

5G/GNSS 融合系统定位精度仿真分析

彭友志¹, 田野², 张炜程², 彭 教^{2*}, 洪学敏²

(1. 中国地震局地震研究所, 中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 厦门大学信息学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)在室内或室内外交界处等多径干扰的复杂环境下伪距测量精度不高, 定位精度不佳, 甚至无法定位. 第 5 代通信系统(5G)是我国目前大力发展的移动通信系统, 其特征在于基站密度高, 室内外覆盖性强, 通信带宽大, 因此具备精确测量基站与用户终端相对距离的潜力. 融合 5G 与 GNSS 信号进行定位, 可有效解决 GNSS 覆盖性不足、城市峡谷定位精度低等问题. 本文通过对不同场景下的多径干扰进行定量分析, 使用蒙特卡洛仿真的方法论证了几种典型的多径干扰条件下 5G/GNSS 融合系统的水平定位性能上下限. 仿真结果表明, 在室内或室内外交界处等多径干扰严重的环境下, 室内布设足够的 5G 基站并融合 5G 带内资源后可以使得定位精度达到亚米级.

关键词: 全球导航卫星系统; 5G; 多径干扰; 融合定位

中图分类号: TN 967

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2020)01-0101-07

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)可以为用户提供实时的位置、速度、时间信息(position navigation time, PNT). 随着美国全球定位系统(global positioning system, GPS)和俄罗斯 GLONASS 系统的现代化, 以及中国北斗 3 号系统的建设^[1], GNSS 的性能有了很大的提高. 然而随着用户对定位精度、鲁棒性的要求越来越高, 传统卫星定位技术在面对密集建筑和室内外切换等具有高遮挡、高多径干扰效应及高非视距(non-line of sight, NLoS)特征的复杂场景时, 已不能满足用户的需求^[2]. 此时, 将 GNSS 系统与其他系统如惯性导航系统^[3]、视觉导航系统^[4]或无线通信系统^[5]融合, 是一个有力的解决方案. 其中, 惯性导航系统会带来额外的累积误差, 视觉导航系统受光线环境制约严重; 而无线通信系统没有上述缺点, 且不需额外部署设备, 是与 GNSS 系统融合的合适选择.

无线通信系统中传统的 3G/4G 网络虽然拥有通信体制下的定位标准技术方案, 使其信号具有了定位功能, 但是其实际定位精度普遍在 100 m 以上^[6], 无

法满足用户定位精度要求. 随着第五代通信系统(5G)的出现, 5G 定位系统成为新的研究热点, 也为 GNSS 融合系统的定位性能带来了新的可能^[7-8]. 5G 的毫米波技术可获得更高精度的波达方向(direction of arrival, DOA)^[9], 比 4G 更大的带宽又使其可获得更高精度的到达时间差(time difference of arrival, TDOA)^[10], 同时 5G 布设的密集小型基站网络使得 5G 成为提高 GNSS 精度和鲁棒性非常合适的融合选择.

本研究使用基站视距(line of sight, LoS)比例来量化区分不同的使用场景, 并使用蒙特卡洛实验仿真出各场景下 GNSS 伪距测量、5G 的 DOA 测量和 TDOA 测量精度, 进一步得出各种场景下融合定位系统的水平定位精度.

1 测量及融合定位方式

GNSS 的测量方式通过伪码或载波相位测量获得接收终端与卫星之间的相对距离, 称之为伪距. 测得

收稿日期: 2019-10-09 录用日期: 2019-12-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0505202)

* 通信作者: pa@xmu.edu.cn

引文格式: 彭友志, 田野, 张炜程, 等. 5G/GNSS 融合系统定位精度仿真分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(1): 101-107.

Citation: PENG Y Z, TIAN Y, ZHANG W C, et al. Positioning accuracy analysis for 5G/GNSS fusion system[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2020, 59(1): 101-107. (in Chinese)



接收终端到第 i 颗卫星的伪距 ρ_i 与卫星及接收终端位置坐标的关系为

$$\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + \delta t \times c, \quad (1)$$

其中, (x, y, z) 表示接收终端的位置坐标, (x_i, y_i, z_i) 表示第 i 颗卫星的位置坐标, δt 表示卫星与接收终端的时钟差, c 为光速, 这里将时间误差通过光速映射为距离误差. 当可用卫星达到 4 颗及以上时 ($i \geq 4$), 便可解方程组获得接收终端位置及时钟差.

本研究中主要采用 5G 系统中 TDOA 和 DOA 两种测量结果与 GNSS 的伪距观测量进行融合, TDOA 测量结果替代到达时间 (time of arrival, TOA) 测量结果可以消除基站与接收终端的时间同步问题, 带来更高精度. TDOA 的测量方式是通过计算两基站到接收终端间的时间差, 从而计算出两基站到终端间的距离差. 测得接收终端到第 j 和第 k 两座基站间的距离差 $l_{j,k}$ 与接收终端坐标的关系为

$$l_{j,k} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} - \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}, \quad (2)$$

其中 (x_j, y_j, z_j) 和 (x_k, y_k, z_k) 分别表示第 j 和第 k 两座基站的位置坐标. 当可用基站达到 3 座以上时, 通过解联立方程组即可获得接收终端位置.

DOA 的测量方式为使用天线阵列测得基站信号到接收终端的入射角度, 包括航向角 φ 和俯仰角 θ . φ 、 θ 与接收终端、基站的位置坐标的关系为

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{x - x_j}{y - y_j}, \\ \tan \theta &= \frac{z - z_j}{\sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

当可用基站达到 3 座以上时, 通过解联立方程组即可获得接收终端位置.

在本文中, 使用最小二乘法求解 GNSS/TDOA/DOA 融合定位结果, 并在不同信噪比场景下分析其定位精度. 对单个基站 j 和卫星 i 的线性化观测方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_i}{\partial (x, y, z)} = \rho_{i, (\text{obs})}, \\ \frac{\partial l_{1,j}}{\partial (x, y, z)} = l_{1,j, (\text{obs})}, \\ \frac{\partial \tan \varphi_j}{\partial (x, y)} = \tan \varphi_{j, (\text{obs})}, \\ \frac{\partial \tan \theta_j}{\partial (x, y, z)} = \tan \theta_{j, (\text{obs})}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 obs 表示带有噪声的观测值. 设

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} & \frac{\partial \rho_1}{\partial y} & \frac{\partial \rho_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial x} & \frac{\partial \rho_2}{\partial y} & \frac{\partial \rho_2}{\partial z} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial x} & \frac{\partial \rho_i}{\partial y} & \frac{\partial \rho_i}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial l_{1,2}}{\partial x} & \frac{\partial l_{1,2}}{\partial y} & \frac{\partial l_{1,2}}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial l_{1,3}}{\partial x} & \frac{\partial l_{1,3}}{\partial y} & \frac{\partial l_{1,3}}{\partial z} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial l_{1,j}}{\partial x} & \frac{\partial l_{1,j}}{\partial y} & \frac{\partial l_{1,j}}{\partial z} & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D}_\varphi &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \tan \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \tan \varphi_1}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \tan \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \tan \varphi_2}{\partial y} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \tan \varphi_j}{\partial x} & \frac{\partial \tan \varphi_j}{\partial y} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D}_\theta &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \tan \theta_1}{\partial x} & \frac{\partial \tan \theta_1}{\partial y} & \frac{\partial \tan \theta_1}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial \tan \theta_2}{\partial x} & \frac{\partial \tan \theta_2}{\partial y} & \frac{\partial \tan \theta_2}{\partial z} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \tan \theta_j}{\partial x} & \frac{\partial \tan \theta_j}{\partial y} & \frac{\partial \tan \theta_j}{\partial z} & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{S}$ 、 $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{D}_\varphi$ 、 $\mathbf{D}_\theta$ 分别表示伪距、TDOA、航向角和俯仰角的观测矩阵, 则可以得到式 (4) 的观测残差方程组

$$\mathbf{G} \cdot [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \delta t]^T = \mathbf{b}. \quad (6)$$

其中: $\mathbf{G} = [\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{D}_\varphi, \mathbf{D}_\theta]^T$, $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \delta t]^T = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b}$, 表示牛顿法迭代每一步的修正量; $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_s, \mathbf{b}_T, \mathbf{b}_\varphi, \mathbf{b}_\theta]^T$, 表示每一次迭代的观测残差. $\mathbf{b}$ 的各项元素分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_s &= \begin{pmatrix} \rho_{1, (\text{obs})} - \rho_{1,n} \\ \dots \\ \rho_{i, (\text{obs})} - \rho_{i,n} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{b}_T &= \begin{pmatrix} l_{1,2, (\text{obs})} - l_{1,2,n} \\ \dots \\ l_{1,j, (\text{obs})} - l_{1,j,n} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{b}_\varphi &= \begin{pmatrix} \tan \varphi_{1, (\text{obs})} - \tan \varphi_{1,n} \\ \dots \\ \tan \varphi_{j, (\text{obs})} - \tan \varphi_{j,n} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{b}_\theta &= \begin{pmatrix} \tan \theta_{1, (\text{obs})} - \tan \theta_{1,n} \\ \dots \\ \tan \theta_{j, (\text{obs})} - \tan \theta_{j,n} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 n 表示第 n 次迭代. 迭代计算过程如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_n \\ \hat{y}_n \\ \hat{z}_n \\ \delta \hat{t}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{y}_{n-1} \\ \hat{z}_{n-1} \\ \delta \hat{t}_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta t \end{bmatrix}.$$

(8)

迭代至收敛后,即可获得最优的定位估计解 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \delta \hat{t})^T$.

2 定位场景分类

5G/GNSS 融合定位技术的性能与用户所处场景密切相关,其场景描述指标包括 5G 基站密度和基站发射信号功率、GNSS 可用卫星数量和卫星信号质量、多径干扰效应等,这些因素都会影响定位结果的

精度和可用性. 在实际使用场景中,可能会出现多种不利影响因素并存的现象,同时由于不同场景中基站数量和卫星数量的不同,定位的参考源还需要做到自适应切换. 目前尚未出现一种通用的方法可以解决各种不同场景下的定位问题,因此需要对定位场景进行分类研究,本文列举了 3 种典型的应用场景,各场景的特征参数如表 1 所示.

3 5G 测量精度分析

5G 系统的测距精度和测角精度是决定 5G 系统定位性能的直接因素,因此在分析 5G/GNSS 融合定位精度前,首先需要对 5G 系统的测量精度进行详细分析.

表 1 不同场景的特征参数
Tab. 1 Character parameter sets in different scenarios

场景	可见星数	卫星信号强度	多径干扰效应	基站密度	基站信号发射功率/dBm
室外	多	强	不存在	稀疏(1~2)	49(高)
室内外交界处	少	弱	存在	中等(3~4)	24~44(中)
室内	无	无	存在	密集(≥ 5)	24(低)

3.1 测距精度

为分析 5G 信号的时延测量精度,采用文献[11-12]给出的正交频分复用(OFDM)信号时延估计克拉美罗界计算公式:

$$\text{var}(\tau) \geq \text{CRB}(\tau) = \frac{T^2}{8\pi^2 R_{\text{SN}} \sum_{n \in N} n^2 p_n^2}.$$

(9)

其中: $\text{var}(\tau)$ 为测距精度误差方差; $\text{CRB}(\tau)$ 表示其克拉美罗界; R_{SN} 为信噪比; p_n 为子载波 n 的相对权重; $T = 1/F_{\text{SC}}, F_{\text{SC}}$ 为子载波频率.

由于 5G 定位系统的相关标准尚未完善^[13],本研究使用 4G 系统中定位频带资源划分准则,结合 5G 已定义的信号物理层参数,评估 5G 带内定位的性能^[14]. 在 5G 环境中,定位参考信号(positioning reference signal, PRS)占用 12 个子载波,根据 3GPP TS 38. 855 规范描述^[15],在系统带宽为 50 MHz 及以下时,子载波间隔为 15 kHz,PRS 信号占用带宽为 180 kHz;当系统带宽为 100 MHz 时,子载波间隔为 30 kHz,PRS 信号占用带宽为 360 kHz. 在加性高斯白噪声(additive white Gauss noise, AWGN)信道条件下进行精度估计得到测距的均方根误差(RMSE,即测距精度)与载噪比的关系如图 1 所示.

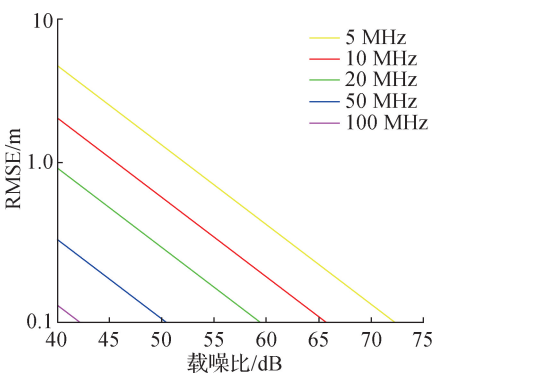


图 1 AWGN 信道下 5G 系统测距精度与定位序列带宽分配的关系

Fig. 1 Relationship between distance measurement accuracy of 5G system and bandwidth of positioning reference sequence under AWGN channel

从图 1 可以看出,测距精度随着系统带宽增加而提升. 以系统带宽为 50 MHz 且载噪比为 50 dB 时为例,此时 AWGN 信道下 5G 测距精度可达到 0. 21 m. 系统带宽为 100 MHz、载噪比为 50 dB 时测距精度就已经可以达到 0. 1 m 以内. 与 4G 相比,5G 更大的带宽使测距精度有更多的提升空间^[6],这是 5G 室内定位的一个巨大优势.

在实际定位中,多径干扰效应的存在会对测距精度产生影响并最终影响整个系统的定位精度.通过代入表 1 和 3GPP TS 36.873 R12 中的场景参数进行蒙特卡洛仿真,得到 5G 系统带宽为 50 MHz 且载噪比为 50 dB 时 3 种场景的测距精度分析结果(表 2).从表 2 可知,多径干扰效应会在很大程度上影响 5G 系统的测距精度.对室内场景来说,通过改善多径干扰效应可以使 5G 系统最佳测距精度达到亚米级.

表 2 5G 系统中不同场景下受多径效应影响的测距精度分析
Tab. 2 Multipath effects on distance measurement accuracy in different scenarios of 5G system

场景	条件	直射信号概率	RMSE/m
室外	$10\text{ m}<d_{2\text{D}}<5\ 000\text{ m}$ $h_{\text{BS}}=25\text{ m}$ $1.5\text{ m}\leq h_{\text{UE}}\leq 22.5\text{ m}$	0.86	0.21~7.80
室内外交界处	$10\text{ m}<d_{2\text{D}}<500\text{ m}$ $h_{\text{BS}}=10\text{ m}$ $1.5\text{ m}\leq h_{\text{UE}}\leq 22.5\text{ m}$	0.79	0.21~7.50
室内	$3\text{ m}<d_{2\text{D}}<150\text{ m}$ $h_{\text{BS}}=3\sim 6\text{ m}$ $1\text{ m}\leq h_{\text{UE}}\leq 2.5\text{ m}$	0.61	0.21~4.02

注: $d_{2\text{D}}$ 为基站到用户设备(user equipment, UE)的水平距离; h_{BS} 为基站高度; h_{UE} 为 UE 高度; 直射信号概率为 UE 处获得 5G 直射信号的概率.

3.2 测向角精度

在现有的基于参考信号(reference signal, RS)的 DOA 测量方法中,通过测量时间误差 $\Delta\tau$ 的方法可得到达角 θ ,即

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\tau \times c}{d}\right), \tag{10}$$

其中, $\Delta\tau$ 为长期演进(long term evolution, LTE)信号到达基站端天线阵列的时间差, d 为两个天线之间的距离.

通过采用蒙特卡洛仿真的方法可以对 θ 进行误差估计, θ 的均方根误差定义式如下:

$$\epsilon_{\text{RMS}}(\theta) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{1}{M} \sum_m |\hat{\theta}_{l,m} - \theta_{l,m}|^2}, \tag{11}$$

其中, L 为多径数量, M 为蒙特卡洛仿真次数, $\hat{\theta}_{l,m}$ 为 m 次仿真中第 l 条路径仿真时对 θ 的估计值, $\theta_{l,m}$ 为 m 次仿真中第 l 条路径仿真时 θ 的实际值.

在信号带宽为 20 MHz, 子载波间隔为 15 kHz, 载噪比为 50 dB, 蒙特卡洛仿真次数为 300 的条件下

进行仿真,测试多径数量对到达角测量精度的影响,得到的结果如图 2 所示.从图 2 中可以看出:随着多径数量的增加, θ 测量精度出现一定程度的下降;以多径数量为 5 表征多径干扰严重的环境,此时 θ 的测量误差仍在 3° 以内.

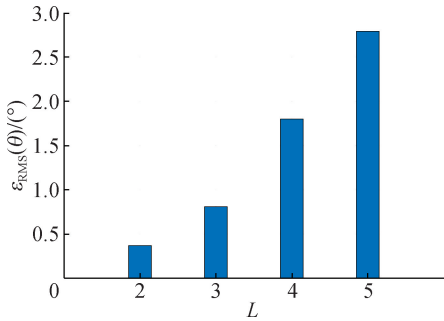


图 2 5G 系统中多径数量对到达角测量精度的影响
Fig. 2 Impact of multipath quantity on accuracy of arrival angle measurements in 5G system

在载噪比为 50 dB,多径数量为 2,蒙特卡洛仿真次数为 300 的条件下,对不同系统带宽时的到达角测量精度进行测试,得到的结果如图 3 所示.从图 3 中可以看出:考虑多径干扰效应的影响后,随着系统带宽增大,到达角测量精度依然有所提升;当多径数量为 2,系统带宽为 20 MHz 时,到达角测量精度已经可以达到 0.5° 以内.因此,5G 系统提供更大的系统带宽可使到达角测量精度得到进一步提升.

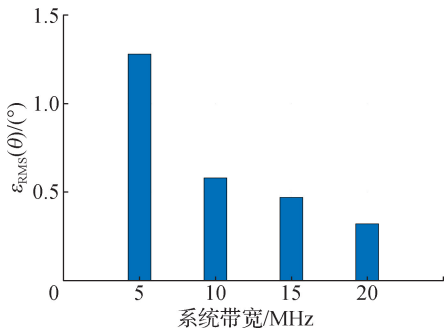


图 3 5G 系统中系统带宽对到达角测量精度的影响
Fig. 3 Impact of 5G system bandwidth on accuracy of arrival angle measurements in 5G system

4 5G/GNSS 融合系统定位性能分析

根据不同场景(不同多径干扰条件)下的 TDOA 测量精度上下限,以 DOA 水平测角精度 3° 为限,分析多系统组合水平定位精度的上下限.定位精度统计公式如下:

$$\text{var}(\Delta P) = E(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}), \quad (12)$$
其中, $\text{var}(\Delta P)$ 表示定位误差方差, E 表示求期望, Δx 和 Δy 分别表示水平面 x 和 y 轴的定位估计误差.

4.1 场景分析

根据 3GPP TR 36.873^[16] 给出不同场景下的多径干扰评估方法以及表 2 中不同场景下 5G 系统测量精度的典型取值范围, 分别计算 3 种场景下的典型基站视距比例, 以确定多径干扰效应对测距精度的影响; 同时为不同场景设置相同的载噪比以及带宽参数, 载噪比为 50 dB, 系统带宽为 50 MHz. 随后使用改变多径干扰程度, 即基站视距比例获得的测距精度区间, 计算三种场景下 5G/GNSS 融合系统的水平定位精度上下限, 其中精度上限代表多径干扰完全消除的理想情况, 精度下限表示该场景下多径干扰最严重的情况. 结合卫星参数设置绘制统计表(表 3), 其中伪距观测精度采用典型值^[17].

在设定的仿真环境中, 室内的多径干扰最为严重, 室外的多径干扰最小. 在完全没有多径干扰时, 室内和室外的水平定位精度相当; 而室外由于基站距离较远, 高度较高且相对密度较低, 信号质量也会有所下降, 于是虽然基站视距比例较高且多径干扰较小, 但是消除多径干扰的能力较弱, 信号质量差, 测距精度下限较低, 所以水平定位精度的下限较低. 然而, 由于室外有足够数量且观测质量较好的卫星, 所以虽然室外的测距精度下限比室内低 3.78 m, 而水平定位精度只下降了 0.95 m(表 3). 可见观测质量较好且数量充足的卫星可以对低精度的 TDOA 测量起到一定的补偿作用.

表 3 5G/GNSS 融合系统中不同场景下的水平定位性能

Tab. 3 Performance of horizontal positioning accuracy in different scenarios by 5G/GNSS fusion system					
场景	直射信号 号概率	测距精度 范围/m	可见 星数	伪距测量 精度/m	水平定位 精度范围/m
室外	0.86	0.21~ 7.80	4	1.5	0.14~ 3.80
室内外 交界处	0.79	0.21~ 7.50	2	2.5	0.21~ 5.17
室内	0.61	0.21~ 4.02	无	无	0.14~ 2.85

而在室内外过渡场景下, 受低质量、低数量的可

用卫星影响, 即使在基站信号完全没有多径干扰的理想环境, 定位性能也会稍逊于其他场景, 但弥补了单独 GNSS 系统无法定位的问题. 同时由于室内外过渡场景下也存在部分距离较远、高度较高的室外基站, 所以测距精度下限也较低, 但由于室内基站的存在, 下限比室外稍高. 在这种场景下, 普遍定位性能会比纯粹的室内和室外场景更加恶劣, 但由于持续时间较短, 在该场景下可以拒绝低精度的伪距观测参与解算, 从而提高精度.

4.2 伪距对 5G 系统干扰的补偿

设置 4 颗伪距测量精度为 1.5 m 的可用卫星, 与 5G/GNSS 系统在无多径干扰的理想环境下的定位性能作对比. 图 4 给出了观测到直射信号的概率改变时, 有无卫星伪距观测对 5G 系统定位精度的影响. 以无多径干扰时 TDOA 测量精度 0.21 m 为限, 直射信号概率从 0.5 逐渐提升至 1.0 时, 可以看出质量良好、数量充足的卫星伪距观测对 5G 系统的多径干扰有一定的补偿作用, 5G 系统受到多径干扰时, 卫星对定位性能有明显提升效果.

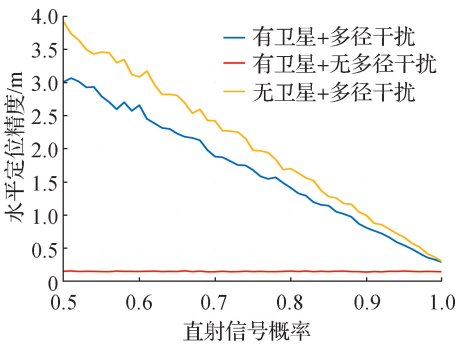


图 4 GNSS 的伪距观测对 5G 多径干扰的补偿
Fig. 4 Compensation of GNSS pseudo-range measurement to 5G multipath interference

4.3 典型场景定位精度分析

根据文献[18]的网络部署原则, 并结合典型城区建筑分布情况, 设置如下仿真参数: 在室内区域布设 4 座基站, 呈正方形分布, 相邻基站间距为 20 m; 在室外区域按照蜂窝网六边形结构布设 6 座基站, 相邻基站间距设为 400 m; 在室内外交界处按典型城市峡谷场景的卫星可见性状况, 设置 1 颗高仰角可见卫星. 整体布设情况如图 5 所示.

考虑其路径衰落和墙面衰落, 采用如下衰减因子损耗模型^[19], 则其信号衰落 $f(e)$ 表示为

$$f(e) = A - 10\alpha \lg e - \sum_{p=0}^P W(p), \quad (13)$$

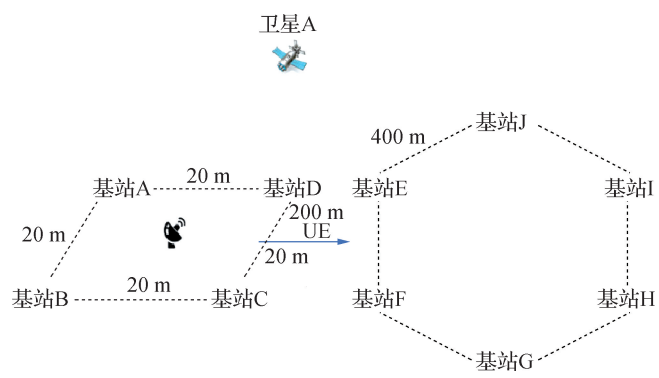


图5 信号衰落仿真的5G基站布设

Fig. 5 Illustration of 5G base station distribution in simulation

其中: A 为参考点 1 m 处的路径衰落, 取经验值 32.5 dB ^[18]; α 为路径损耗系数, 本文中取室外为 1 , 室内为 2 ; e 为基站到接收机的距离; $W(p)$ 为墙面衰落; p 为墙面的数量, 其取值与墙面材料有关, 本文中取 12 dB . 以 100 MHz 带宽、 70 dB 的载噪比进行衰落信道定位仿真. 如表 4 所示, 统计了 4 座室内基站、2 座室外基站和 4 座室内基站、6 座室外基站两组仿真的水平定位精度, 为了使其更接近 5G 带内信号的测量性能, 选择了 100 MHz 的带宽参数, 使用被墙面遮挡的基站数量来表征墙面衰落条件, 每一个基站都只被一堵墙遮挡. 墙面衰落与墙体的材料和结构有关, 不易建立模型, 一般的测量方式是通过大量数据的拟合, 这里取经验值 13 dB .

表 4 5G/GNSS 融合系统中衰落信道下的定位性能		
Tab. 4 Performance of 5G/GNSS fusion system in fading channels		
总基站数量	被墙面遮挡基站数量	RMSE/m
6(室内 4 座, 室外 2 座)	无	0.607
	室内 2 座	1.563
	室内 2 座, 室外 1 座	1.778
10(室内 4 座, 室外 6 座)	无	0.581
	室内 2 座, 室外 2 座	1.559
	室内 2 座, 室外 4 座	1.643

由表 4 可知, 在基站数目一定时, 路径衰落会明显降低定位精度, 而增加基站个数会一定程度上提高定位精度. 在没有考虑墙面遮挡衰落时, 由于基站数量增加, 且由于基站信号路径损耗与基站-UE 距离的对数成线性关系, 距离越大, 单位距离带来的衰落越小, 所以即使增加的是距离较远的基站, 带来的路径

衰落恶化也不会特别明显, 定位精度因此可以得到保证, 甚至有所提高.

在基站数量相同时, 墙面衰落对定位精度的影响远远大于路径衰落, 这种衰落在 5G 毫米波技术中尤其明显, 毫米波的波长越小, 墙面衰落的影响会越大^[16], 所以在实际情况下, 为了保证 5G 通信和定位功能的正常使用, 室内的 5G 基站也应保持足够的发射功率(表 4 即为较大的载噪比(70 dB)下的仿真结果, 或者在每个房间都布设一定数目的基站.

另外, 由于室内存在诸多钢筋等复杂结构, 此时 5G 毫米波传播受折射反射的影响较大, 其路径损耗系数通常会大于室外, 所以在仿真中分别取 $\alpha=2$ (室内) 和 $\alpha=1$ (室外). 此条件下的结果表明, 即使室外基站距接收终端较远, 路径损耗较大, 但由于损耗系数较小且总基站数有所增加, 仍可表现出与室内密集基站场景下相当的定位性能, 部分情景甚至更优.

5 结 论

根据仿真结果, 在本文所述的 5G 定位场景中, 当室内(无伪距测量)基站数 ≥ 4 座、TODA 测量精度优于 1.4 m (即直射信号概率 ≥ 0.85 , 或 DOA 精度优于 3°) 时, 水平定位精度可达到 1.0 m 以下; 室内外交界处(伪距误差 2.5 m), 基站数 ≥ 4 座、可用卫星 ≥ 2 颗、TDOA 精度测量精度优于 2.8 m (即直射信号概率大于等于 0.79) 时, 水平定位精度可达到 2.0 m 以下. 室外基站数 ≥ 4 座、可用卫星数 ≥ 2 颗、伪距测量误差优于 1.5 m 、TDOA 测量精度优于 3.8 m (即直射信号概率 ≥ 0.77) 时, 水平定位精度可达到 2.0 m 以下. 在理想情况下, 即基站充足且呈几何分布均匀, 通过改善多径干扰效应, 当 DOA 测量精度达 0.3° 且 TDOA 测量精度为 0.21 m 时, 水平定位精度可达到 0.14 m .

参考文献:

[1] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821.

[2] 许扬胤, 杨元喜, 何海波, 等. 北斗全球卫星导航系统试验卫星测距信号质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1214-1221.

[3] XIE F, LIU J, LI R. Adaptive robust ultra-tightly coupled global navigation satellite system/inertial navigation system based on global positioning system/BeiDou vector tracking loops[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2014, 8(7): 815-827.

- [4] 莫善会. GNSS/单目视觉/惯性传感器组合导航算法研究[C]//卫星导航定位与北斗系统应用 2018——深化北斗应用 促进产业发展. 北京:中国卫星导航定位协会, 2018:174-179.
- [5] ADEBOMEHIN A, WALKER S. Enhanced satellite positioning methods using ultrawideband D2D-based localization for ultra-dense 5G wireless setting [C] // International Conference on Space Weather and Satellite Application. Selanger: IOP, 2019: 1-6.
- [6] 陈诗军,王慧强,陈大伟,等. 面向 5G 的高精度融合定位及关键技术研究[EB/OL]. [2019-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.201805.24.1117.002.html>.
- [7] 郭树人,刘成,高为广,等. 卫星导航增强系统建设与发展[J]. 全球定位系统, 2019, 44(2): 1-12.
- [8] 赵亚东,尉志青,冯志勇,等. 卫星导航与 5G 移动通信融合架构与关键技术[J]. 电信工程技术与标准化, 2017, 30(1): 48-53.
- [9] RASTORGUEVA-FOI E, COSTA M, KOIVISTO M, et al. User positioning in mmw 5G networks using beam-RSRP measurements and Kalman filtering[C]// International Conference on Information Fusion. Cambridge: IEEE, 2018: 1-7.
- [10] 欧阳俊,陈诗军,黄晓明,等. 面向 5G 移动通信网的高精度定位技术分析[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 13-17.
- [11] DEL RERAL-ROSADO J A, LOPEZ-SALCEDO J A, SECO-GRANADOS G, et al. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE[C]// International Conference on Localization and GNSS. Starnberg: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] XU W, HUANG M, ZHU C, et al. Maximum likelihood TOA and OTDOA estimation with first arriving path detection for 3GPP LTE system[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27(3): 339-356.
- [13] FISCHER S. Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE [EB/OL]. [2019-10-01]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/otdoa-positioning-in-3gpp-lte.pdf>.
- [14] DEL PERAL-ROSADO J A, CASTILLO R E, MIGUEZ-SANCHEZ J, et al. Performance analysis of hybrid GNSS and LTE localization in urban scenarios[C]// 8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signal and Signal Processing. Noordwijk: IEEE 2016: 1-6.
- [15] 3GPP TS 38. 855. Study on NR positioning support 3 [EB/OL]. [2019-09-28]. <https://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>.
- [16] 3GPP TR 36. 873. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; study on 3D channel model for LTE[EB/OL]. [2015-10-01]. <https://www.3gpp.org/DynaReport/36-series.htm>.
- [17] 谢钢. GPS 原理与接收机[M]. 北京:电子工业出版社, 2009: 91.
- [18] 吕婷,曹亘,张涛,等. 5G 基站架构及部署策略[J]. 移动通信, 2018, 42(11): 72-77, 83.
- [19] 张贻华,陈志强,叶家骏. 40 GHz 毫米波室内传播损耗分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 44-46, 53.

Positioning accuracy analysis for 5G/GNSS fusion system

PENG Youzhi¹, TIAN Ye², ZHANG Weicheng², PENG Ao^{2*}, HONG Xuemin²

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;

2. School of Informatics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Global navigation satellite system (GNSS) is characterized with low pseudo-range measurement accuracy, poor positioning accuracy and even inability to locate in the environment with complex multipath interference such as indoor or indoor/outdoor junction. The fifth-generation communication system (5G) has been greatly developed in China. For its high density of base station, strong indoor and outdoor coverage, large communication bandwidth, it has the potential to accurately measure the relative distance between the base station and the user terminal. Integrating 5G and GNSS signals to realized positioning can effectively solve the problems of insufficient GNSS coverage and low positioning accuracy of urban canyon. In this paper, based on quantitative analyses of multipath interference in different scenarios, Monte Carlo simulation is used to demonstrate upper and lower limits of horizontal positioning performance of 5G/GNSS fusion systems under several typical multipath interference conditions. Simulation results show that the positioning accuracy can reach sub-meter levels by using 5G in-band resources in indoor or indoor-outdoor boundary multipath severe environments.

Keywords: global navigation satellite system (GNSS); 5G; multipath; fusion positioning