

DOI: 10.12265/j.gnss.2020110603

GPS-RTK/UWB 紧组合精密动态定位性能分析

王生亮^{1,2}, 刘根友¹, 高铭^{1,2}, 曹士龙^{1,2}, 肖恭伟^{1,2}, 赵文浩^{1,2}

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要: 为克服 GPS-RTK 定位在复杂环境下由于信号遮挡, 可视卫星数量不足等原因无法获取厘米级高精度定位结果的不足, 研究将超宽带 (UWB) 短距离高精度定位系统与实时动态 (RTK) 进行紧组合来提高复杂环境下动态定位的精度. 依据 UWB 定位原理, 给出了 GPS-RTK/UWB 紧组合数学模型, 详细介绍了数据处理流程. 滑轨动态实验结果表明, 观测环境良好时, GPS-RTK/UWB 紧组合与 GPS 相比能进一步提升固定率和动态定位精度; 在截止高度角为 40° 的情况下, 模糊度固定率从 20.93% 显著提升到 93.96%, N、E 方向定位精度提升至厘米级, U 方向定位精度提升至分米级, 仍能满足一定的工程需要.

关键词: GPS-RTK; 超宽带 (UWB); 到达时间差; 紧组合; 整周模糊度

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2021)02-0069-08

0 引言

GPS 的建成和投入使用极大地改变了传统的测绘方式, 其中实时动态 (RTK) 定位技术可以获取厘米级定位精度, 广泛应用于定位导航、工程测量等领域中^[1-2]. RTK 技术需要一台基准站和一台流动站接收机同时观测可见卫星, 然后基准站通过通信链路发送伪距、载波相位改正信息给流动站, 流动站通过差分处理后获得相对于基准站的高精度的位置坐标^[3]. 目前 RTK 技术已相当成熟, 但是在一些特殊复杂环境下, 如城市峡谷、树下遮挡、露天矿底部, 流动站观测值存在多路径误差或由于可视卫星空间几何构型差、数量不足等原因造成无法获取高精度的固定解, 只能得到低精度的浮点解甚至无法定位, 严重影响了工程测量的需求^[4]. 目前针对如何增强 RTK 技术已有大量的研究, 如星基增强、伪卫星增强、移动通信增强、多源传感器增强^[5-8]等.

超宽带 (UWB) 技术是于 2002 年左右才开始大力发展起来的一种短距离通信、定位系统, 其采用独特的脉冲信号, 具有信号抗干扰能力强、通信容量高、抗多径能力强、时间分辨率高等优点, 因此在短距离室内定位领域具有非常明显的优势^[9-11]. 目前

UWB 系统采用的信号体制主要有到达时间 (TOA)、到达时间差 (TDOA)、信号飞行时间 (TOF)、双向测距 (TWR) 等^[12]. 将 UWB 与 GPS 组合来增强定位能力其优势在于 UWB 系统成本低、复杂度低、抗多路径效应强、测距精度高, 且 UWB 主要在地面附近布设不受高处遮挡物影响^[13-15]. 因此将 UWB 与 RTK 技术进行组合定位可以有效弥补复杂环境下 RTK 无法获取高精度定位结果的缺陷, 且紧组合可以充分利用观测值比 GPS-RTK 更有优势. 但 UWB 系统也有自身的不足, 例如有限的测距范围, 需要按需自行布设等^[16-18].

本文首先介绍了 UWB 定位系统的原理和基本观测方程, 然后给出了 GPS-RTK/UWB 紧组合的数学模型, 并给出了详细的数据处理流程. 在滑轨推车动态定位实验中, 通过设置不同的截止高度角和人为遮挡干扰方式模拟城市峡谷或露天矿井底部等复杂环境, 对 GPS-RTK/UWB 紧组合的性能进行详细分析.

1 GPS-RTK/UWB 紧组合数学模型

1.1 UWB 定位原理

UWB 是近年来兴起的一项新技术, 其不需要传

收稿日期: 2020-11-06

资助项目: 国家重点研发计划项目“协同精密定位技术”(2016YFB0501900); 国家自然科学基金资助课题(41774017)

通信作者: 刘根友 E-mail: liugy@whigg.ac.cn

统通信体制中的载波,而是通过发送和接收纳秒及以下的极窄脉冲来传输数据,频率范围在 3.1~10.6 GHz,具有传输速率高、穿透能力强、定位精度高等优点,目前在室内外定位领域已得到了广泛的应用。

UWB 定位系统包括基站 (BS)、标签节点 (Tag) 及定位服务器,该系统通过 BS 对 Tag 节点测量高精度的 TOA、TDOA、TOF 后进行定位。基于 TDOA 定位原理的 UWB 系统仅需与 BS 之间保持高精度时间同步即可,降低了 Tag 与 BS 之间时间同步的要求。三维定位时测量 Tag 到 4 个及以上 BS 之间的 TDOA 测量值,多个 TDOA 观测值之间建立的双曲面即可交会出 Tag 的位置,基于 TDOA 二维平面定位原理如图 1 所示:

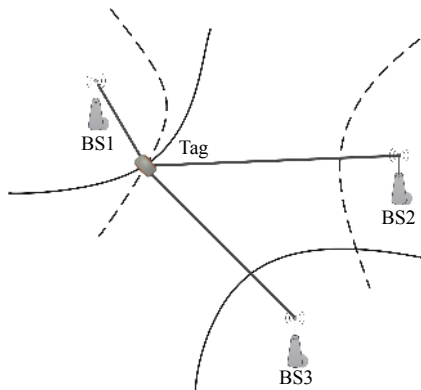


图 1 TDOA 二维平面定位原理

UWB 三维定位时,设主基站 BS1 坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) ,第 i 个基站 BS i 的已知坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ,其中 $i = (2, \dots, p)$,Tag 的待估位置为 (x, y, z) ,令 Tag 到 BS i 之间的距离为 R_i , $R_{i,1}$ 为 Tag 到主 BS 和从 BS 之间的 TDOA,建立方程

$$\begin{cases} R_{2,1} = R_2 - R_1 + \varepsilon_{2,1} = c(t_2 - t_1) \\ \vdots \\ R_{p,1} = R_p - R_1 + \varepsilon_{p,1} = c(t_p - t_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}$; $t_i - t_1$ 为 Tag 信号到达不同 BS 的时间差; $c = 299\,792\,458$ m/s 为电磁波传播速度,一般假设 $\varepsilon_{i,1}$ 是零均值,方差为 σ^2 的高斯白噪声。

对于采用 TDOA 测量值进行定位的 UWB 系统,由于 $\Delta R_i = R_i - R_1$ 中均存在 R_1 ,因此各 ΔR_i 之间是相互关联的,此时 TDOA 测量值的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{Q}_{\text{uwb}} = \text{cov}(\mathbf{R}) = \sigma_R^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,一般情况下 σ_R 可取为 0.1 m,或根据 UWB 实际测距精度评估结果确定即可。

1.2 GPS-RTK/UWB 紧组合数学模型

GPS-RTK 一般是先进行基准站与流动站站间单差,再进行卫星间求双差,设基准站为 m ,移动站为 r ,对卫星 p, q 的双差观测方程为

$$\begin{cases} \Delta P_{mr}^{pq} = \Delta \rho_{mr}^{pq} + \Delta \varepsilon_{\rho_{mr}^{pq}} \\ \Delta \Phi_{mr}^{pq} = \Delta \phi_{mr}^{pq} - \lambda \Delta N_{mr}^{pq} + \Delta \varepsilon_{\phi_{mr}^{pq}(t)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔP_{mr}^{pq} 、 $\Delta \Phi_{mr}^{pq}$ 为伪距和载波相位双差观测值; $\Delta \rho_{mr}^{pq}$ 为站星距双差量; λ 对应信号频率的波长; ΔN_{mr}^{pq} 为双差整周模糊度; $\Delta \varepsilon_{\rho_{mr}^{pq}}$ 、 $\Delta \varepsilon_{\phi_{mr}^{pq}(t)}$ 为伪距和载波相位测量噪声及多路径效应等影响双差剩余项。GPS 双差观测方程完全消除了卫星钟差和接收机钟差,且可以消除大多数电离层和对流层效应,特别是在短基线的情况下该项值可以不予考虑。双差观测方程的模糊度具有整数特性,通过固定双差模糊度为正确的整数,可以显著地提高定位的精度^[3,19]。

将 UWB 标签在近似位置 (x_0, y_0, z_0) 处采用泰勒级数展开后并化简可得误差方程

$$\begin{cases} V_{2,1} = (k_1 - k_2)dx + (h_1 - h_2)dy + (g_1 - g_2)dz - l_{2,1} \\ \vdots \\ V_{p,1} = (k_1 - k_p)dx + (h_1 - h_p)dy + (g_1 - g_p)dz - l_{p,1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{i,1}$ 为残差向量; $l_{i,1} = (R_{i,1} - R_i^0 + R_1^0)$,其中 $i = (2, \dots, p)$ 为误差方程常数项; $R_i^0 = \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2 + (Z_i - z_0)^2}$ 为各 BS 到 Tag 的近似距离; $k_i = \frac{(X_i - X_0)}{R_i^0}$, $h_i = \frac{(Y_i - Y_0)}{R_i^0}$, $g_i = \frac{(Z_i - Z_0)}{R_i^0}$ 为各 BS 到 Tag 的方向余弦,其中 $i = (1, 2, \dots, p)$ 。

GPS 定权采用如下高度角模型计算:

$$\mathbf{Q}_{LL} = \text{cov}(\mathbf{L}) = \sigma^2 \mathbf{E} = \text{Factor}^2 \cdot \left\{ a^2 + \frac{b^2}{(\sin \mathbf{el})^2} \right\} \quad (5)$$

式中: \mathbf{Q}_{LL} 表示观测向量 \mathbf{L} 的协方差矩阵; Factor 表示观测值类型的权分配因子(载波相位赋为 1;伪距赋为 100); a 、 b 通常同时取 0.003 m, \mathbf{el} 为卫星高度角。

综合以上 GPS 和 UWB 随机模型, GPS-RTK/

UWB 紧组合观测量的随机模型如下:

$$\mathbf{Q}_{\text{RTK/UWB}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_d \mathbf{R}_{\Delta P_{mr}} \mathbf{C}_d^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_d \mathbf{R}_{\Delta \Phi_{mr}} \mathbf{C}_d^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{\text{uwb}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中: $\mathbf{C}_d = [-\mathbf{I}_m, \mathbf{E}_{m \times m}]$ 为线性变换系数矩阵, 其中 \mathbf{E} 为 $m \times m$ 单位矩阵; \mathbf{I} 为 m 维的 1 矢量 (所有元素均为 1); $m = n - 1$ 为形成双差的方程数目; $\mathbf{R}_{\Delta P_{mr}} = \text{diag}(2\sigma_{\Delta P_{mr}^1}^2, 2\sigma_{\Delta P_{mr}^2}^2, \dots, 2\sigma_{\Delta P_{mr}^n}^2)$ 为伪距站间单差协方差矩阵; $\mathbf{R}_{\Delta \Phi_{mr}} = \text{diag}(2\sigma_{\Delta \Phi_{mr}^1}^2, 2\sigma_{\Delta \Phi_{mr}^2}^2, \dots, 2\sigma_{\Delta \Phi_{mr}^n}^2)$ 为载波相

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{P_{mr}}^{21} \\ \vdots \\ V_{P_{mr}}^{n1} \\ V_{\Phi_{mr}}^{21} \\ \vdots \\ V_{\Phi_{mr}}^{n1} \\ V_{2,1} \\ \vdots \\ V_{p,1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} l_r^2 - l_r^1 & m_r^2 - m_r^1 & n_r^2 - n_r^1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ l_r^n - l_r^1 & m_r^n - m_r^1 & n_r^n - n_r^1 & 0 & 0 & 0 \\ l_r^2 - l_r^1 & m_r^2 - m_r^1 & n_r^2 - n_r^1 & \lambda & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \lambda & 0 \\ l_r^n - l_r^1 & m_r^n - m_r^1 & n_r^n - n_r^1 & 0 & 0 & \lambda \\ k_1 - k_2 & h_1 - h_2 & g_1 - g_2 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ k_1 - k_p & h_1 - h_p & g_1 - g_p & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} L_{P_{mr}}^{21} \\ \vdots \\ L_{P_{mr}}^{n1} \\ L_{\Phi_{mr}}^{21} \\ \vdots \\ L_{\Phi_{mr}}^{n1} \\ l_{2,1} \\ \vdots \\ l_{p,1} \end{bmatrix}.$$

本文采用最小二乘平差原理进行参数估计

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \end{cases}. \quad (8)$$

式中: \mathbf{P} 为 GPS-RTK/UWB 紧组合权阵, 即式 (6) 中协方差矩阵 $\mathbf{Q}_{\text{RTK/UWB}}$ 的逆矩阵. 从式 (8) 中将模糊度浮点解 $\hat{\mathbf{x}}$ 及其协方差阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ 从最小二乘得到的参数估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 及其方差-协方差阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ 中提取出来, 作为最小二乘降相关 (LAMBDA) 算法的输入参数, 并根据 Ratio 检验判断模糊度固定是否成功, 设置其最小限值为 3. 如果固定成功, 将固定解代入到参数估计方程中得到基线固定解, 否则, 直接输出浮点解.

1.3 数据处理流程

本文进行的 GPS-RTK/UWB 紧组合实验数据处理流程如图 2 所示. 具体步骤如下:

步骤 1: 读取 UWB 基站位置坐标和 TDOA 观测量并预处理;

位站间单差协方差矩阵; ΔP_{mr} 为伪距站间单差观测量; $\Delta \Phi_{mr}$ 为载波相位站间单差观测量, 详细推导见文献 [20].

根据式 (3) 和式 (4) 合并后组成间接平差误差方程如下:

$$\mathbf{V} = \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}. \quad (7)$$

式中: 待估参数 $\hat{\mathbf{x}} = [dx, dy, dz, \Delta N_{mr}^{21}, \Delta N_{mr}^{31}, \dots, \Delta N_{mr}^{n1}]^T$ 包含 3 个流动站位置改正量和 $n - 1$ 个双差整周模糊度参数.

步骤 2: 读取 GPS 基准站、移动站观测数据及广播星历数据, 并与 UWB 观测数据同步匹配;

步骤 3: 使用广播星历计算卫星位置、SPP 解算流动站近似坐标和基线近似长度;

步骤 4: 根据可视卫星的高度角选择参考卫星, 形成 GPS 双差观测量;

步骤 5: 组成 GPS-RTK/UWB 紧组合误差矩阵, 根据随机模型组成观测量权阵;

步骤 6: 采用最小二乘法求解待估参数及其方差-协方差, 迭代多次;

步骤 7: 将得到的浮点模糊度和相应的协方差矩阵作为 LAMBDA 算法的输入参数, 如果 Ratio > 3, 则模糊度固定成功并代入到误差方程获取其他参数的固定解; 否则, 输出浮点解;

步骤 8: 判断如果没有到达最后历元, 则重复上述过程, 进入下一历元直到所有观测数据解算完毕.

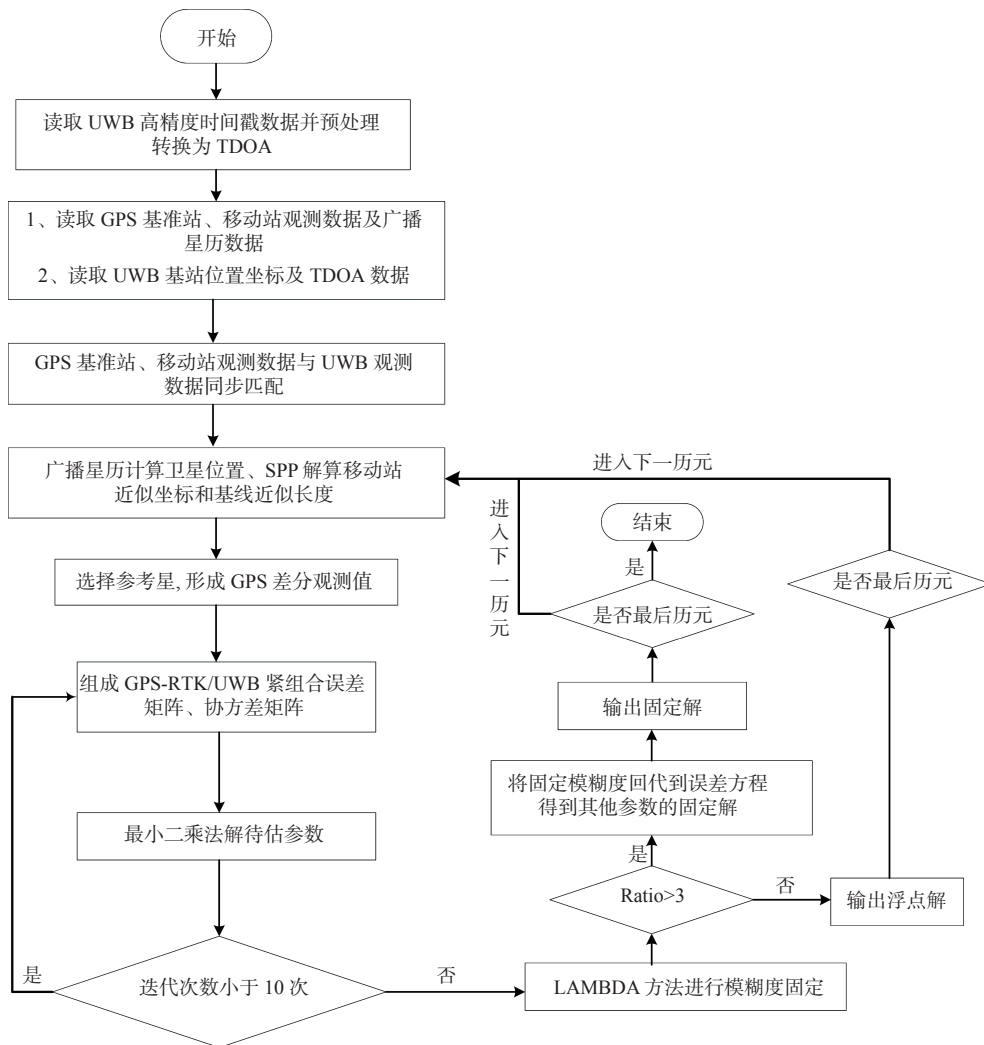


图 2 GPS-RTK/UWB 紧组合数据处理流程图

2 GPS-RTK/UWB 紧组合性能分析

2.1 实验数据

实验采用两台 Trimble R9 接收机分别作为基准站和移动站。基准站安置于中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(东湖园区)导航楼楼顶固定观测墩,移动站安置于办公楼楼顶天台,进行滑轨推车实验。UWB 采用国内寻踪科技公司的 TracLocation 系统,共布设 4 个 UWB 基站,其位置通过 RTK 方式事先精确测定。GPS 天线和 Tag 放在同一垂线上,且其天线相位中心差距提前测定并在数据预处理过程中进行补偿,如此可保证 GPS 天线相位中心与 Tag 定位中心的统一。如图 3 所示,解算模式分别为 GPS-RTK 和 GPS-RTK/UWB 紧组合两种模式,通过人为短时遮挡方式和设置不同的截止高度角模拟城市峡谷或露天矿井底部等局部复杂环境下的动态定位,分别设置截止高度角为 10° 、 20° 、 40° ,以高精度后处理相对定位结果作为参考真值进行统计分析。观测时间总长

约为 16 min,有效观测历元总数为 944 个,第 1—778 个历元为无遮挡时段,从第 779 个历元开始人为遮挡干扰流动站 GPS 天线。



图 3 楼顶滑轨推车动态实验部分现场

2.2 实验结果分析

图 4、图 5 分别给出了不同截止高度角情况下的可用观测值数量和位置精度因子 (PDOP),可以看出,随着截止高度角增加,GPS 可用观测卫星数量逐渐减少,其中当截止高度角为 40° 时,GPS-RTK 共视卫星仅为 3 颗,无法进行解算,参与统计的有效观测历元 527 个;而 GPS-RTK/UWB 紧组合模式比 GPS-RTK 模式有效增加了可用观测值的数量,并有效地降低

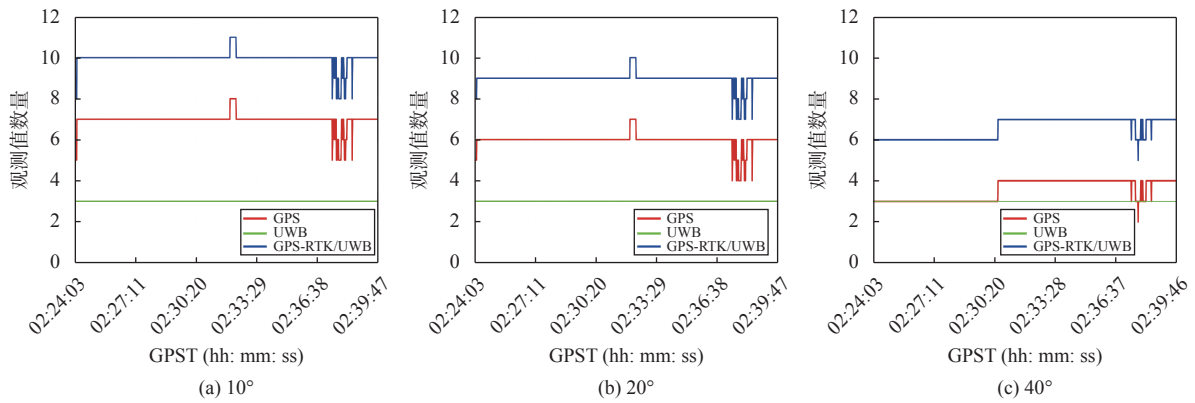


图 4 不同截止高度角情况下的可用观测值

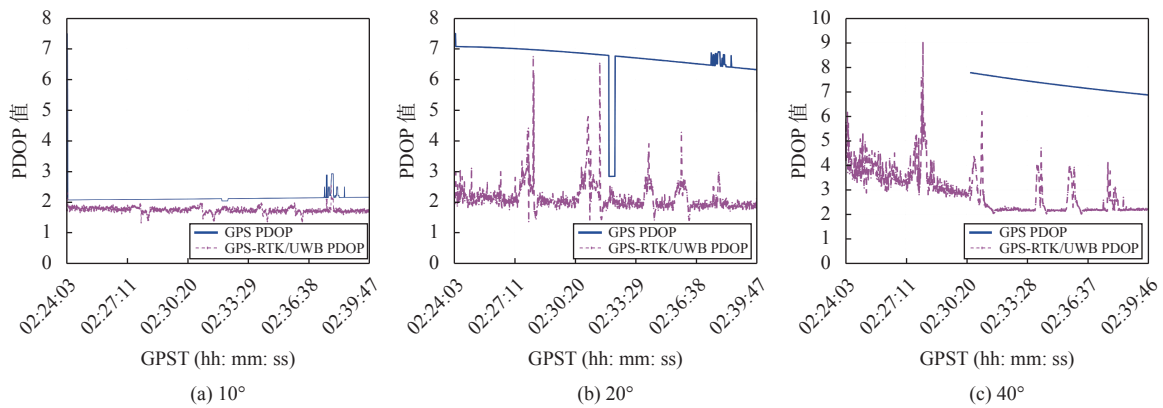


图 5 不同截止高度角情况下的 PDOP 值

了 PDOP 值。

表 1 给出了 GPS-RTK 和 GPS-RTK/UWB 紧组合模式在不同截止高度角情况下的整周模糊度固定率统计情况, 图 6 和图 7 分别给出了 GPS-RTK 和 GPS-RTK/UWB 紧组合模式在不同截止高度角情况下的小推车动态轨迹。可以看出在低截止高度角 (10°和 20°) 情况下, GPS-RTK 在推车起始、终止位置存在较多的浮点, 这是由于该位置人员走动及人为故意遮挡干扰天线来模拟复杂环境导致的 GPS 观测质量下降, 整周模糊度无法固定, 浮点解精度较差, GPS-RTK/UWB 组合后比 GPS-RTK 整周模糊度固定率均有不同程度的提高, 平面轨迹更加平滑, 起

始、终止位置的浮点明显减少。在截止高度角为 40°情况下, GPS-RTK 模式大部分历元为浮点解, 整周模糊度固定率仅 20.93%; GPS-RTK/UWB 组合后整周模糊度固定率达到 93.96%, 显著提升了固定率, 浮点解精度也得到了明显改善。

表 1 不同截止高度角时的模糊度固定率 %

定位模式	截止高度角		
	10°	20°	40°
GPS-RTK	94.92	93.34	20.93
GPS-RTK/UWB	97.03	96.93	93.96

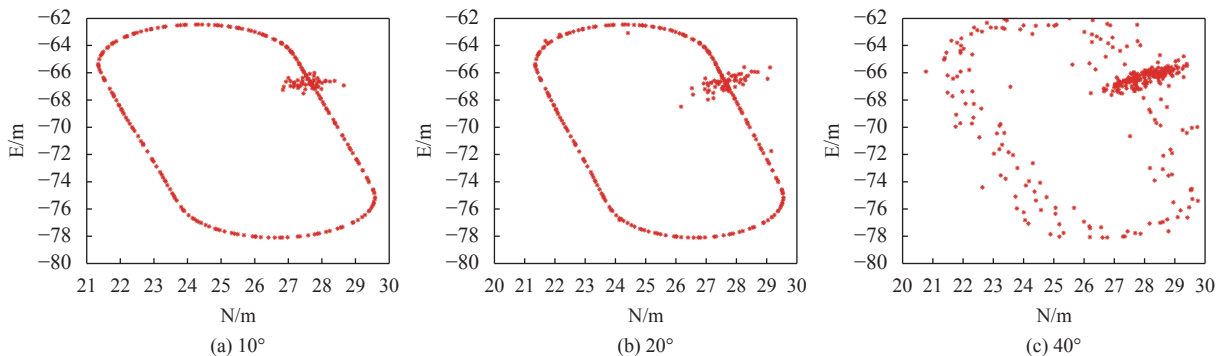


图 6 GPS-RTK 在不同截止高度角情况下的小推车动态轨迹

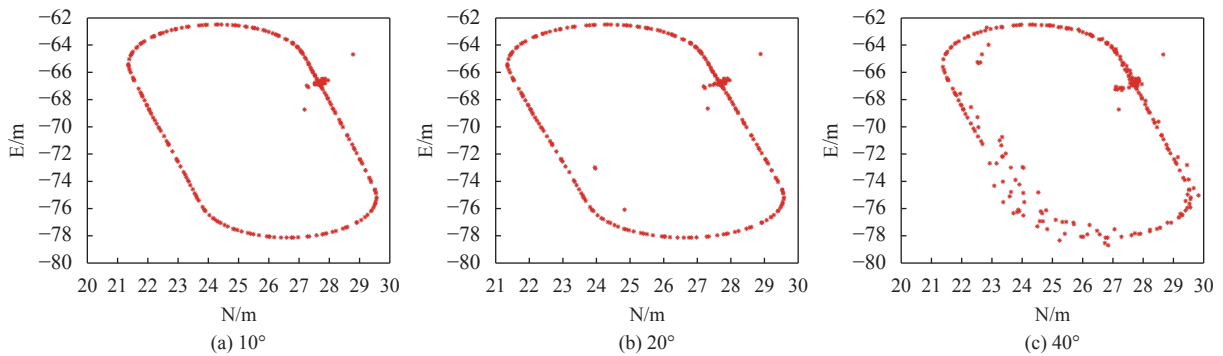


图 7 GPS-RTK/UWB 紧组合在不同截止高度角情况下的小推车动态轨迹

以高精度商业软件 IE 事后处理的结果 (截止高度角 10° , 正反向平滑滤波) 为真值参考, 表 2、表 3、表 4 分两个时间段分别给出了截止高度角为 10° 、 20° 、 40° 的结果统计情况. 表 2 中, 截止高度角为 10° 时, GPS-RTK 无遮挡时段动态定位平面精度优于 3 cm, 高程精度优于 5 cm, GPS-RTK/UWB 紧组合在 N、E、U 方向上均方根 (RMS) 值分别减小 47.8%、36.4%、34.8%; 人为遮挡时段 GPS-RTK/UWB 紧组合平面 RMS 为厘米级, 高程 RMS 为分米级, 且比 GPS-RTK 模式 N、E、U 方向上 RMS 值分别减小了 74.8%、85.7%、21.3%.

联合表 3、4 可以看出, 随着截止高度角增大, 可

观测卫星变少, PDOP 增大, GPS-RTK 动态定位精度降低, GPS-RTK/UWB 紧组合比 GPS-RTK 模式在 N、E、U 方向上 RMS 值均有大幅的降低, 即 UWB 在特殊复杂环境下能对 GPS-RTK 起到很好的增强作用. 在截止高度角为 40° 的环境下, GPS 有效观测历元明显减少, 固定解比例仅 20.93%, N、E、U 方向精度均为分米至亚米级; GPS-RTK/UWB 紧组合后极大地改善了观测状态, 固定解比例显著提升到 93.96%, 平面 RMS 值降低至厘米级, 高程 RMS 值降低至分米级.

综合来看, GPS-RTK 在良好的观测环境下三维动态定位精度优于 5 cm, 复杂环境下 RTK 精度显著

表 2 截止高度角 10° 时小推车位置误差统计

定位模式	方向	无遮挡时段				提升比例/%	人为遮挡干扰时段				提升比例/%
		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m	
GPS-RTK	N	-0.541	0.263	-0.001	0.023	-	-0.906	1.372	0.044	0.235	-
	E	-0.215	0.182	0.001	0.011	-	-0.694	2.333	0.018	0.246	-
	U	-0.014	0.963	-0.001	0.043	-	-1.392	1.554	0.108	0.418	-
GPS-RTK/UWB	N	-0.008	0.023	-0.000	0.012	47.8	-0.263	0.391	-0.001	0.059	74.8
	E	-0.007	0.014	0.000	0.007	36.4	-0.091	0.245	-0.001	0.035	85.7
	U	-0.015	0.089	-0.007	0.028	34.8	-1.825	1.466	0.022	0.329	21.3

表 3 截止高度角 20° 时小推车位置误差统计

定位模式	方向	无遮挡时段				提升比例/%	人为遮挡干扰时段				提升比例/%
		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m	
GPS-RTK	N	-1.032	1.502	0.003	0.097	-	-1.44	1.143	0.024	0.303	-
	E	-0.921	1.623	0.005	0.093	-	-1.175	2.013	0.000	0.301	-
	U	-5.433	2.934	-0.014	0.289	-	-3.122	4.676	0.198	0.918	-
GPS-RTK/UWB	N	-0.715	0.015	-0.001	0.041	57.7	-0.356	0.474	0.002	0.070	76.8
	E	-0.827	0.018	0.000	0.042	54.8	-0.124	0.312	0.001	0.043	85.7
	U	-0.063	2.589	-0.006	0.155	46.4	-2.192	1.734	0.007	0.434	52.7

表 4 截止高度角 40°时小推车位置误差统计

定位模式	方向	无遮挡时段				提升比例/%	人为遮挡干扰时段				提升比例/%
		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m		Min/m	Max/m	Mean/m	RMS/m	
GPS-RTK	N	-1.595	1.469	-0.165	0.547	-	-1.698	0.975	-0.234	0.574	-
	E	-2.023	1.049	-0.247	0.501	-	-1.684	0.848	-0.333	0.587	-
	U	-4.038	5.236	0.494	1.521	-	-2.396	5.339	0.917	1.745	-
GPS-RTK/UWB	N	-1.241	0.504	-0.061	0.040	92.6	-0.132	0.388	-0.005	0.043	92.5
	E	-0.775	0.637	-0.044	0.033	93.4	-0.233	0.310	-0.015	0.058	90.1
	U	-1.257	2.544	0.087	0.144	90.5	-2.198	1.302	-0.037	0.439	74.8

注: Min表示最小误差值, Max表示最大误差值, Mean表示平均误差值, RMS表示误差均方根值

降低,但 GPS-RTK/UWB 紧组合后固定解比例明显提升, N、E 方向精度保持在厘米级,但 U 方向上的 RMS 值提升比例低于 N、E 方向,这是由于 UWB 基站与 GPS 接收机基本布设在同一平面内,存在不同 UWB 基站在高程方向上布设很难拉开较大距离的局限性,因此其对平面的贡献要明显优于对高程方向的贡献,实际应用中应尽量依据场景将 UWB 基站布设为高低错落、左右均匀分布更有利于定位精度的提升。

3 结束语

针对复杂环境下 GPS-RTK 定位精度低甚至由于可观测卫星数量不足无法定位的情况,开展了 GPS-RTK/UWB 紧组合动态精密定位性能分析,在不同的截止高度角和人为干扰情况下分析了滑轨小推车动态定位结果,得到以下结论:

1) GPS-RTK/UWB 紧组合比 GPS-RTK 模式可以有效增加观测值数量,降低 PDOP 值改善可用观测值的几何结构;

2) 在截止高度角较低 (10°和 20°) 且无遮挡的良好观测环境下, GPS-RTK 的精度较高, GPS-RTK/UWB 紧组合能进一步提高固定解比例和定位精度;对人为遮挡干扰情况下的定位精度有明显大幅提升;

3) 在截止高度角为 40°的复杂环境下, GPS-RTK 有效观测历元减少,固定解比例仅 20.93%, N、E、U 方向精度均为厘米至分米至亚米级; GPS-RTK/UWB 紧组合后改善了观测值几何结构,固定解比例显著提升至 93.96%,平面精度保持在厘米级,高程精度为分米级,仍能满足一定的工程需求。

本文研究由于 UWB 基站布设在高程方向上差距不大,对 GPS-RTK/UWB 紧组合后在 U 方向的精度提升比例低于 N、E 方向。后续研究包括不同 UWB 基站布设情况下与 GPS 组合的效果分析及其进一

步与 BDS、GLONASS、GALILEO 等多系统进行组合。

参考文献

- [1] 徐周. GPS差分定位技术及实现方法的研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [2] 王世进. BDS/GPS-RTK算法研究及软件实现[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [3] 李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2013.
- [4] 胡楠楠, 章红平, 李团, 等. 城市动态环境下GNSS RTK部分模糊度固定算法性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(3): 263-267.
- [5] LIN S G. Assisted adaptive extended Kalman filter for low-cost single-frequency GPS/SBAS kinematic positioning[J]. *GPS solutions*, 2015, 19(2): 215-223. DOI: 10.1007/s10291-014-0381-9
- [6] WANG J P, GAO J X, LIU C, et al. High precision slope deformation monitoring model based on the GPS/pseudolites technology in open-pit mine[J]. *Mining science and technology*, 2010, 20(1): 126-132. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60173-3
- [7] ZIMMERMAN K R, COBB H S, BAUREGGER F N, et al. A new GPS augmentation solution: Terralite XPS system for mining applications and initial experience[C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), 2005: 2775-2788.
- [8] 高军强, 汤霞清, 张环, 等. 基于因子图的车载INS/GNSS/OD组合导航算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2547-2553.
- [9] XUE Y, SU W, YANG D, et al. RMLNet —A reliable wireless network for a multiarea TDOA-based localization system[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4374. DOI: 10.3390/s19204374
- [10] ALARIFI A, AL-SALMAN A, ALSALEH M, et al. Ultra-wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 707. DOI: 10.3390/

- s16050707
- [11] ANGELIS G D, MOSCHITTA A, CARBONE P. Positioning techniques in indoor environments based on stochastic modeling of UWB round-trip-time measurements[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2016, 17(8): 2272-2281. DOI: 10.1109/TITS.2016.2516822
- [12] 赵红梅, 赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述[J]. *电信科学*, 2018, 34(9): 130-142.
- [13] MACGOUGAN G D. Real-time kinematic surveying using tightly-coupled GPS and ultra-wideband ranging[D/OL]. [2020-08-02]. Calgary: The University of Calgary, 2009. http://wcm.ucalgary.ca/files/plan/macgougan2009_phd.pdf
- [14] MACGOUGAN G D, O'KEEFE k, KLUKAS R. Accuracy and reliability of tightly coupled GPS/ultra-wideband positioning for surveying in urban environments[J]. *GPS solutions*, 2010, 14(4): 351-364. DOI: 10.1007/s10291-009-0158-8
- [15] 吴探诗. 基于GNSS与UWB组合的无缝定位研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [16] ABOLFATHI E A, O'KEEFE K. Integrating vision derived bearing measurements with differential GPS and UWB ranges for vehicle-to-vehicle relative navigation[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), 2013: 762-771.
- [17] JIANG L J, HOE L N, LOON L L. Integrated UWB and GPS location sensing system in hospital environment[C]//2010 IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010: 286-289. DOI: 10.1109/ICIEA.2010.5516828
- [18] GONZALEZ J, BLANCO J L, GALINDO C, et al. Combination of UWB and GPS for indoor-outdoor vehicle localization[C]//2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007. DOI: 10.1109/WISP.2007.4447550
- [19] 储超, 黄亮, 杜仲进, 等. 抗差估计在RTK/INS紧组合中的应用研究[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(5): 18-25.
- [20] 许国昌, 许艳. *GPS理论、算法与应用*[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2017.

作者简介

王生亮 (1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为多源传感器融合协同精密定位理论与技术、智能优化算法及其应用。

刘根友 (1968—), 男, 博士研究生, 研究员, 研究方向为大地测量学与地球重力场、GNSS 数据处理。

高铭 (1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为 GNSS/INS 组合定位、多源融合定位。

Performance analysis of high precision kinematic positioning of GPS-RTK/UWB tight combination

WANG Shengliang^{1,2}, LIU Genyou¹, GAO Ming^{1,2}, CAO Shilong^{1,2}, XIAO Gongwei^{1,2}, ZHAO Wenhao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To overcome the shortage that GPS-RTK can not obtain centimeter level high precision positioning results due to signal blockage, insufficient satellites number and other reasons under complicated environment, in this paper, the tightly combination of ultra-wide band (UWB) short-range high precision positioning system and RTK are studied to improve the precision of dynamic positioning under complicated environment. According to the principle of UWB, the mathematical model of GPS-RTK/UWB tight combination is presented, and the data processing flow is introduced in detail. The experimental results show that GPS-RTK/UWB tight combination can further improve the ambiguity fixed success rate and dynamic positioning precision compared with only GPS when the observation environment is well. In a complicated environment with a cut-off mask elevation angle of 40 degree, the ambiguity fixed success rate was significantly increased from 20.93% to 93.96%. The positioning precision of N and E directions are improved to centimeter level, and that of U directions is improved to decimeter level, which can still meet certain engineering measurement needs.

Keywords: GPS-RTK; ultra-wide band (UWB); time difference of arrive; tightly combination; integer ambiguity