究了基于 DTMB 信号的无线测距方法. 利用 DTMB 无线距离构建初始航向角的约束方程, 通过求解该方程可对 PDR 的初始航向角进行校正. 为了减少 PDR 运动过程中的累积误差, 通过粒子滤波框架将 PDR 运动参数与 DTMB 无线距离进行融合, 获得行人的修正定位结果. 实测结果表明, 本文方法在 DTMB 信号通视场景和非完全通视场景下均可有效定位, 且定位误差为 95%, 相比 PDR 分别降低了 41% 和 30%, 验证了提出方法的可行性及有效性.

关键词: 全球卫星导航系统; 数字地面多媒体广播; 行人航迹推算; 粒子滤波

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)04-0860-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211193

PDR Motion Parameter Correction Constrained by Single Base Station DTMB Signals

LIU Xiao-yan, CHEN Liang, JIAO Zhen-hang, LU Xiang-chen

(Department of State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: Currently, global navigation satellite systems(GNSS) can provide stable and reliable positioning services in open environments. However, due to the occlusion and attenuation of satellite signals, there is still challenges of high accuracy positioning in weak signal environments. Pedestrian dead reckoning(PDR) is an effective complementary solution for positioning, but it needs an initial heading angle and faces the critical problem of error accumulation. The digital terrestrial multimedia broadcasting(DTMB) signals have strong transmission power, which contributes to better urban propagation and building penetration, and the signal transmitters are well placed in the city, so it has great potential in terms of positioning. To this end, this paper proposed a PDR motion parameter correction method constrained by the single base station DTMB signals. In our study, a complete DTMB signal receiver based on software radio is developed, and the wireless ranging method based on DTMB signal is studied. The constraint function of the initial heading angle is constructed by wireless distance, and the initial heading angle of PDR can be corrected by solving the function. To reduce the accumulated errors during the pedestrian motion, the PDR motion parameters are fused with the wireless distance through particle filtering to obtain the corrected positioning results for pedestrians. The results of the field test in Wuhan, China, showed that the positioning errors of the proposed method can effectively position in both DTMB signal intervisibility scene and incomplete intervisibility scene. Compared with PDR, the 95% positioning error is reduced by 41% and 30% respectively, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: global navigation satellite systems; digital terrestrial multimedia broadcasting; pedestrian dead reckoning; particle filter

1 引言

目前,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)可以满足绝大部分的室外定位服务需求^[1,2]. 但由于卫星信号的遮挡和衰减,GNSS 定位技术在弱信号环境下依然存在着高精度定位的挑战^[3].

行人航迹推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)是一种自主定位方法,不需要依赖环境中的基础设施,只需要利用加速度、陀螺仪、磁力计等传感器就可以实现定位. PDR 系统的定位信息具有持续性长、更新率高、短期内准确率高和稳定性强等特点^[4,5]. 因此,在 GNSS 弱信号环境中, PDR 是比较有效的定位补充方案. 但是, PDR 面临着以下问题.

(1)需要先验的初始航向角. 虽然融合地磁的 PDR 定位方法可以获得相对于磁北的航向角,但是由于环境中的地磁容易受到干扰,所获得的航向角与实际航向角存在偏差^[5].

(2)步长估计模型往往需要经验参数,自适应估计能力不足. PDR 的步长估计参数依赖不同的行人行走方式和行走速度,需要事先对步长估计参数进行校准^[6].

(3)定位误差随着时间不断累积. PDR 定位方法的位置估计依赖前一时刻的位置,因此,定位误差会随着时间持续累积^[7].

将 PDR 运动参数与其他信号源进行融合定位是比较有效的定位解决方案. 在信号源的选择上,融合 WiFi 的定位效果比较好,往往可以达到米级的定位精度,但 WiFi 覆盖范围有限^[8]. 融合视觉的定位方法可以达到厘米级的定位精度,但受环境纹理和拍摄条件的影响^[9]. 融合地磁的定位方法需要预先建立地磁特征库,定位精度受环境磁场分布的影响^[10]. 数字地面多媒体广播(Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)是中国数字视频广播标准. 近年来,基于数字电视信号的测距^[11,12]和定位^[13-15]研究越来越多,且均取得了较好的结果. DTMB 信号作为一种定位机会信号(Signal of Opportunity, SOP)具有以下优势.

(1)传输效率高. DTMB 信号调制方式采用的是时域同步正交频分复用(Time Domain Synchronous Orthogonal Frequency Division Multiplexing, TDS-OFDM)^[16]模式, TDS-OFDM 将时间保护间隔同时用于传输信道估计信号,使其具有较高的传输效率^[17].

(2)抗多径干扰能力强. OFDM 系统具有抗多径干扰的能力,抵抗多径干扰的大小相应于其保护间隔的长度. TDS-OFDM 可以把几个 OFDM 帧的 PN 序列联合处理,使抵抗多径干扰的延时长度不受保护间隔长度的限制^[18].

(3)适于移动接收. 移动接收会产生多普勒效应和

遮挡干扰,使传输信道具有时变特性. OFDM 系统的信号处理假设信道传输特性准时不变,即在一个 OFDM 符号的时间内,假设信道是不变的,信道的变化被认为是在 OFDM 符号间发生的. TDS-OFDM 的信道估计仅取决于 OFDM 的当前符号,因此,只需考虑一个 OFDM 符号的信道变化影响(欧洲 DVB-T 需要 4 个连续的 OFDM 符号),使其比欧洲 DVB-T 更适于移动接收.

(4)DTMB 系统基础设施在中国的大量部署,使其在应用方面更容易形成一个标准操作程序,且不需要增加基础设施成本.

为了实现行人在室外环境的高精度定位,本文提出基于单基站 DTMB 信号约束的 PDR 运动参数修正方法. 首先将基于软件无线电接收机接收到的 DTMB 信号进行无线测距估计,然后通过无线距离对 PDR 的初始航向角参数进行约束求解,最后将 DTMB 距离与 PDR 的航向和速度参数进行融合得到定位结果. 为了验证提出方法的有效性和稳定性,设计了两条实地测试路线,并分别在通视场景下和有高楼遮挡的非完全通视场景下进行了实验验证. 实验结果表明,本文方法能够有效解决室外环境下 PDR 初始航向角的自适应估计以及运动过程中航向和速度参数的高精度修正.

2 基于 DTMB 信号的无线距离估计

DTMB 传输系统的发送端完成从输入数据码流到地面电视信道传输信号的转换. DTMB 系统以流的形式传输,并以帧的形式组织. DTMB 系统支持单载波和多载波调制,本文研究以多载波调制为主. 假设 OFDM 系统由 N 个子载波组成, $\mathbf{X} = \{X(k) | k=0, 1, \dots, N-1\}$ 表示 N 个子载波的集合,其中, k 为子载波序号索引, $X(k)$ 表示第 k 个子载波符号. 经过逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)以后,所传输的第 l 个采样 $x(l)$ 在时域^[11]可以表达为

$$x(l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kl/N} \quad l=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中, $j = \sqrt{-1}$. 由于多普勒效应以及发射机与接收机之间的振荡器不匹配等因素,信号接收机端往往存在载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)和采样频率偏移(Sampling Frequency Offset, SFO). 经过傅里叶变换后,接收端所接收的第 m 个信号帧第 k 个子载波在频域^[19]可以表达为

$$Y_m(k) = e^{j\frac{2\pi}{N}(mN_s + N_g)[k\eta + \varepsilon(1+\eta)]} \Phi_N(k\eta + \varepsilon(1+\eta)) \times X_m(k) H(k) + \text{ICI}_m(k) + W_m(k) \quad (2)$$

其中, $N_s \triangleq N + N_g$ 表示一个信号帧的总采样数, N_g 为保护间隔的长度; $\eta \triangleq \Delta T/T$ 表示归一化 SFO, T 为接收端的

采样周期; $\varepsilon \triangleq \Delta fNT$ 表示归一化 CFO; $H(k)$ 为信道频域响应; $W_m(k)$ 为服从高斯分布 $N \sim (0, \sigma^2)$ 的噪声; $\Phi_N(x)$ 表示衰减因子, 表达式为

$$\Phi_N(x) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{N} ix} = e^{j \frac{2\pi}{N} (N-1)x} \frac{\sin(\pi x)}{N \sin(\pi x/N)} \quad (3)$$

$\text{ICI}_m(k)$ 表示第 k 个子载波的载波间干扰 (Inter Carrier Interference, ICI), 该项主要是由相位和频率偏移破坏了载波间的正交特性所产生的干扰组成, 具体的表达式为

$$\text{ICI}_m(k) = \sum_{i=0, i \neq k}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{N} (mN_s + N_s) [i\eta + \varepsilon(1+\eta)]} \Phi_N(i\eta + \varepsilon(1+\eta) + i - k) X_m(i) H(i) \quad (4)$$

根据 DTMB 国家标准^[20], 有 36 个固定子载波 K_{TPS} 用于传输参数信令 (Transmission Parameter Signaling, TPS). 由于 TPS 可以在几个小时内甚至几十天内保持稳定不变, 即 $\forall k \in K_{\text{TPS}}$ 使得 $X_m(k) = X_{m+1}(k)$, 因此, 信号帧 m 的 CFO 可以通过下式估计得出^[21]:

$$\Delta f_m = - \frac{\angle(\Theta_m(\eta))}{2\pi N_s T (1+\eta)} \quad (5)$$

其中, $\angle(\cdot)$ 表示相位角; $\Theta_m(\eta)$ 定义为

$$\Theta_m(\eta) \triangleq \sum_{k \in K_{\text{TPS}}} Y_{m+1}^*(k) Y_m(k) e^{j \frac{2\pi N_s}{N} k\eta} \quad (6)$$

其中, 符号“*”表示复共轭. 由于接机和发射器都与 GNSS 时间同步, $|\eta| \ll 1$, 因此, 式(5)和式(6)可以改写为

$$\Delta f_m = - \frac{\angle(\Theta_m)}{2\pi N_s T} \quad (7)$$

$$\Theta_m \triangleq \sum_{k \in K_{\text{TPS}}} Y_{m+1}^*(k) Y_m(k) \quad (8)$$

在静态场景, CFO 主要由发射机与接收机之间的振荡器不匹配所引起; 在动态场景, 除了发射机与接收机之间的振荡器不匹配外, CFO 主要由多普勒效应引起. 因此, 信号帧 m 的 CFO 可以建模为

$$\Delta f_m = f_m^s + f_m^d + \tau_m \quad (9)$$

其中, f_m^s 表示由发射机与接收机之间的振荡器不匹配所引起的 CFO; f_m^d 表示由多普勒效应所引起的 CFO; τ_m 为高斯噪声. 通常来说, 与 f_m^d 相比, f_m^s 更加稳定. 假设在一次开机测试到结束的过程中 f_m^s 保持不变, 那么, 在行人手持接收机行走的过程中, 信号帧 $m+1$ 相对于信号帧 m 到发射端的多普勒速度可以表达为

$$\Delta v_{m+1,m}^{\text{DTMB}} = \left(\Delta f_m - f_m^s \right) \frac{c}{f_c} \quad (10)$$

其中, c 和 f_c 分别是光速和载波频率. 式(7)存在着周

期模糊度问题, 使得式(10)出现多普勒速度模糊度, 且多普勒速度模糊度为 $c/(N_s T f_c)$. DTMB 信号载波频率 f_c 的范围为 400~800 MHz, 可得多普勒速度模糊度为 600 m/s. 由于本文研究主要针对行人正常行走, 且行走速度小于 3 m/s, 因此, 不存在速度模糊度问题. 最后, 将 $\Delta v_{m+1,m}^{\text{DTMB}}$ 以时间进行积分, 可以得到信号帧 m 相对第一帧的距离为

$$\Delta d_m^{\text{DTMB}} = \sum_{i=0}^{m-1} \Delta v_{i+1,i}^{\text{DTMB}} N_s T \quad (11)$$

3 单基站 DTMB 信号约束的 PDR 运动参数修正

PDR 是一种针对行人定位场景的相对定位算法, 其基本原理是利用加速度计和陀螺仪实时解算航向角, 同时检测行人行走状态, 并用步长模型估计步长. 基于上一步的位置, 结合航向角与步长, 可推算当前行人的位置. PDR 的计算式如下:

$$\begin{cases} X_{n+1}^E = X_n^E + L_{n+1} \cos \varphi_{n+1} \\ Y_{n+1}^N = Y_n^N + L_{n+1} \sin \varphi_{n+1} \end{cases} \quad (12)$$

其中, n 表示当前时刻; L 表示步长; φ 表示航向角; X_n^E 和 Y_n^N 分别表示东向和北向的坐标. 由于运动传感器的固有特性, PDR 的航向角往往会产生漂移, 使得行人位置估计误差增大. 而且, 航向角是相对的, 通常需要采用初始航向角校准才能使其与导航坐标系相一致. PDR 的步长计算通常采用数值模型进行估计, 本文所采用的步长估计^[22]式如下:

$$L = K \cdot \sqrt{\text{Acc}_{\max} - \text{Acc}_{\min}} \quad (13)$$

其中, K 表示实际步长与估计步长的比率参数; $\text{Acc}_{\max}$ 和 $\text{Acc}_{\min}$ 分别是一步中加速度模的最大值和最小值. 根据步长参数和运动时间差可进一步求得 PDR 的速度参数. 在本文中, 使用 AHRS (Attitude and Heading Reference System)^[23] 中的姿态计算方法获得 PDR 的航向角, 该方法融合了加速度计、磁力计和陀螺仪进行姿态的解算, 在此不再赘述.

3.1 PDR 初始航向修正

针对 PDR 的航向漂移和速度估计不准确问题, 本文采用 DTMB 信号对 PDR 的运动参数进行修正. 当行人在 GNSS 可用环境和不可用环境进行切换时, PDR 的初始位置 $P_0^{\text{PDR}}(X_0^{\text{PDR}}, Y_0^{\text{PDR}})$ 则为可用环境时的 GNSS 终点位置. 为了估计 PDR 的初始航向角 φ_0^{PDR} , 将 PDR 的位置坐标转换为到 DTMB 信号发射塔 $P_b^{\text{DTMB}}(X_b^{\text{DTMB}}, Y_b^{\text{DTMB}})$ 的距离信息, 具体的计算式如下:

$$\Delta d_i^{\text{PDR}} = d_i^{\text{PDR}} - d_0^{\text{PDR}} = \|P_i^{\text{PDR}} - P_b^{\text{DTMB}}\| - \|P_0^{\text{PDR}} - P_b^{\text{DTMB}}\| \quad (14)$$

为了自适应获得 PDR 在运动过程中的初始航向角,减少先验参数对 PDR 定位的限制,本文提出基于 DTMB 距离参数约束 PDR 的初始航向角 φ_0^{PDR} ,约束函数定义如下:

$$\varphi_0^{\text{PDR}} = \min_{\eta \in (0, 360^\circ)} \sum_{i=1}^n \left\| \Delta d_{i,\eta}^{\text{PDR}} - \Delta d_i^{\text{DTMB}} \right\| \quad (15)$$

当运动轨迹为轴对称时,通过求解该函数可获得两个初始航向角,分别为真实初始航向角和伪初始航向角,其中,通过伪初始航向角估计的 PDR 运动轨迹与真实初始航向角估计的 PDR 运动轨迹关于起点到 DTMB 信号发射塔的直线相对称. 但实际行人行走过程中,运动轨迹往往很难形成轴对称,因此,通过上式可求解得到唯一初始航向角.

3.2 PDR 运动航向和速度修正

为了进一步修正 PDR 在运动过程中的航向角及速度参数,采用粒子滤波^[24]框架将 PDR 的运动参数与基于 DTMB 信号估计的距离结果进行融合.

采用求解的初始航向角 φ_0^{PDR} 校正 PDR 的初始航向,使其与东北天框架相一致, PDR 的航向角 φ 为短时运动轨迹与北向的夹角. 由于 φ 通过陀螺仪的短时积分得到,其误差漂移与 MEMS 传感器的性能及导航持续时间相关. 基于粒子滤波的状态模型和观测模型表达为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_n = f(\mathbf{X}_{n-1}, \zeta_n) \\ Z_n = g(\mathbf{X}_n, \chi_n) \end{cases} \quad (16)$$

本文方法粒子滤波状态向量为 $\mathbf{X}_n = [x, y, \varphi, s]^T$, 状态的更新方程定义为

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + s_n \Delta t_n \cos \varphi_n + \zeta_1 \\ y_{n+1} = y_n + s_n \Delta t_n \sin \varphi_n + \zeta_2 \\ \dot{\varphi}_{n+1} = \dot{\varphi}_n + \zeta_3 \\ \varphi_{n+1} = \varphi_n + \dot{\varphi}_n \Delta t_n + \zeta_4 \\ s_{n+1} = s_n + \zeta_5 \end{cases} \quad (17)$$

其中, x_n 和 y_n 分别表示导航坐标系下的东向和北向坐标; s_n 表示 n 时刻的速度; φ_n 表示 n 时刻的航向; $\dot{\varphi}_n$ 表示 n 时刻的航向变化率. 运动过程中的噪声服从高斯分布 $N(0, \xi_n^2)$.

本文的观测模型为 $Z_n = [\Delta d_n^{\text{DTMB}}, \varphi_n^{\text{PDR}}, s_n^{\text{PDR}}]$, 观测噪声服从高斯分布 $N(0, \chi_n^2)$. 观测方程定义为

$$\begin{cases} \Delta d_n^{\text{DTMB}} = \sqrt{(x_n - X_b^{\text{DTMB}})^2 + (y_n - Y_b^{\text{DTMB}})^2} - \sqrt{(x_0 - X_b^{\text{DTMB}})^2 + (y_0 - Y_b^{\text{DTMB}})^2} + \chi_1 \\ \varphi_n^{\text{PDR}} = \varphi_n + \chi_2 \\ s_n^{\text{PDR}} = s_n + \chi_3 \end{cases} \quad (18)$$

基于观测值粒子滤波的后验概率计算式如下:

$$p(\mathbf{X}_n | Z_{1:N}) = \sum_{i=1}^{N_p} w_n^i \delta(\mathbf{X}_n - \mathbf{X}_n^i) \quad (19)$$

其中, N 表示观测值个数; N_p 为粒子数; w_n^i 为第 i 个粒子的权值; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数.

后验概率分布的采样和权重可以用来近似后验分布,但通常情况下系统状态的后验分布是需要估计的,因此粒子滤波方法引入一个容易对其采样的重要性密度函数 $q(\mathbf{X}_n | Z_{1:N})$, 粒子权重则变为满足下式的形式:

$$w_n^i \propto \frac{p(\mathbf{X}_n^i | Z_{1:N})}{q(\mathbf{X}_n^i | Z_{1:N})} w_{n-1}^i \quad (20)$$

当 N_p 趋近于无穷时,经过式(20)可以无限逼近后验分布. 粒子权值的归一化计算式为

$$\tilde{w}_n^i = \frac{w_n^i}{\sum_{j=1}^{N_p} w_n^j} \quad (21)$$

系统状态的后验概率密度估计式为

$$p(\mathbf{X}_n | Z_{1:N}) = \sum_{i=1}^{N_p} \tilde{w}_n^i \delta(\mathbf{X}_n - \mathbf{X}_n^i) \quad (22)$$

为了减轻粒子退化问题,采用重采样方法更新粒子数目. 重采样方法主要通过粒子权重方差来检验有效粒子数目,并且当有效粒子数目小于阈值时对粒子集进行重新采样,有效粒子数的计算式如下:

$$Np' = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_p} (w_n^i)^2} \quad (23)$$

整个粒子滤波的融合过程如算法 1 所示.

算法 1 基于粒子滤波的 PDR 运动参数修正方法

输入: PDR 的初始位置 $(x_0, y_0)^{\text{PDR}}$; PDR 运动参数, 包括航向变化率、航向和速度 $(\dot{\varphi}, \varphi, s)^{\text{PDR}}$; 基于 DTMB 信号的距离估计结果 Δd^{DTMB} .

输出: 修正后的运动参数 $(x, y)^{\text{fusion}}$.

1. 初始化: 设置粒子数 N_p , 并生成粒子; 设置过程噪声 ζ_n 和观测噪声 χ_n ;
2. 状态量更新: 根据式(17)更新状态量;
3. 粒子权值更新: 根据式(20)和式(21)计算粒子权值并归一化;
4. 粒子重采样: 根据式(23)计算有效粒子数并重采样;
5. 状态估计: 根据式(22)对系统的状态值进行估计.

4 实验结果及分析

4.1 DTMB 信号通视场景下定位测试及分析

本文设计了 2 组通视场景下的实验对提出方法进行实地测试, 测试场地为武汉市莲花湖公园. 测试时, 测试人员的行走路线如图 1 所示, 路线总长约为 116 m. 沿着测试路线, 测试人员持 DTMB 信号接收机、智能手

机和 GPS 信号接收机,分别按照顺时针和逆时针方向匀速行走一圈.其中,实地测试的地面真值参考由 GPS 提供.

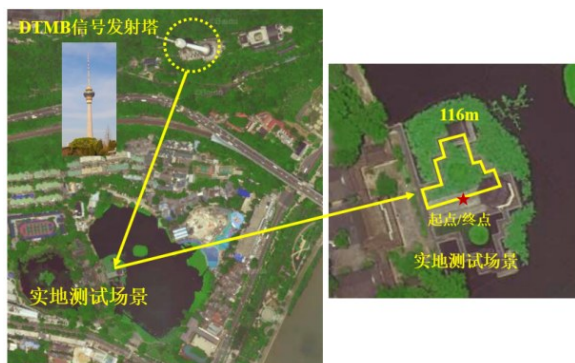
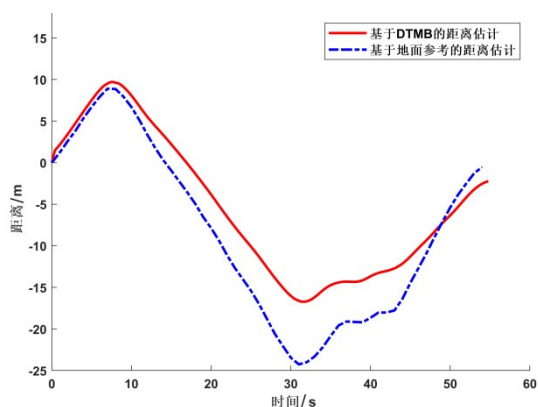
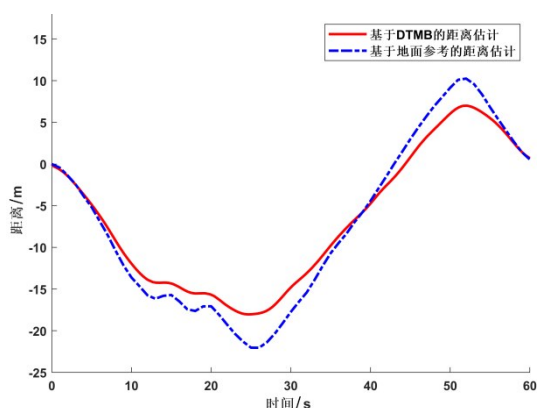


图1 实地测试通视场景

对行人行走过程中所接收到的 DTMB 信号进行距离估计,两条行走路线的距离估计结果如图2所示.为了评估基于 DTMB 信号距离估计的准确性,计算 GPS 地面真值参考坐标距 DTMB 信号发射塔的距离,并与基于 DTMB 信号解算的距离估计结果进行误差统计,统计结



(a) 顺时针路线



(b) 逆时针路线

图2 基于 DTMB 信号的距离估计结果

果如图3所示.可以看出,顺时针路线的 DTMB 距离估计结果的最大误差为 6.48 m,最小误差为 0.03 m,误差中位数为 2.11 m;逆时针路线的 DTMB 距离估计结果的最大误差为 4.20 m,最小误差为 0.12 m,误差中位数为 1.86 m.

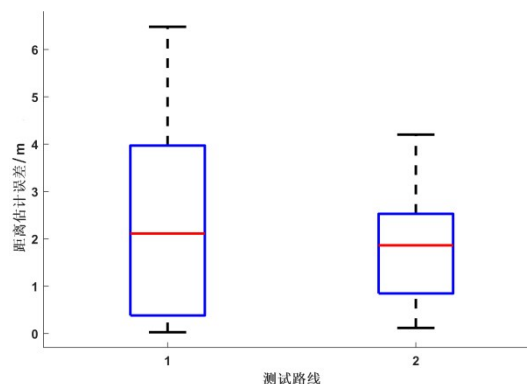
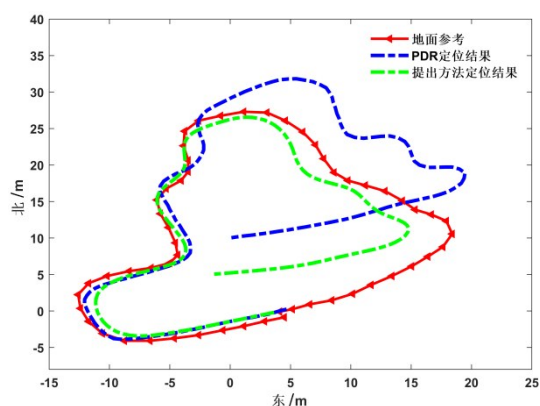


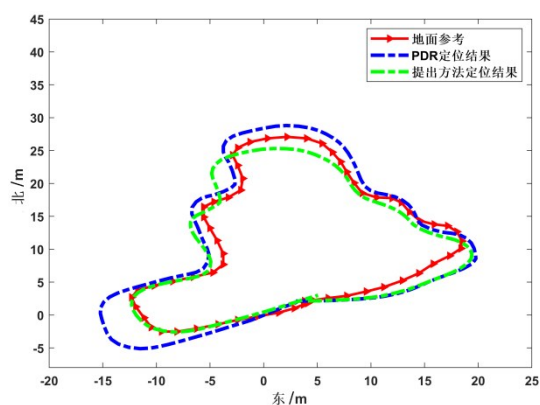
图3 基于 DTMB 信号的距离估计结果误差统计

利用 DTMB 距离约束对 PDR 的初始航向角进行求解,可得顺时针轨迹的初始航向角为 115° ,逆时针轨迹的初始航向角为 139° ,并对 PDR 解算的初始航向角进行校正更新.校正后的 PDR 方向与实际导航方向一致.对更新后的 PDR 运动参数与基于 DTMB 信号的距离估计结果进行粒子滤波框架的融合定位,定位结果如图4所示,其中图4(a)为顺时针路线的定位结果,图4(b)为逆时针路线的定位结果.可以看出,顺时针路线的 PDR 轨迹在运动开始一段时间内与地面真值参考坐标基本一致;随着运动时间的增加,PDR 轨迹的航向在后期产生漂移,出现了明显的转向错误,使其运动轨迹与地面真值参考坐标相差较大.逆时针路线的 PDR 航向整体漂移较小,但是,PDR 的速度参数明显大于实际速度,使其运动轨迹的尺度大于地面真值参考轨迹.经过与 DTMB 信号的融合校正之后,顺时针路线的航向得到了明显的修正,符合实际导航方向;逆时针轨迹的速度得到了校正,与实际的运动速度相一致.

为了定量评价提出方法的有效性,对 PDR 和提出方法的定位轨迹进行了定量误差统计,并绘制了误差的累积分布曲线,如图5所示,相应的误差定量统计结果如表1所示.可以看出,PDR 定位方法 68% 的误差小于 2.67 m,95% 的误差小于 9.19 m,最大误差为 10.84 m,而本文方法 68% 的误差优于 2.08 m,95% 的误差优于 5.41 m,最大误差为 7.31 m.在通视场景下的实测实验结果表明,本文方法利用 DTMB 信号的距离约束,不仅实现了 PDR 初始航向角的自适应估计,而且使 PDR 的运动参数也得到了明显修正,使得 PDR 的定位性能显著提高.



(a) 顺时针路线



(b) 逆时针路线

图4 测试路线的运动轨迹

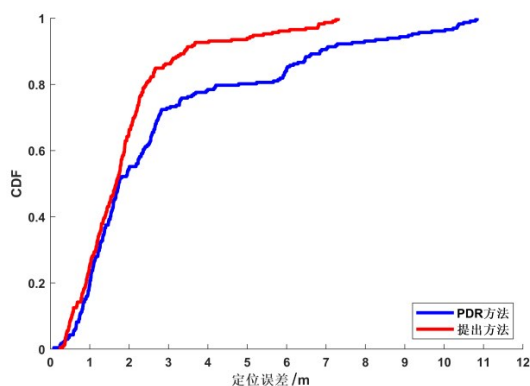


图5 通视场景下定位结果的误差累积分布曲线

表1 通视场景下定位结果精度统计

定位方法	68% 误差	95% 误差	最大误差
PDR	2.67 m	9.19 m	10.84 m
本文方法	2.08 m	5.41 m	7.31 m

4.2 DTMB 信号非完全通视场景下定位测试及分析

为了验证提出算法在城市环境非完全通视场景下定位的可行性,分别设计了2组在具有高楼遮挡的城市

道路上的实验,具体的实验场景如图6所示.第1组实验测试人员从起点出发走到终点;第2组实验测试人员从终点出发原路返回到起点.测试路线总长约450 m,且部分行走路段在DTMB信号接收过程中会受到高楼遮挡,从而形成非完全通视的实验环境.考虑到高楼的遮挡影响,为了更精确地评估本文算法的定位性能,此次测试采用Xsens MTi-G-710传感器^[25]提供地面真值参考.该产品是基于MEMS的工业级传感器,采用GNSS/INS组合输出高频位置和姿态数据,具有高度灵活特性.测试时,测试人员持DTMB信号接收机、智能手机和Xsens MTi-G-710传感器沿着测试路线稳定、匀速行走.

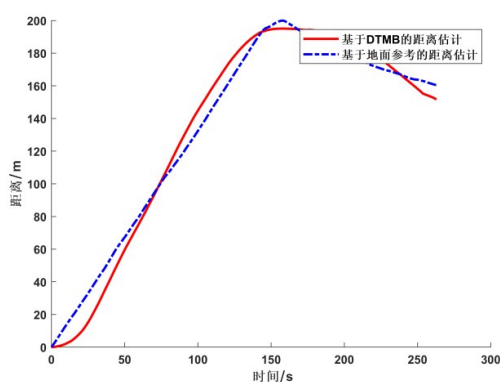


图6 实地测试非完全通视场景

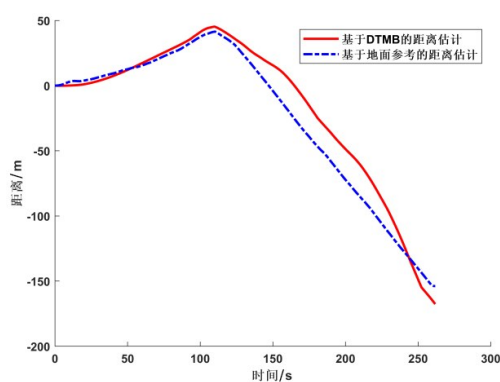
对行人行走过程中所接收到的DTMB信号进行距离估计,两条路线的距离估计结果如图7所示.利用地面真值参考坐标反算距DTMB信号发射塔的距离,并与通过DTMB信号解算的距离估计结果进行误差统计,统计结果如图8所示.可以看出,第1组测试的前半程和第2组测试的后半程误差比较大,主要是由于该路段具有高楼遮挡.第1组测试的距离估计结果的误差中位数为7.81 m;第2组测试的距离估计结果的误差中位数为5.29 m.

利用DTMB距离约束方程对PDR的初始航向角进行求解,可得第1组轨迹的初始航向角为 241° ,第2组轨迹的初始航向角为 8° ,并对PDR解算的初始航向角进行校正更新.对更新后的PDR运动参数与基于DTMB信号的距离估计结果进行粒子滤波框架的融合定位,得到的定位结果如图9所示,其中图9(a)为第1组测试路线的定位结果,图9(b)为第2组测试路线的定位结果.可以看出,第1组和第2组测试路线均在转弯处发生偏移;但通过分析可以看出,发生偏移主要是由于估计的行人速度与实际速度不符.经过DTMB信号的融合校正后,第1组和第2组测试路线的行人速度均得到了有效修正.

PDR和本文方法定位结果的定量误差累积分布曲线如图10所示,相应的误差定量统计结果如表2所示.



(a) 第1组测试路线



(b) 第2组测试路线

图7 基于DTMB信号的距离估计结果

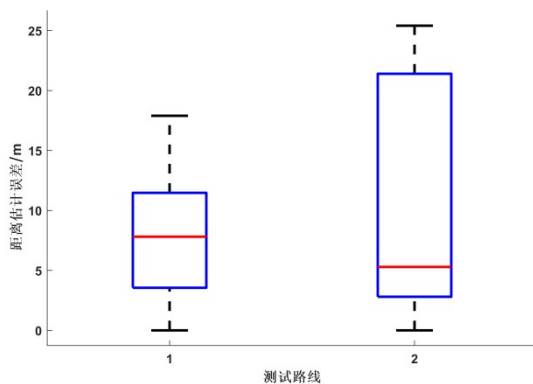
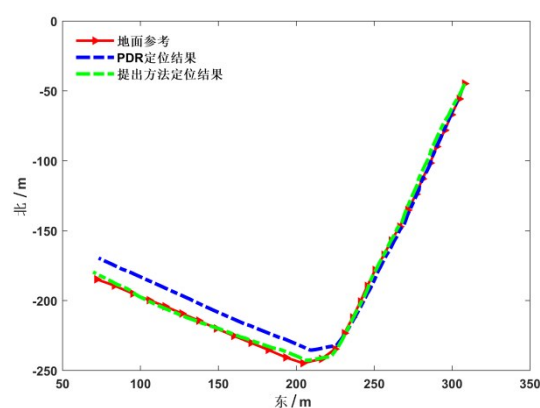
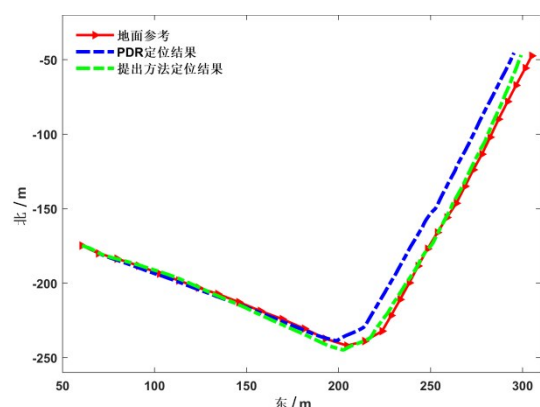


图8 基于DTMB信号的距离估计结果误差统计

可以看出,本文方法的68%误差优于6.50 m,95%的误差优于9.34 m;而PDR方法的68%误差优于9.70 m,95%的误差优于13.27 m.在非完全通视场景下的实测实验结果表明,本文方法利用DTMB信号的距离约束,不仅实现了PDR初始航向角的自适应估计,而且使PDR的运动参数也得到了明显修正,使得PDR的定位性能显著提高.



(a) 第1组测试路线的定位结果



(b) 第2组测试路线的定位结果

图9 街道测试路线的定位结果

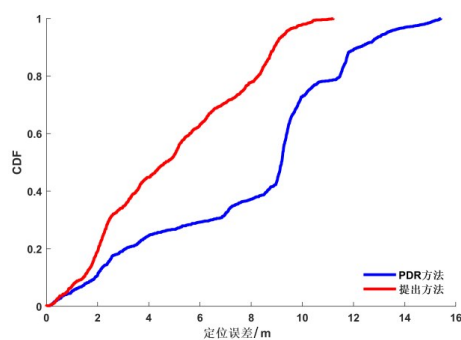


图10 非完全通视场景下定位结果的误差累积分布曲线

表2 非完全通视场景下定位结果精度统计

定位方法	68% 误差	95% 误差	最大误差
PDR	9.70 m	13.27 m	15.41 m
本文方法	6.50 m	9.34 m	11.21 m

5 结论

GNSS在室外弱信号环境依然存在着无法高精定位的挑战.PDR是一种有效的自主定位技术,同时,

DTMB 信号作为定位机会信号具有显著优势. 为了解决室外 GNSS 弱环境的行人稳健定位问题, 本文提出一种基于 DTMB 信号约束的 PDR 运动参数修正方法. 该方法利用 DTMB 信号对 PDR 运动参数进行约束和修正, 能够实现室外环境下 PDR 初始航向角的自适应估计以及运动过程中的航向和速度参数的高精度修正. 为了验证本文方法的有效性和稳定性, 分别在通视场景下和有高楼遮挡的非完全通视场景下进行了实验验证. 实验结果表明本文方法在通视场景和非完全通视场景下均可有效定位. 本文方法具有基础设施成熟、自主性强的特点, 为实现行人定位提供了一种新的解决思路.

为了进一步增强提出方法的适应性, 未来工作可以考虑对 DTMB 多径信号跟踪建模, 以使其在复杂环境下具有更好的 DTMB 距离估计结果, 从而实现高精度融合定位.

参考文献

- [1] 陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1316-1326.
CHEN R Z, CHEN L. Indoor positioning with smartphones: The state-of-the-art and the challenges[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1316-1326. (in Chinese)
- [2] LU X C, CHEN L, SHEN N, et al. Decoding PPP corrections from BDS B2b signals using a software-defined receiver: An initial performance evaluation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7871-7883.
- [3] 贾琼琼, 吴仁彪, 王文益, 等. 满足高精度测量的 GNSS 自适应干扰抑制算法[J]. 电子学报, 2018, 46(11): 2753-2760.
JIA Q Q, WU R B, WANG W Y, et al. GNSS adaptive interference suppression algorithm for high accuracy measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11): 2753-2760. (in Chinese)
- [4] 周牧, 耿小龙, 谢良波, 等. 室内 Wi-Fi/PDR 自适应鲁棒卡尔曼滤波融合定位方法[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 9-15.
ZHOU M, GENG X L, XIE L B, et al. Indoor Wi-Fi/PDR fusion localization based on adaptive and robust Kalman filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 9-15. (in Chinese)
- [5] 任明荣, 孟娟, 王普. MEMS-INS 室内行人定位三维地图匹配算法[J]. 电子学报, 2021, 49(1): 111-116.
REN M R, MENG J, WANG P. MEMS-INS based indoor pedestrian localization using three-dimensional map matching algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(1): 111-116. (in Chinese)
- [6] YU Y, CHEN R Z, CHEN L, et al. Precise 3-D indoor localization based on Wi-Fi FTM and built-in sensors[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11753-11765.
- [7] YU Y, CHEN R Z, CHEN L, et al. H-WPS: Hybrid wireless positioning system using an enhanced Wi-Fi FTM/RS-SI/MEMS sensors integration approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, (99): 1.
- [8] HOU X Y, BERGMANN J. Pedestrian dead reckoning with wearable sensors: A systematic review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 143-152.
- [9] QIN T, LI P L, SHEN S J. VINS-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [10] PEI L, LIU D H, ZOU D P, et al. Optimal heading estimation based multidimensional particle filter for pedestrian indoor positioning[J]. IEEE Access, 2018, 6: 49705-49720.
- [11] CHEN L, JULIEN O, THEVENON P, et al. TOA estimation for positioning with DVB-T signals in outdoor static tests[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(4): 625-638.
- [12] CHEN L, THEVENON P, SECO-GRANADOS G, et al. Analysis on the TOA tracking with DVB-T signals for positioning[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(4): 957-961.
- [13] DAI L L, WANG Z C, PAN C Y, et al. Wireless positioning using TDS-OFDM signals in single-frequency networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2012, 58(2): 236-246.
- [14] Yang C, Chen L, Julien O, et al. Carrier phase tracking of OFDM-based DVB-T signals for precision ranging[C]// Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland: Institute of Navigation, 2017: 736-748.
- [15] CONG L, WANG H D, QIN H L, et al. An environmentally-adaptive positioning method based on integration of GPS/DTMB/FM[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4292-4313.
- [16] 郑紫微, 杨知行, 朱义胜, 等. 存在非线性失真和相位噪声影响的 CP-OFDM 与 TDS-OFDM 数字电视地面广播传输系统的性能分析[J]. 电子学报, 2004, 32(10): 1625-1629.
ZHENG Z W, YANG Z X, ZHU Y S, et al. Performance analysis of the CP-OFDM-based and the TDS-OFDM-

based digital television terrestrial broadcasting transmission systems in the presence of nonlinear distortions and phase noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(10): 1625-1629. (in Chinese)

- [17] ONG C Y, SONG J, PAN C Y, et al. Technology and standards of digital television terrestrial multimedia broadcasting[Topics in Wireless Communications] [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(5): 119-127.
- [18] RABINOWITZ M, SPILKER J J. A new positioning system using television synchronization signals[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(1): 51-61.
- [19] KIM Y H, LEE J H. Joint maximum likelihood estimation of carrier and sampling frequency offsets for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2): 277-283.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 数字电视地面广播传输系统帧结构、信道编码和调制: GB 20600-2006[S]. 2006.
- [21] WANG X, HU B. A low-complexity ML estimator for carrier and sampling frequency offsets in OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 503-506.
- [22] JAHN J, BATZER U, SEITZ J, et al. Comparison and evaluation of acceleration based step length estimators for handheld devices[C]//2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Zurich: IEEE, 2010: 1-6.
- [23] MADGWICK O H S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays[J]. Report x-io and University of Bristol(UK), 2010, 25: 113-118.
- [24] 夏楠, 王珏, 李博. 基于粒子滤波和交互多模型的移动定位方法[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 197-203.
XIA N, WANG J, LI B. A mobile localization method based on particle filter and interacting multiple models[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 197-203. (in Chinese)
- [25] MTi 100 系列产品参数[EB/OL]. [2021]. <https://www.xsens.cn/products/mti-100-series/>.

作者简介



刘晓燕 女, 1991 年出生, 内蒙古呼和浩特人. 现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为智能手机泛在定位、多源融合室内外无缝定位技术等.
E-mail: xiaoyanliu@whu.edu.cn



陈亮 男, 1977 年出生, 江苏南通人. 现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室教授、博士生导师, 导航定位与位置服务研究室主任, 国家海外高层次人才引进计划青年项目入选人才. 主要研究方向为 5G 多载波导航新体制理论与方法、智能手机泛在定位、多源融合室内外无缝导航等.

E-mail: l.chen@whu.edu.cn



焦振航 男, 1993 年出生, 河南郑州人. 现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为基于多载波通信信号(WiFi, 4G, DTMB 等)的测距与定位、通信信号和 GNSS 的融合定位.

E-mail: 2016286190128@whu.edu.cn



卢祥晨 男, 1995 年出生, 福建三明人. 现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为低轨卫星导航增强、GNSS 信号处理、室内外无缝定位.

E-mail: 2018286190164@whu.edu.cn