



# 信号遮挡环境下融合TOA/AOD的5G/SINS 组合导航算法模型与精度分析

邓 玥<sup>1</sup> 余 江<sup>1</sup> 郭文飞<sup>2</sup> 陈起金<sup>2</sup> 刘经南<sup>1,2</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学卫星导航定位研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要:**为解决可观测基站受遮挡情况下仅采用到达时间(time of arrived, TOA)无法定位或精度较差的问题,将第5代移动通信技术(5th generation, 5G)中多天线阵列提供的信号离开角(angle of departure, AOD)应用在定位解算中,通过卡尔曼滤波将5G定位与捷联惯性导航(strapdown inertial navigation system, SINS)融合,构成融合TOA/AOD的5G/SINS组合导航方案。通过模拟可观测5G基站数量充足、遮挡这两类场景下的仿真实验,对基于TOA的5G定位、基于TOA/AOD的5G定位、TOA组合导航、TOA/AOD组合导航这4种解算方法的位置误差进行了比较。仿真实验结果表明,当可观测基站受遮挡时,融合TOA/AOD进行5G/SINS组合导航能确保100%的定位成功率,并有效降低组合导航发散的概率,减小40%~70%的位置误差。

**关键词:**5G/SINS组合导航;AOD;TOA

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

作为信息交互枢纽,第5代移动通信技术(5th generation, 5G)在实现通信功能的同时,也具备许多有利于定位的优良特性<sup>[1]</sup>,如高频高带宽、超密集基站分布,以及大规模天线阵列等。作为通信标准的制定者,第3代合作伙伴计划(the third generation partnership project, 3GPP)也一直致力于将定位能力加入通信标准<sup>[2-3]</sup>,5G定位的可行性得到了广泛的认可<sup>[4-6]</sup>,文献[7-8]采用两层卡尔曼滤波方案,在sub-6 GHz频率上实现了亚米级定位精度以及纳秒级的时钟同步精度<sup>[7-8]</sup>。文献[9-10]则更多地利用毫米波信道的稀疏性,采用压缩感知来估计信道参数,进而分析克拉美罗定位下界,仿真分析表明,5G毫米波定位在存在散射点的条件下可实现厘米级的定位精度。目前,关于5G定位能力的研究大多集中在理论算法层面,缺少对观测环境的考虑。

事实上,与其他无线信号一样,5G信号在传输过程中也会受复杂环境的干扰<sup>[11]</sup>。尤其是在城市峡谷和隧道等情况下,信号遮挡使得可观测5G基站数量较少,基于到达时间(time of arrived,

TOA)的5G定位能力被制约,甚至出现无法定位的情况。这使得5G多源融合定位成为新的发展趋势<sup>[12-13]</sup>。

5G中多天线阵列的加入在扩大通信容量的同时使得5G具备一定的测角能力,与仅采用TOA进行5G定位相比,测角信息的加入可以在一定程度上解决观测值数量不足的问题,减少定位所需基站数<sup>[14-16]</sup>,提高定位成功率。另一方面,捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS)仅需利用自身惯性元件的量测信息即可进行用户位置、速度以及姿态等参数的推算<sup>[17-18]</sup>,可以与5G定位进行融合,降低恶劣观测环境对5G定位的影响。然而,目前还未看到将5G测角信息、惯性传感器与5G定位进行融合的相关研究。

本文的核心工作围绕融合TOA/信号离开角(angle of departure, AOD)的5G/SINS组合导航算法建模与精度分析展开,首先介绍了基于TOA的5G定位模型;接着,针对信号遮挡场景,提出了融合TOA/AOD的组合导航模型;然后,开展

收稿日期:2020-10-25

项目资助:国家“十三五”重点研发计划(2018YFC0809804);国家自然科学基金(41974038);中国第二代卫星导航系统重大专项(GFZX030302030202, GFZX030302030204)。

第一作者:邓玥,硕士,主要从事5G定位研究。604694306@qq.com

通讯作者:郭文飞,博士,副教授。wf.guo@whu.edu.cn

了可观测基站数量充足、遮挡这两类场景下的仿真实验,对采用TOA或TOA/AOD的5G定位和组合导航的位置误差进行了比较。

## 1 基于TOA的5G定位模型

本文中,将基站 $i$ 的位置坐标矢量记作 $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ ,用户在 $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ 处接收到基站 $i$ 发出的5G信号,提取出信号传播时延 $t_i$ 。若用户在当前位置可观测到 $n$ 个基站( $i = 1, 2 \dots n$ ),各基站的测距观测值可以表示为:

$$\begin{bmatrix} ct_1 \\ ct_2 \\ \vdots \\ ct_i \\ \vdots \\ ct_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}\| \\ \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}\| \\ \vdots \\ \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}\| \\ \vdots \\ \|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}\| \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中, $c$ 为光速; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测误差; $\|\cdot\|$ 表示向量模长。记 $f(\mathbf{r})$ 为以向量 $\mathbf{r}$ 为自变量的函数:

$$f(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}\| \\ \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}\| \\ \vdots \\ \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}\| \\ \vdots \\ \|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}\| \end{bmatrix} \quad (2)$$

用户当前位置坐标 $\mathbf{r}$ 为未知量,自由度为3。因此需要至少3个基站才能够进行位置解算,即 $n \geq 3$ 。在初值 $\mathbf{r}_0$ 处进行泰勒一阶展开,忽略线性化造成的精度损失,构建最小二乘观测方程为:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为状态量且 $\mathbf{x} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ ;  $\mathbf{z}$ 为观测量且 $\mathbf{z} = f(\mathbf{r}) - f(\mathbf{r}_0)$ ; 转移矩阵 $\mathbf{H} = f'(\mathbf{r}_0)$  ( $f'(\mathbf{r}_0)$ 为函数 $f(\mathbf{r})$ 在 $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ 处的一阶导数)。将观测值权阵 $\mathbf{P}$ 设为单位阵,进行迭代最小二乘估计:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{z} \quad (4)$$

多次迭代后状态量 $\mathbf{x}$ 收敛即表示定位成功。状态量反馈后即得到待估用户坐标 $\mathbf{r}$ 。

## 2 融合TOA/AOD的5G/SINS组合导航模型

本文提出的5G/SINS组合导航模型建立在导航系下。如图1所示,在已知初始位置 $\mathbf{r}_0$ 、速度

$\mathbf{v}_0$ 、姿态 $\mathbf{q}_0$ 的条件下,惯性传感器感知用户运动,按一定频率输出角增量 $\Delta\theta$ 和速度增量 $\Delta\mathbf{v}$ ,通过惯性导航解算得到位置 $\mathbf{r}_{\text{INS}}$ 、速度 $\mathbf{v}_{\text{INS}}$ 、姿态 $\mathbf{q}_{\text{INS}}$ 。同时,用户与5G基站进行通信,获取5G信号到附近多个基站的传播时延 $t$ 和方位角 $\alpha$ 、高度角 $\beta$ ,通过5G定位模型得到当前时刻载体的5G定位解 $\mathbf{r}_{\text{5G}}$ 。将两种方式得到的位置结果 $\mathbf{r}_{\text{INS}}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{5G}}$ 转换到同一个参考中心点后作差,投影到导航系中作为观测量进行卡尔曼滤波,并输出当前时刻组合导航位置、速度、姿态的最优估计 $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{q}$ 。组合后的位置速度姿态结果又可作为初值代入到下一时刻的惯导推算中。

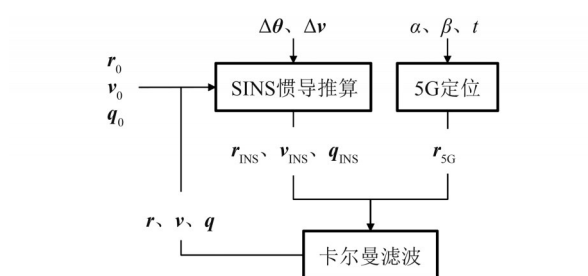


图1 5G/SINS组合导航模型

Fig.1 Model of 5G/SINS Integrated Navigation

### 2.1 基于TOA/AOD的5G定位模型

基站 $i$ 的位置坐标 $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ ,用户在 $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ 处接收到基站 $i$ 发出的5G信号,提取出信号离开方位角 $\alpha_i \in (-\pi, \pi]$ 、离开高度角 $\beta_i \in (-\pi/2, \pi/2]$ 、信号传播时延 $t_i$ 。用户当前位置坐标 $\mathbf{r}$ 为未知量,自由度为3,由于加入了离开高度角和离开方位角,此时至少有1个基站就能够进行位置解算。用户到基站的测角和测距观测值可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i \ \beta_i \ ct_i \dots \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \arctan 2(y - y_i, x - x_i) \\ \arctan \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \\ \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \\ \vdots \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

线性化后得到形如式(3)的观测方程,之后即可通过式(4)进行迭代最小二乘解算,得到待估用户坐标 $\mathbf{r}$ 。不同的是,由于此时观测值中存在角度和距离这两类不同类型观测值,观测值权重不再为单位矩阵。假设各观测值之间互相独立,权重矩阵 $\mathbf{P}$ 可设置为:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_a^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_\beta^2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \frac{1}{c^2 m_i^2} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $m_i^2$ 、 $m_a^2$ 、 $m_\beta^2$  分别为时延、方位角、高度角观测值的中误差。

## 2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波中的状态方程由惯性导航误差传播模型建立。采用松组合模式对 5G 和惯导数据进行融合,这种组合方式建立在两种导航系统的结果层面上,即只需要 5G 定位和 SINS 各自解算得到的位置以及协方差矩阵。

在导航系中,建立 SINS 误差微分方程。状态参数为 15 维,包含位置误差  $\delta r$ 、速度误差  $\delta v$ 、姿态误差  $\phi$ 、加速度零偏  $b_a$  和陀螺零偏  $b_g$ 。本文将陀螺零偏误差  $w_{bg}$  和加速度计零偏误差  $w_{ba}$  建模为一阶高斯马尔可夫过程,相关时间  $\tau = 100$  s,陀螺零偏标准差  $\sigma_{bg} = 36^\circ/\text{h}$ ,加速度计零偏标准差  $\sigma_{ba} = 1$  mg。将角速度误差  $w_g$  和加速度误差  $w_a$  建模为白噪声,表示为陀螺的角度随机游走 (angle random walk, ARW)  $\sigma_{ARW} = 3^\circ/\sqrt{\text{h}}$  和加速度计的速度随机游走 (velocity random walk, VRW)  $\sigma_{VRW} = 0.12 \text{ m}/(\text{s}\sqrt{\text{h}})$ 。连续时间系统状态方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r} \\ \delta \dot{v} \\ \dot{\phi} \\ \dot{b}_g \\ \dot{b}_a \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \delta r \\ \delta v \\ \phi \\ b_g \\ b_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_b^n & 0 & 0 \\ -C_b^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_g \\ w_a \\ w_{bg} \\ w_{ba} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\delta \dot{r}$ 、 $\delta \dot{v}$ 、 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{b}_g$ 、 $\dot{b}_a$  分别为  $\delta r$ 、 $\delta v$ 、 $\phi$ 、 $b_g$ 、 $b_a$  的一阶导数;  $C_b^n$  为姿态旋转矩阵; 状态转移矩阵  $F$  的具体计算公式可参考文献[19]。

在构建观测方程时,由于 5G 天线相位中心与惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 相位中心不一致,首先需要进行杆臂改正,将位置向量归算到 5G 天线相位中心上。之后将惯导递推并经过杆臂改正后的位置结果与 5G 定位解算得到的位置结果的差值在导航系下的投影作为观测量,通过构建观测量与状态量之间的关系得到转移矩阵  $H$ , 计算公式为:

$$H = [I \quad 0 \quad (C_b^n l) \times \quad 0 \quad 0] \quad (8)$$

式中,  $l$  为杆臂向量,即 IMU 测量中心指向 5G 天线相位中心的矢量在 IMU 坐标系下的投影。

## 3 融合 TOA/AOD 的 5G/SINS 组合导航仿真实验与分析

本文设计了可观测基站数量充足、信号遮挡这两类场景下的仿真实验,对基于 TOA 的 5G 定位、基于 TOA/AOD 的 5G 定位、TOA 组合导航、TOA/AOD 组合导航这 4 种解算方法获得的位置结果进行了统计分析。

### 3.1 实验场景及相关参数

为了更贴合实际的室外城市微基站场景,本文以 100 m 为间距建立正方形基站网格,基站高度服从  $[5, 15]$  m 内均匀分布<sup>[20-21]</sup>。实验过程中,用户仅能与距离最近的几个基站进行通信,获取对应的观测值。用户可观测到的基站数量可以在一定程度上表示观测条件的优劣。用户轨迹的长度约为 4.8 km,时长约 10 min。

从图 2 中可以看出,用户运动过程中横滚角和俯仰角均维持在  $0^\circ$  附近,只有航向角发生了改变。同时,用户垂向运动动态性较弱,垂向速度小于 0.04 m/s,轨迹的高程变化在 2 m 以内。

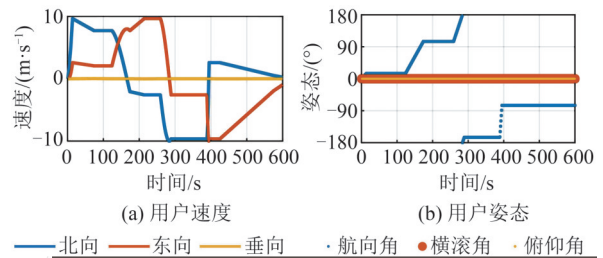


图 2 用户速度、姿态真值

Fig.2 True Values of Velocity and Attitude of User

5G 信号传播过程的模拟及测角、测距观测值的获取是通过对开源 5G 信道模拟器 NYUSIM 进行了一定的改进来完成的<sup>[22-23]</sup>。对获取到的测角、测距误差进行统计,得到测距精度约为 1 m,高度角精度约为  $2.5^\circ$ ,方位角精度约为  $8.5^\circ$ 。

### 3.2 基站充足时 4 种算法位置结果比较

为了模拟可观测基站数量充足的场景,实验中基站数量设置为 4~8 之间的均匀分布,计算得到平面的精度因子 (dilution of precision, DOP) 均值约为 1,垂向 DOP 均值约为 3。

从图 3 中可以看出,当可观测 5G 基站数量充足时,5G 定位和组合导航均得到了较为连续且稳定的位置结果。表 1 的统计结果显示,5G 定位成功率高于 90%,其中少数失败历元主要是由较差



的观测值导致。同时,在5G定位和组合导航中,垂向位置误差比平面位置误差大,主要原因是基站分布均位于用户轨迹上方,垂向基站分布相对较差。对比4种解算方法的定位误差可以看出,加入测角观测值后,水平位置误差变小的幅度较小,而垂向位置精度有显著改善。这是因为测角

信息中高度角精度优于方位角精度。另外,与5G定位相比,组合导航解算得到的位置误差均方根在水平方向上减少了40%左右;而在垂向上,基于TOA的5G定位中出现了较大的连续偏置误差,这也使得TOA组合导航的垂向误差也出现了较大的误差。

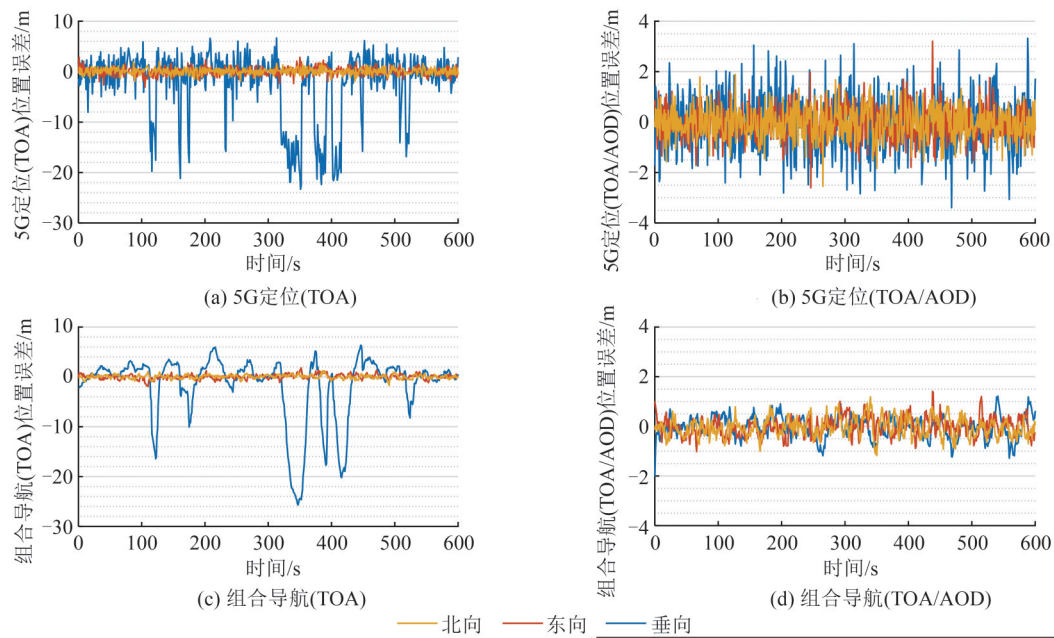


图3 基站数量充足时4种算法得到的位置误差

Fig.3 Position Errors Obtained by 4 Methods with Sufficient Number of Base Stations

表1 基站数量充足时4种算法得到的位置误差统计

Tab.1 Statistics of Position Errors Obtained by 4 Methods with Sufficient Number of Base Stations

定位算法类型	定位成功率/%	位置误差/m		
		北向	东向	垂向
5G定位(TOA)	91.3	0.62	0.79	6.42
5G定位(TOA/AOD)	100	0.64	0.67	1.15
组合导航(TOA)	100	0.39	0.48	6.43
组合导航(TOA/AOD)	100	0.38	0.36	0.44

3.3 信号遮挡时采用TOA/AOD观测值的两种算法位置结果比较

为了模拟信号遮挡的场景,实验中可观测基站数量设置为1或2的均匀分布。由于可观测5G基站数量较少,无法进行基于TOA的5G定位。如图4所示,AOD观测值的加入降低了对定位解算中可观测5G基站数量的需求,使得基于TOA/AOD的5G定位能够解算得到定位结果,且成功历元比例达到了98%(见表2)。

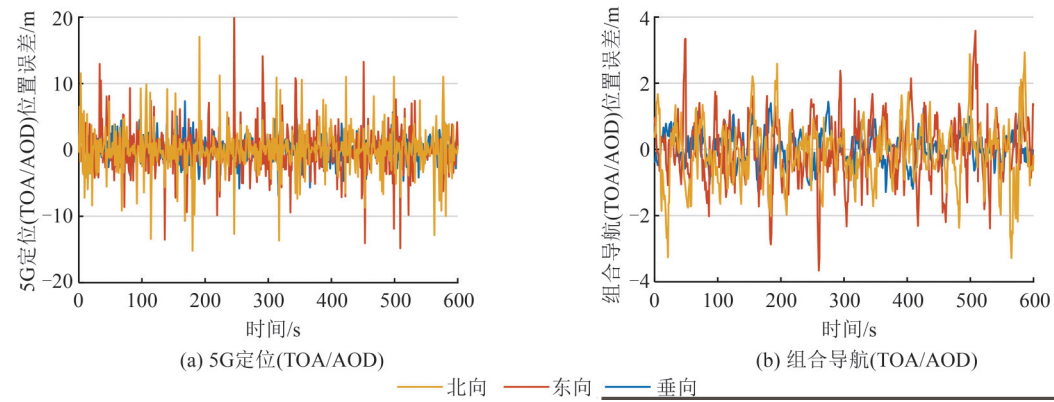


图4 信号遮挡时采用TOA/AOD观测值的两种算法得到的位置误差

Fig.4 Position Errors Obtained by 2 Methods Based on TOA/AOD Observations in Case of Signal Blockage

表 2 信号遮挡时两种算法得到的位置误差统计

Tab.2 Statistics of Position Errors Obtained by 2 Methods in Case of Signal Blockage

定位算法类型	定位 成功率/%	位置误差/m		
		北向	东向	垂向
5G 定位 (TOA/AOD)	98.1	3.30	3.44	1.68
组合导航 (TOA/AOD)	100	0.88	0.97	0.46

对比表 1 和表 2 的结果可以发现,在基站信号遮挡时,加入 AOD 观测虽然实现了高成功率的定位,但定位精度相比于基站数量充足的情形仍有所下降。进一步加入惯性传感器后,位置误差减少了 70% 左右,即采用 TOA/AOD 组合导航在实现 100% 定位成功率的同时,消除了误差较大的飞点,且总体定位精度优于 1 m。

4 结 语

为改善 5G 定位在城市峡谷和隧道等复杂环境下的定位能力,本文提出了融合 TOA/AOD 的 5G/SINS 组合导航方案,并在复杂场景下进行了仿真验证。实验结果表明,测角信息的加入在可观测基站数量充足时,对定位精度和定位成功率的影响较小;而在可观测 5G 基站受到遮挡时,则具有十分明显的优势,能够有效地提高定位成功率。SINS 的加入不仅能确保 100% 的定位成功率,还能抑制较大位置误差的出现,使水平和垂向位置误差减少 40%~70%,提高了定位精度和连续性。但当 5G 定位中出现连续的较大误差历元时,也会影响组合导航的位置解算结果。因此,在复杂环境下,融合测角信息进行组合导航才能够充分发挥两者的优势,在有效降低组合导航发散概率的同时提高定位连续性和定位精度。

本文通过仿真验证了所提方法的可行性,但尚未进行 5G 定位的实测验证。另外,本文采用的定位算法仅利用了视距条件下的直达路径信号,忽略了非视距及多径信号中包含的信息。这有待后续进一步的研究。

参 考 文 献

[1] Tahat A, Kaddoum G, Yousefi S, et al. A Look at the Recent Wireless Positioning Techniques with a Focus on Algorithms for Moving Receivers [J]. *IEEE Access*, 2016, 4(1): 6652-6680

[2] 3GPP. NR Positioning Protocol A (V16.2.0) :

3GPP TS 38 455[S]. Nice:ETSI,2020

[3] 3GPP. Stage 2 Functional Specification of User Equipment Positioning in NG-RAN (V15.5.0) : 3GPP TS 38.305[S]. Nice:ETSI,2020

[4] del Peral-Rosado J A, Seco-Granados G, Raulefs R, et al. Whitepaper on New Localization Methods for 5G Wireless Systems and the Internet-of-Things [R]. Brussels: European Cooperation in Science and Technology,2018

[5] Wen F, Wymeersch H, Peng B, et al. A Survey on 5G Massive MIMO Localization[J]. *Digital Signal Processing*, 2019, 94(1): 21-28

[6] Wymeersch H, Seco-Granados G, Destino G, et al. 5G Millimeter Wave Positioning for Vehicular Networks [J]. *IEEE Wireless Communications*,2017,24(6): 80-86

[7] Koivisto M, Costa M, Werner J, et al. Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2017, 16(5): 2866-2881

[8] Koivisto M, Talvitie J, Costa M, et al. Joint Centimeter Wave-Based Multiuser Positioning and Network Synchronization in Dense 5G Networks[C]//*IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Barcelona, Spain, 2018

[9] Shahmansoori A, Garcia G E, Destino G, et al. Position and Orientation Estimation Through Millimeter Wave MIMO in 5G Systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1822-1835

[10] Talvitie J, Valkama M, Destino G, et al. Novel Algorithms for High-Accuracy Joint Position and Orientation Estimation in 5G Millimeter Wave Systems [C]//*IEEE Globecom Workshops*,Singapore, 2017

[11] Abu-Shaban Z, Seco-Granados G, Benson C R, et al. Performance Analysis for Autonomous Vehicle 5G-Assisted Positioning in GNSS-Challenged Environments[C]// *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Portland, OR, USA, 2020

[12] Shi Chuang, Zhang Hongping, Gu Shengfeng, et al. Technology of Cloud Positioning and Its Platform for Positioning Service[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(8): 995-999 (施闯,章红平,辜声峰,等.云定位技术及云定位服务平台[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2015,40(8): 995-999)

[13] Tu Wei, Cao Jinzhou, Gao Qili, et al. Sensing Urban Dynamics by Fusing Multi-sourced Spatiotemporal Big Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1875-1883

- (涂伟, 曹劲舟, 高琦丽, 等. 融合多源时空大数据感知城市动态[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1875-1883)
- [14] Jia Y, Tian H, Fan S, et al. Motion Feature and Millimeter Wave Multi-path AOA-TOA Based 3D Indoor Positioning [C]//The 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Bologna, Italy, 2018
- [15] Li Y, Qi G, Sheng A. Performance Metric on the Best Achievable Accuracy for Hybrid TOA/AOA Target Localization [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(7): 1474-1477
- [16] Mendrzik R, Wymeersch H, Bauch G. Joint Localization and Mapping Through Millimeter Wave MIMO in 5G Systems [C]//IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018
- [17] Liu Shuai. Research and Implementation of GPS/INS Integrated Navigation Algorithms [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012 (刘帅. GPS/INS组合导航算法研究与实现[D]. 郑州:信息工程大学, 2012)
- [18] Zhu Feng. GNSS/SINS/Vision Multi-sensors Integration for Precise Positioning Orientation Determination [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (朱锋. GNSS/SINS/视觉多传感器融合的精密定位定姿方法与关键技术[D]. 武汉:武汉大学, 2019)
- [19] Shin E H. Estimation Techniques for Low-cost Inertial Navigation [D]. Alberta, Canada: University of Calgary, 2005
- [20] Raschkowski L, Kysti P, Kusume K, et al. METIS Channel Models (D1.4) [EB/OL]. (2015-05-24) [2015-05-28]. [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D1.4\\_v1.0.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.4_v1.0.pdf)
- [21] METIS. Deliverable D6.1 Simulation Guidelines [EB/OL]. (2013-10-30) [2013-10-31]. [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D6.1\\_v1.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D6.1_v1.pdf)
- [22] Ju S, Kanhere O, Xing Y, et al. A Millimeter Wave Channel Simulator NYUSIM with Spatial Consistency and Human Blockage [C]//IEEE Global Communications Conference, Waikoloa, HI, USA, 2019
- [23] Sun S, Maccartney G R, Rappaport T S. A Novel Millimeter Wave Channel Simulator and Applications for 5G Wireless Communications [C]//IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017

## Modeling and Accuracy Analysis of TOA/AOD Based 5G/SINS Integrated Navigation in Case of Signal Blockage

DENG Yue<sup>1</sup> YU Jiang<sup>1</sup> GUO Wenfei<sup>2</sup> CHEN Qijin<sup>2</sup> LIU Jingnan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** **Objectives:** Like all radio signals, 5G (5th generation) signal will also face the problem of being vulnerable to transmission interference in complex environments, which will lead to few number of observable base stations, and then affect the performance of positioning. Therefore, it is important to solve the problem of poor accuracy or inability to positioning using only TOA(time of arrived) based 5G positioning in case of signal blockage. **Methods:** We applied AOD(angle of departure) capability of multi-antenna to 5G positioning, and integrated it with SINS(strapdown inertial navigation system) through EKF(extended Kalman filter) to form TOA/AOD based 5G/SINS integrated navigation system. After that, simulation experiments were designed for two scenarios: With sufficient number of observable 5G base stations and with signal blockage, and the position errors of four methods are compared, these are TOA based 5G positioning, TOA/AOD based 5G positioning, TOA based integrated navigation, TOA/AOD based integrated navigation. **Results:** Simulation experimental results show that: (1) When the number of observable 5G base stations is sufficient, the addition of AOD reduces the horizontal and vertical position errors, and due to the higher accuracy of the elevation angle, the reduction of the vertical position error is more obvious. (2) When the number of observable 5G base stations is sufficient, compared with 5G positioning, the position error

obtained by the integrated navigation is reduced by about 40% in the horizontal direction. However, the TOA based 5G positioning in our experiment has a continuous large error in the vertical direction, which also causes a large vertical error in TOA based integrated navigation. (3) In case of signal blockage, due to the insufficient number of observable 5G base stations, TOA based 5G positioning cannot be performed, but the percentage of successful epochs for TOA/AOD based 5G positioning reaches 98%. And after adding inertial sensors, TOA/AOD based 5G/SINS integrated navigation ensure a 100% positioning success rate, and reduce the position error by 40% to 70%. **Conclusions:** The addition of AOD can effectively improve the positioning success rate in case of signal blockage. And compared to 5G positioning, integrated navigation can suppress the occurrence of some large position errors, and reduce the horizontal and vertical position errors by 40% to 70%. However, continuous large error in 5G positioning will also affect the results of integrated navigation. Therefore, in a complex environment, fusing AOD capability for integrated navigation can give full play to the advantages of both, improve positioning accuracy and positioning ability, and effectively reduce the probability of the divergence of integrated navigation.

**Key words:** 5G/SINS integrated navigation; AOD; TOA

**First author:** DENG Yue, master, specializes in 5G positioning. E-mail: 604694306@qq.com

**Corresponding author:** GUO Wenfei, PhD, associate professor. E-mail: wf.guo@whu.edu.cn

**Foundation support:** The China National Key Research and Development Program of China During the 13th Five-Year Plan Period (2018YFC0809804); the National Natural Science Foundation of China (41974038); the Major Project of China's Second-Generation Navigation Satellite System (GFZX030302030202, GFZX030302030204).

**引文格式:** DENG Yue, YU Jiang, GUO Wenfei, et al. Modeling and Accuracy Analysis of TOA/AOD Based 5G/SINS Integrated Navigation in Case of Signal Blockage[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(7): 1133-1139. DOI: 10.13203/j.whugis20200585 (邓玥, 余江, 郭文飞, 等. 信号遮挡环境下融合 TOA/AOD 的 5G/SINS 组合导航算法模型与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7): 1133-1139. DOI: 10.13203/j.whugis20200585)

(上接第 1121 页)

period from 2000 to 2015. The direct impact range that the Aral Sea on the regional surface temperature is roughly within 30 km along the lake boundary. As the area of the Aral Sea shrinks rapidly, the surface temperature difference between the various land cover types and the Aral Sea shows an increasing change trend. **Conclusions:** Large lakes similar to the Aral Sea have obvious temperature regulating effect on the regional environment. The reduction of the Aral Sea area has significantly reduced its temperature regulation function. The impact of the Aral Sea area change on regional climate plays an important warning role in the protection and management of wetlands and lakes.

**Key words:** Aral Sea; land surface temperature; regional microclimate; remote sensing; spatial analysis

**First author:** LIU Hao, master, research associate, specializes in 3S integration technology and application. E-mail: liu.hao@craes.org.cn

**Corresponding author:** TAN Minghong, PhD, researcher. E-mail: tanmh@igsrr.ac.cn

**Foundation support:** Chinese Academy of Sciences Strategic Guidance Technology Special Category A (XDA20040400).

**引文格式:** LIU Hao, WANG Guangjun, TAN Minghong. Influence of Aral Sea Area Shrinkage on Regional Land Surface Temperature[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(7): 1113-1121. DOI: 10.13203/j.whugis20200165 (刘浩, 王广军, 谈明洪. 咸海面积萎缩对区域地表温度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7): 1113-1121. DOI: 10.13203/j.whugis20200165)