

“北斗+5G”联合定位与误差校正技术*

曹晓春¹, 张 静¹, 林开钦², 孙天阳³, 李振海², 李 奇^{✉2}

(1 浙江公路水运工程咨询公司 杭州 310006

2 中国航天电子技术研究院卫星导航系统工程中心 北京 100094

3 航天时代飞鸿技术有限公司 北京 100094)

摘要: 在边坡、城市峡谷、高架等复杂的公路交通定位环境中, 存在海量多样的定位需求与复杂的定位环境, 北斗信号穿越建筑空间时强度被削弱, 产生严重的信号反射和衍射, 使得北斗卫星信号难以到达和有效使用, 系统可用率下降, 无法提供可靠的定位服务。结合第五代移动通信网络(5G)系统高密度部署的特点, 提出了一种北斗+5G联合定位模型以及基于最小二乘残差Helmert后验加权的误差校正方法。在复杂公路交通环境中, 可以改善可见卫星数少的问题, 优化卫星的几何构型, 提高用户终端定位精度, 能够为用户终端提供高精度、全天候、连续、实时的定位服务。实验表明, 北斗+5G联合定位模型能够大幅提升复杂公路交通环境下的定位性能。

关键词: 北斗; 5G; 公路环境; 联合定位

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)06-0070-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220328003

引用格式: 曹晓春, 张静, 林开钦, 等. “北斗+5G”联合定位与误差校正技术[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 70–77.

"BeiDou+5G" hybrid positioning and error correction technology

CAO Xiaochun¹, ZHANG Jing¹, LIN Kaiqin², SUN Tianyang³, LI Zhenhai², LI Qi²

(1. Zhejiang Highway & Water Transportation Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310006, China;

2. GNSS System Engineering Center, China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China;

3. Aerospace Times Feihong Technology Company Limited, Beijing 100094, China)

Abstract: In the complex highway traffic positioning environment such as slope, urban canyon and viaduct, there are massive and diverse positioning needs and complex positioning environment. The strength of BeiDou signal is weakened when it passes through the building space, and the building structure causes serious signal reflection and diffraction, which makes it difficult for BeiDou satellite signal to reach and use effectively, resulting in the decline of BeiDou system availability and the inability to provide reliable positioning services. Combined with the characteristics of high-density deployment of 5th generation mobile networks (5G) system, this paper proposes a BeiDou+5G hybrid positioning model and error correction method based on least squares residual Helmert posterior weighting. In the complex highway traffic environment, it can solve the problem of small number of visible satellites, optimize the geometric configuration of satellites, improve the positioning accuracy, and provide high-precision, all-weather, continuous, and real-time positioning for user terminals. Experiments show that the BeiDou+5G hybrid positioning model can greatly improve the positioning performance in complex highway traffic environment.

Key words: BeiDou; 5G; Highway environment; Hybrid positioning

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220328003

Citation: CAO Xiaochun, ZHANG Jing, LIN Kaiqin, et al. "BeiDou+5G" hybrid positioning and error correction technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 70–77.

*基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021024、2021025、202211); 国家自然科学基金(11873064、11503040)

✉通信作者: 李奇(liq@csno-tarc.cn)

收稿日期: 2022-03-28 收修改稿日期: 2022-04-28

引 言

由于北斗/GNSS 卫星信号天基广域广播的特点，在城市峡谷等复杂环境区域易被遮挡和干扰，导致定位精度差甚至无法定位。为了保证位置服务的可靠性与可用性，研究北斗与其他系统的室内外融合定位技术的需求十分紧迫^[1]，北斗+惯导^[2]、北斗+超宽带^[3]、北斗+WIFI^[4]、北斗+5G 等一系列室内外融合导航技术不断被提出。近年来，我国在北斗卫星导航领域和 5G 无线通信领域的研究成果达到世界领先水平，北斗和 5G 的融合是当前最主流的室内外融合定位技术发展路线之一^[5]，3GPP 组织为 5G 系统定义了亚米级室内定位标准协议^[6]，5G 的超密集组网架构和北斗的超广覆盖特征能够形成互补，极大提升了用户的定位服务可用性^[7]。

5G 系统虽然增强了定位源的几何构型，但同时引起了系统间时间、信道传播误差模型和伪距测量精度的差异等问题^[8]。伪距测量的差异往往通过加权最小二乘法弥补^[9]，其权值为相应系统伪距观测方差的倒数^[10]。由于在定位解算前，无法精确地确定不同系统之间的伪距观测误差，从而无法确定两系统伪距观测方差的比例，导致权值分配不合理。不合理的权值将会导致最小二乘解失去最小方差的特性，造成定位精度下降。因此，合理定权平差纠正加权最小二乘解造成的误差是提高定位精度的关键^[11]。

针对上述问题，本文研究了基于最小二乘残差 Helmert 后验加权的北斗与 5G 联合定位方法，修正先验最小二乘解和几何分布差带来的误差，提高城市环境中定位解的准确性。技术路线如图 1 所示。

1 北斗与 5G 联合定位模型

对于北斗与 5G 联合定位系统而言，可通过误差模型校正电离层、对流层延时、卫星钟差和相对论效应，5G 基站间时钟可通过基站间的修正同步。故修正后的伪距观测方程为^[12]：

$$\rho_c^{(n)} = r^{(n)} + \delta t_u^{BD} + \delta t_u^{5G} + \varepsilon_\rho^{(n)} \quad (1)$$

其中， $n=1,2,\dots,N$ ， n 为北斗或 5G 基站的编号； ρ_c 为定位源到接收机的伪距； r 为定位源到接收机的距离； δt_u^{BD} 为接收机与北斗卫星的钟差； δt_u^{5G} 为接收机与 5G 基站的钟差； δt_u^{BD} 和 δt_u^{5G} 二者选择其一，由观测量的来源决定； ε_ρ 为伪距测量噪声。

将伪距观测方程线性化，可获得由 n_1 个北斗卫星和 n_2 个 5G 基站组成的观测方程组，其矩阵形式为：

$$\mathbf{H}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{b} + \varepsilon_\rho \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_x^{(1)} & h_y^{(1)} & h_z^{(1)} & k^{(1)} & l^{(1)} \\ h_x^{(2)} & h_y^{(2)} & h_z^{(2)} & k^{(2)} & l^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_x^{(n)} & h_y^{(n)} & h_z^{(n)} & k^{(n)} & l^{(n)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， $h_x^{(n)} = -\frac{x^{(n)} - x_u}{r^{(n)}}$ ， $h_y^{(n)} = -\frac{y^{(n)} - y_u}{r^{(n)}}$ ， $h_z^{(n)} = -\frac{z^{(n)} - z_u}{r^{(n)}}$ 分别表示第 n 个定位源到接收机的单位观测向量在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的分量； k 和 l 分别表示北斗卫星和 5G 基站的选择系数，取值为 1 或 0。可以看出，雅可比矩阵 \mathbf{H} 只与接收机与定位源的几何位置有关。

$$\Delta\mathbf{x} = [\Delta x_u \quad \Delta y_u \quad \Delta z_u \quad \Delta t_u^{BD} \quad \Delta t_u^{5G}]^T \quad (4)$$

其中， $(\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u)$ 表示接收机真实位置 (x_u, y_u, z_u) 与估计位置 $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$ 之间的偏差：

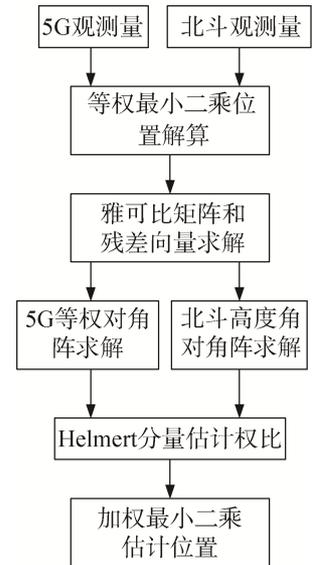


图 1 基于 Helmert 后验加权联合定位技术路线
Fig. 1 Hybrid location technology route based on Helmert posterior weighting

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\rho = [\boldsymbol{\varepsilon}_\rho^{(1)} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_\rho^{(2)} \quad \cdots \quad \boldsymbol{\varepsilon}_\rho^{(n)}]^\top \quad (5)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho_c^{(1)} - r^{(1)} - \Delta t_u^{\text{BD}} - \Delta t_u^{5\text{G}} \\ \rho_c^{(2)} - r^{(2)} - \Delta t_u^{\text{BD}} - \Delta t_u^{5\text{G}} \\ \vdots \\ \rho_c^{(n)} - r^{(n)} - \Delta t_u^{\text{BD}} - \Delta t_u^{5\text{G}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑到不同定位源的伪距测量误差之间不相关, 故考虑采用加权最小二乘法, 其权重矩阵如下:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & & & \\ & w_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & w_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 权重 w_n 取值为相应观测方程测量误差标准差的倒数, 即 $w_n = \frac{1}{\sigma_n}$, 则有

$$\mathbf{WH}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{Wb} + \mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}_\rho \quad (8)$$

其最小二乘解为

$$\Delta\mathbf{x} = (\mathbf{H}^\top \mathbf{W}^\top \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^\top \mathbf{W}^\top \mathbf{W} \mathbf{b} \quad (9)$$

2 基于 Helmert 后验的北斗与 5G 联合定位误差校正方法

对于北斗卫星导航系统, 其误差来源可分为以下 3 个方面: ① 与卫星有关的误差, 主要包括卫星时钟误差和卫星星历误差; ② 与卫星传播路径有关的误差, 主要包括电离层延时、对流层延时和多路径; ③ 与接收机有关的误差, 包括接收机跟踪部分的测距误差、接收机噪声等。在接收机解算时, 会对电离层延时、对流层延时、卫星钟差进行修正, 能消除大部分伪距测量误差, 但仍有残留^[13]。相较于卫星系统, 5G 基站同样会有时钟频率误差、基站间的时钟同步误差、基站位置偏差以及与接收机相关的误差。但是 5G 系统不存在电离层和对流层延时, 并且与北斗相比, 上述误差的大小并不相同。为了减小不同系统不同定位源导致的伪距测量误差不等对定位性能的影响, 传统加权最小二乘权值分配固定, 在实际场景中应用受限。为此, 本文提出了卫星高度角先验定权和 Helmert 方差分量估计后验加权纠正算法, 通过高度角定权方法来降低北斗观测的电离层、对流层和多径误差, 利用先验定权方法来降低 5G 伪距测量误差, 最终通过 Helmert 后验方差分量估计来进一步修正北斗与 5G 系统联合定位误差^[14,15]。

卫星的高度角越小, 电离层、对流层和多径误差越大; 反之, 其误差越小。目前常用加权函数模型有三角函数高度角模型和指数高度角模型。相较于指数高度角加权模型, 三角函数高度角加权较为简单, 计算复杂度低, 故选取三角函数中的正弦函数来构造高度角定权模型。其权重矩阵如下:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sin \theta^{(1)} & & & \\ & \sin \theta^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sin \theta^{(n)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

从上式中可以看出, 当卫星的高度角较小时, 伪距测量精度较低, 对应的权值较小, 故其在加权最小二乘解算过程中的作用较小, 反之亦然。

根据北斗和 5G 系统的伪距观测误差模型, 合理准确地确定测量误差的概率分布情况十分困难。为了简化定位精度的理论分析, 可假设每个伪距观测量的误差服从正态分布, 其函数模型可表示为:

$$\begin{cases} E(\boldsymbol{\varepsilon}_\rho^{(n)}) = 0 \\ \text{Var}(\boldsymbol{\varepsilon}_\rho^{(n)}) = \sigma_0^2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, E 为数学期望, $\varepsilon_p^{(n)}$ 为测量误差, Var 为数学协方差, σ_0^2 为用户测量误差的方差。假设各个伪距测量之间互不相关, 则其方差矩阵为对角阵。由此可见, 其定位误差主要来源于定位源的几何位置分布以及用户测量误差。

由于北斗卫星和 5G 基站为不同的两个系统, 其定位源位置、信号结构、传播路径都有差异, 故两系统的用户测量误差方差 σ_0^2 不同。若将两系统等权组合, 会使残差偏离, 影响解的准确性。所以北斗卫星和 5G 基站组合定位模型中两系统的权重比例是影响组合定位精度的关键因素。在定位解算前, 不同系统间的用户测量误差方差 σ_0^2 比例未知, 因此采用后验 Helmert 方差分量估计方法能够估计不同系统的 σ_0^2 , 即可获得最终的权重。

Helmert 方差分量估计法误差模型可表示为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{H}\Delta\mathbf{x} - \mathbf{b} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$, 则残差方程为:

$$\begin{cases} V_1 = H_1\Delta\mathbf{x} - b_1 \\ V_2 = H_2\Delta\mathbf{x} - b_2 \end{cases} \quad (13)$$

权重矩阵分别为 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 。

利用残差二次型 $\mathbf{V}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i$ 来估计用户测量误差方差, 即单位权值 σ_0^2 。则 Helmert 方差分量估计严密公式为:

$$\begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{01}^2 & \hat{\sigma}_{02}^2 \end{bmatrix}^T = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{V}_1 & \mathbf{V}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{V}_2 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

其中, $\hat{\sigma}_{01}^2$ 和 $\hat{\sigma}_{02}^2$ 分别表示为北斗卫星和 5G 基站的单位权值的估计值, 其中

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$s_{ii} = n_i - 2tr(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}_i) + tr(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}_i)^2, i=1,2 \quad (16)$$

$$s_{ij} = tr(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}_i\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}_j), i=1,2, j=1,2; i \neq j \quad (17)$$

式中, n_1 和 n_2 分别表示北斗卫星和 5G 基站的观测数; $\mathbf{N}_1 = \mathbf{H}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{H}_1$, $\mathbf{N}_2 = \mathbf{H}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{H}_2$, $\mathbf{N} = \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2$ 。

由于严密的 Helmert 方差分量估计的计算量较大, 为了降低计算复杂性, 以在更多的接收机系统中兼容, 可采用简化形式, 即

$$\hat{\sigma}_{0i}^2 = \frac{\mathbf{V}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i}{n_i - tr(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}_i)} \quad (18)$$

总体算法流程如下:

- ① 使用等权最小二乘法, 获取最小二乘雅可比矩阵 \mathbf{H} 和残差向量 \mathbf{b} ;
- ② 获得北斗权重矩阵 \mathbf{P}_1 , 5G 系统权重矩阵 \mathbf{P}_2 采用等权重, 获取初始权值矩阵 \mathbf{P} ;
- ③ 得到北斗和 5G 各自的 σ_{01}^2 和 σ_{02}^2 , 并根据

$$\mathbf{P}_i(k) = \frac{c}{\sigma_{0i}^2} \mathbf{P}_i(k-1), (i=1,2) \quad (19)$$

重新定权, 其中 k 为迭代次数, c 为任意常数;

- ④ 计算权值矩阵 \mathbf{P}_i , 更新单位权方差;
- ⑤ 重复步骤③~步骤④, 直至 $|\hat{\sigma}_{01}^2 - \hat{\sigma}_{02}^2| < 0.01$;

⑥ 获取权值矩阵和两系统权比, 通过加权最小二乘, 验证并修正经过 Helmert 方差分量估计定权后的解。

3 北斗与 5G 的联合定位实验

北斗与 5G 联合解算实验系统组成如图 2 所示。系统由射频单元、北斗信号处理单元、5G 信号处理单元、北斗+5G 联合解算单元 4 部分组成。其中射频单元通过天线接收北斗卫星与 5G 基站发射的射频信号,并将其传递给北斗信号处理单元与 5G 信号处理单元;北斗信号处理单元获取历书、广播星历、伪距等数据,5G 信号处理单元获取基站坐标、伪距等数据;二者将上述定位所需的数据传递给北斗+5G 联合解算单元,经联合解算获取定位结果。

开展北斗+5G 联合定位实验的相关设备见表 1。

当用户处于高层建筑之间区域时,终端仅能够接收到一个狭长区域内高仰角的卫星信号。通过附近的 5G 基站播发定位信号,参与联合定位,能够改善定位源的几何分布构型,提高定位精度;当用户处于高层建筑附近区域时,终端将有一侧的卫星信号被遮挡,仅能够接收另一半空间内卫星信号,此时的信号源的几何分布质量较差。通过接入附近的 5G 定位信号联合解算,可有效改善定位源几何分布;当用户处于桥梁下区域时,终端正上方的卫星被遮挡,仅能够接收到两侧低仰角的卫星信号,此时的信号信噪比较差。通过接入附近的 5G 定位信号联合解算,可补充可靠定位信号源数量,并改善定位源几何分布。三种场景的定位信号源分布如图 3 所示。

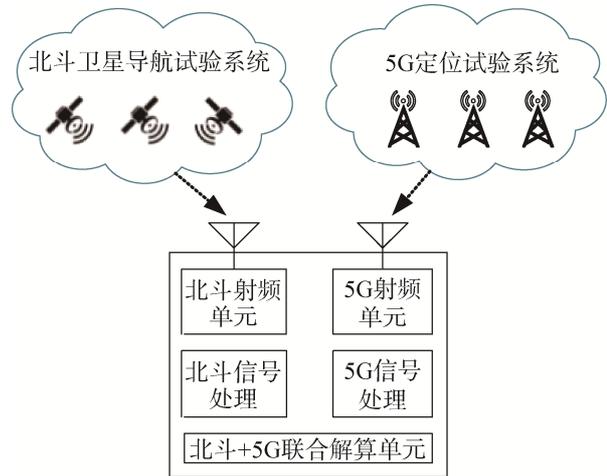


图 2 北斗与 5G 联合解算实验系统组成
Fig. 2 Composition of BeiDou and 5G hybrid positioning experimental system

表 1 北斗+5G 联合定位实验设备
Table 1 BeiDou + 5G hybrid positioning experimental equipment

设备名称	数量	作用及技术状态
北斗卫星导航试验验证系统 ^[16]	1 套	包含空间段、运控段、测控段、环境段等,用于播发北斗仿真信号。
5G 定位验证系统 ^[17]	4 套	包含 5G 基站、高精度时钟等,用于播发 5G 定位信号。
北斗+5G 联合解算实验系统(终端)	1 个	接收北斗和 5G 信号,开展北斗+5G 导航定位服务验证。
定位服务平台	1 套	进行数据分析,定位结果展示。

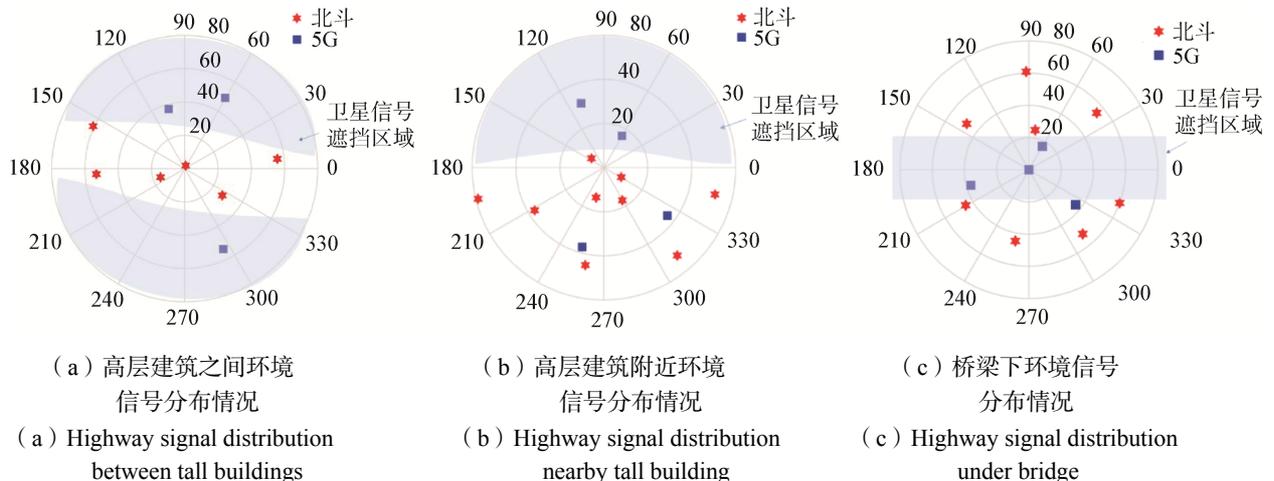


图 3 不同公路环境下信号分布情况
Fig. 3 Highway signal distribution under different conditions

针对三种不同的情况，分别进行 1 000 次独立仿真实验。黑色星号表示仅使用北斗系统作为定位信号源获得的定位结果，红色圆点为北斗+5G Helmert 后验加权修正后的定位结果。三种环境下的圆概率误差 (CEP, 1σ)、水平误差 (1σ) 以及垂直误差 (1σ) 分布图如图 4~图 6 所示。

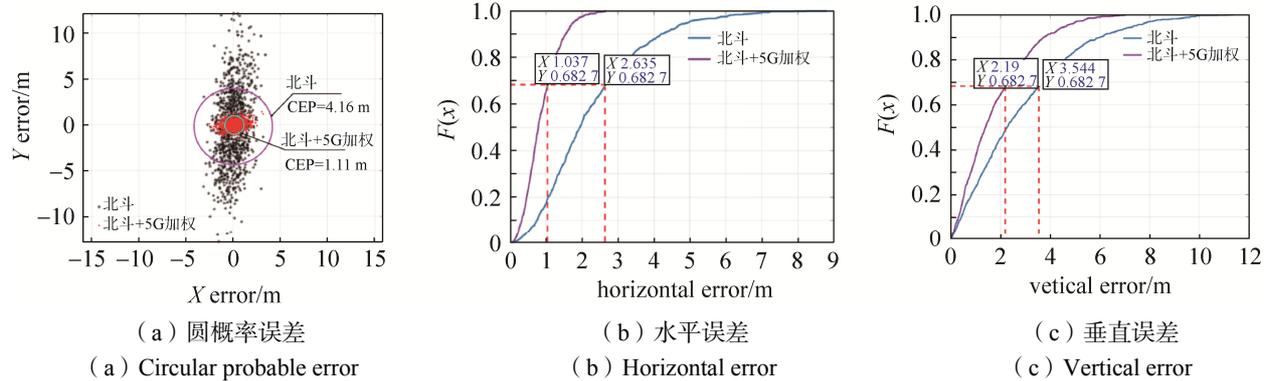


图 4 高层建筑之间定位误差分析

Fig. 4 Analysis of positioning error between tall buildings

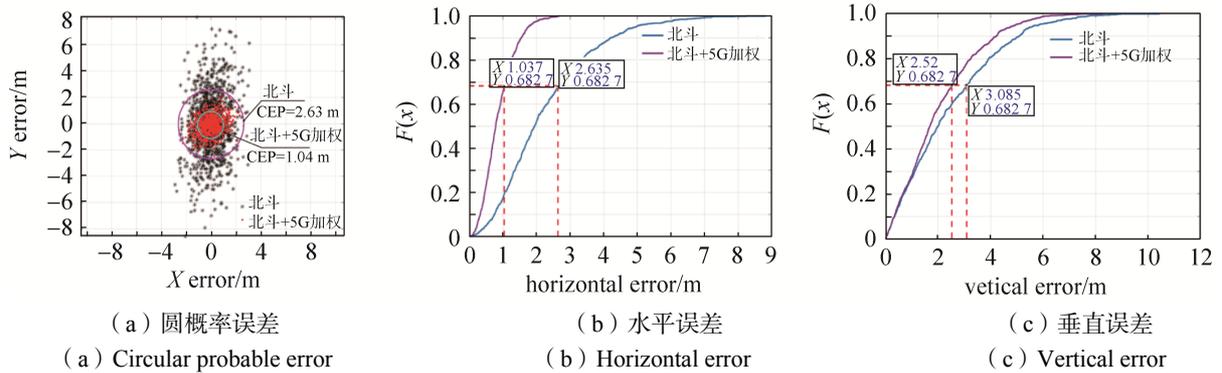


图 5 高层建筑附近环境误差分析

Fig. 5 Analysis of positioning error nearby tall building

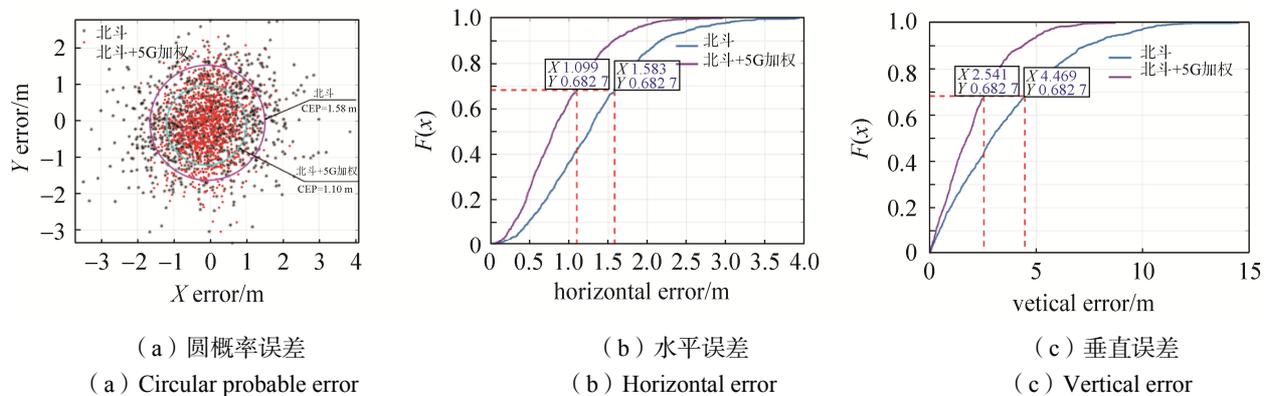


图 6 桥梁下定位误差分析

Fig. 6 Analysis of positioning error under bridge

在高层建筑之间区域，较单北斗系统而言，北斗+5G 系统的 PDOP 值从 3.91 下降至 2.17。二者的圆概率误差 (CEP, 1σ) 分别为 4.16 m 和 1.11 m。可以看出，北斗+5G Helmert 后验加权修正的定位模式能够在高层建筑之间区域下定位性能提高了 73.32%。在垂直方面，二者的垂直误差 (1σ) 分别为 3.54 m 和 2.19 m。北斗+5G Helmert 后验加权的定位模式能够在高层建筑之间区域提高定位性能 38.13%。

在高层建筑附近区域较单北斗系统而言，北斗+5G 系统的 PDOP 值从 2.86 下降至 2.35，二者的圆概

率误差 (CEP, 1σ) 分别为 2.63 m 和 1.04 m。可以看出, 相较于单北斗定位模式而言, 北斗+5G 加权修正的定位模式能够在高层建筑附近区域下提高定位性能 60.46%。在垂直方面, 二者的垂直误差 (1σ) 分别为 3.09 m 和 2.52 m。北斗+5G 加权修正的定位模式能够在高层建筑附近区域条件下提高定位性能 18.47%。

桥梁下或其他复杂建筑环境下, 较单北斗系统而言, 北斗+5G 系统的 PDOP 值从 3.28 下降至 2.04, 表明 5G 基站的加入可以弥补卫星几何分布的不足。二者的圆概率误差 (CEP, 1σ) 分别为 1.58 m 和 1.10 m。可以看出, 北斗+5G Helmert 后验加权法修正的定位模式能够在高层建筑附近区域下提高定位性能 30.38%。在垂直方面, 二者的垂直误差 (1σ) 分别为 4.47 m 和 2.54 m。北斗+5G Helmert 后验加权的定位模式能够在桥梁下区域条件下提高定位性能 43.18%。

4 结束语

在公路交通复杂环境下, 北斗卫星信号会受到建筑、山体等结构物的遮挡, 导致可见卫星数量减少, 卫星几何构型变差, 北斗定位的精度和可用性下降, 因此引入 5G 定位系统作为北斗卫星星座的补充, 将北斗和 5G 深度融合, 进行北斗+5G 联合定位。传统的最小二乘加权算法权值分配固定, 加权系数无法反映北斗和 5G 实际的测量误差特点, 是以引入卫星高度角先验定权和 Helmert 方差分量估计后验加权纠正算法对北斗+5G 联合定位进行优化。在高层建筑之间、高层建筑附近和桥梁下三个典型的公路场景仿真实验中, 北斗+5G 联合定位的精度相比单纯北斗定位均得到大幅提升, 结果表明, 北斗+5G 联合定位技术能够有效提升公路复杂环境下的定位服务性能。

参考文献

- [1] 昌飞. 北斗+5G 室内外融合定位技术的应用展望[J]. 集成电路应用, 2021, 38(1): 24–25.
CHANG Fei. Prospect of BeiDou+5G indoor and outdoor fusion positioning technology[J]. Application of IC, 2021, 38(1): 24–25.
- [2] 孙佳兴, 张晓林, 侯冰. ABC 优化 BP 神经网络算法在组合导航中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2016, 37(5): 40–48.
SUN Jiaying, ZHANG Xiaolin, HOU Bing. Application of ABC-based BP neural network in integrated navigation system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(5): 40–48.
- [3] 孙熙胜, 李滔, 毛兴, 等. 基于北斗 UWB 的高精度室内外定位系统与定位方法[J]. 集成电路应用, 2020, 37(5): 118–119.
SUN Xisheng, LI Tao, MAO Xing, et al. High precision indoor and outdoor positioning system and positioning method based on BeiDou UWB[J]. Application of IC, 2020, 37(5): 118–119.
- [4] 关维国, 焦萌, 孙福明, 等. 基于北斗伪距差分与 WiFi 的室内外融合定位方法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(5): 13–16.
GUAN Weiguo, JIAO Meng, SUN Fuming et al. Indoor and outdoor fusion localization method based on BeiDou pseudo-range difference and WiFi[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(5): 13–16.
- [5] 李殿赞. 北斗+5G 开启智慧新时代[J]. 卫星应用, 2020(7): 37–40.
- [6] 3GPP. NG radio access network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN [J/OL]. TR 38. 305 (16. 4. 0), 2020. URL: <https://www.3gpp.org/DynaReport/status-report.htm#activeRel-18>.
- [7] 刘经南. “5G+北斗”的意义、路径和愿景[J]. 网信军民融合, 2019(11): 11–14.
- [8] 刘中令. 基于 5G 的高精度室内定位技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [9] 姚鑫雨, 张晓林, 霍航宇, 等. 观测值质量定权的北斗多模导航 RNP 性能评估方法[J]. 遥测遥控, 2017, 38(1): 47–57.
YAO Xinyu, ZHANG Xiaolin, HUO Hangyu, et al. BeiDou multi-mode navigation RNP evaluation method with observation quality weighting[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(1): 47–57.
- [10] 孔龙涛, 王文丽. GNSS 接收机加权 RAIM 算法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 71–77.
KONG Longtao, WANG Wenli. Research on algorithm of weighted RAIM for GNSS receiver[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 71–77.
- [11] 龚利, 赵延杰, 朱明辉. 一种基于北斗和 5G 技术融合的复杂环境下机车定位方法[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(2): 44–51.

- GONG Li, ZHAO Yanjie, ZHU Minghui. Fusion method based on BeiDou and 5G technology for locomotive positioning in complex environment[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(2): 44–51.
- [12] 刘长建, 马高峰. Helmert 方差分量估计结果的方差一致性检验实质[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(2): 96–98.
LIU Changjian, MA Gaofeng. The essence of test for uniform variance of variance component estimation of Helmert type[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2002, 19(2): 96–98.
- [13] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014(1): 104.
YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system[J]. Science China: Earth Sciences, 2014(1): 104.
- [14] 刘天骏, 王坚, 韩厚增, 等. GPS/BDS 分类组合定位的指数加权 Helmert 方差分量估计法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7): 684–688, 694.
LIU Tianjun, WANG Jian, HAN Houzeng, et al. Exponential weighted Helmert variance component estimation for GPS/BDS combined positioning with satellite classification[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(7): 684–688, 694.
- [15] 高晓, 戴吾蛟. 抗差 Helmert 方差分量估计在 GPS/BDS 组合定位中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 173–176.
GAO Xiao, DAI Wujiao. Application of robust Helmert Variance component estimation to position in combination of GPS and BDS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(1): 173–176.
- [16] 郭树人, 王威, 高为广, 等. 北斗卫星导航试验验证系统设计与实现[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1073–1083.
GUO Shuren, WANG Wei, GAO Weiguang, et al. Design and implementation of the ground test and verification bed for BeiDou navigation satellite system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1073–1083.
- [17] DENG Zhongliang, WANG Hanhua, ZHENG Xinyu, et al. Base station selection for hybrid TDOA/RTT/DOA positioning in mixed LOS/NLOS environment[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4132.

[作者简介]

- 曹晓春 1969 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智慧交通、工程管理和经济学。
张 静 1979 年生, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为交通机电工程和智慧交通。
林开钦 1994 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航技术和通信技术。
孙天阳 1995 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航技术。
李振海 1981 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星导航技术和测绘技术。
李 奇 1982 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航技术和电离层反演技术。

(本文编辑: 杨秀丽)