

NLOS环境下5G毫米波定位方法

5G Millimeter Wave Positioning Method in NLOS Environment

张千坤¹,陈任翔¹,钟志刚¹,周国栋²(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048;2. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007)

Zhang Qiankun¹,Chen Renxiang¹,Zhong Zhigang¹,Zhou Guodong²(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

摘要:

5G毫米波在可视(LOS)环境下理论上可以实现亚米级以内的定位精度,但是在非可视(NLOS)环境下无法定位,首先研究了基于5G毫米波大规模MIMO混合波束赋形的信道估计方法,并采用正交匹配追踪(OMP)算法对到达角(AOA)、到达时间(TOA)以及出射角(AOD)进行估计,其次提出一种在NLOS环境下的5G毫米波定位方法,利用估计的AOA、TOA、AOD信息确定终端用户的位置并对散射体的位置进行估计。

关键词:

信道估计;正交匹配追踪;非可视环境;毫米波定位;混合波束赋形

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.10.016

文章编号:1007-3043(2022)10-0083-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In theory, 5G millimeter waves can achieve positioning accuracy within the sub meter level in the LOS environment, but it can not position in the NLOS environment. It first studies the channel estimation method based on 5G millimeter wave massive MIMO hybrid beamforming, and uses the OMP algorithm to estimate AOA, TOA and AOD. A 5G millimeter wave positioning method in NLOS environment is put forward, which uses the estimated AOA, TOA and AOD information to determine the position of the end user and roughly estimate the position of the obstacle.

Keywords:

Channel estimation; OMP; NLOS; Millimeter wave positioning; Hybrid beamforming

引用格式:张千坤,陈任翔,钟志刚,等. NLOS环境下5G毫米波定位方法[J]. 邮电设计技术,2022(10):83-87.

1 概述

随着智能设备与无线网络的普及,人们对于场景感知、环境智能等应用需要在不断增加,同时对用户位置信息精度的要求也在不断提高。目前在室内定位方面,无线网^[1-3]、蓝牙^[4]、超宽带(UWB)^[5]等的定位技术开始普及,但是对于运营商来说,这些技术需要专门建立一个定位网络,成本比较高。针对室内定位的特点,目前室内定位的方法主要围绕提高定位精

度、降低定位成本、提高系统定位鲁棒性(适应复杂多变的室内环境)等方面展开,如何利用运营商自有的5G网络进行高精度定位一直是需要攻克的难题。目前在5G定位^[6-7]方面使用比较多的是UTDOA(Uplink Time Difference Of Arrival)定位技术,这种定位技术需要基站之间同步,实现起来比较困难,而且需要终端同时接收到3个射频拉远单元(PRRU)才能实现定位,在NLOS环境下无法进行定位,这种定位条件在室内环境下很难达到。5G毫米波^[8]波束窄、方向性好,有极高的空间分辨力,信号传输周期小,时间精度高,基于此,本文研究了在NLOS环境下的5G毫米波室内定

收稿日期:2022-09-02

位方法, 首选进行混合波束赋形下的信道估计, 其次采用 OMP 算法对 AOA、TOA 以及 AOD 进行估计, 最后在室内环境下建立 NLOS 环境模型, 并对终端进行定位。

2 大规模 MIMO 信道估计

2.1 毫米波信道模型

毫米波大规模 MIMO 为了减少硬件成本, 降低功耗, 采用数模混合波束成形架构^[9], 如图 1 所示。

假设基站端和用户端分别有 N_{BS} 和 N_{MS} 根天线, 同时有 N_{RF}^{BS} 和 N_{RF}^{MS} 根 RF 链路, 数据流 N_s 需要满足 $N_s \leq N_{RF}^{BS} \leq N_{BS}$ 以及 $N_s \leq N_{RF}^{MS} \leq N_{MS}$, 上行链路基站端接收的信号可以表示为:

$$y = W^H H F s + W^H n \quad (1)$$

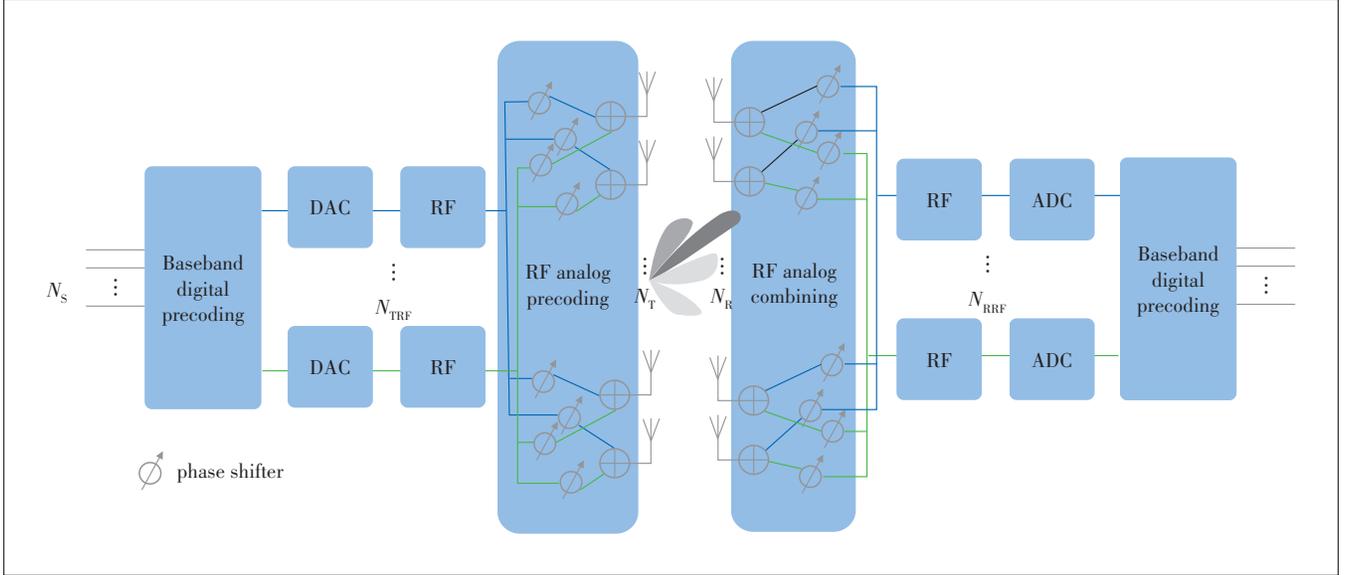


图 1 混合波束赋形架构

式中:

$(\cdot)^H$ ——共轭转置

W 、 F ——混合波束赋形生成器, $W = W_{RF} W_{BB}$ 以及

$F = F_{RF} F_{BB}$

W_{RF} 和 F_{RF} ——模拟波束形成器

W_{BB} 和 F_{BB} ——数字波束形成器

H ——上行信道矩阵 $F = F_{RF} F_{BB}$ 阵

s ——用户发射的基带信号

n ——复高斯白噪声 AWGN, $n \in CN(0, \sigma_n^2 I)$

由于毫米波在非直射路径(NLOS)环境下路损严重, 接收机只能接收到有限个显著散射体的多径信号, 假设有 L 个路径信道矩阵可以写为:

$$H = \sqrt{\frac{N_{BS} N_{MS}}{L}} \sum_{i=1}^L \alpha_i a_{BS}(\theta_i) a_{MS}^H(\varphi_i) \quad (2)$$

式中:

α_i ——信道的复增益, $\alpha_i \in CN(0, \sigma_{\alpha}^2 I)$

θ_i 和 φ_i ——到达角和离开角

$a_{BS}(\theta_i)$ 和 $a_{MS}(\varphi_i)$ ——导向矢量, 可以表示为:

$$a_{BS}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{N_{BS}}} \left[1, e^{2\pi D \sin(\theta_i)}, \dots, e^{2\pi(N_{BS}-1)D \sin(\theta_i)} \right]^T \quad (3)$$

$$a_{MS}(\varphi_i) = \frac{1}{\sqrt{N_{MS}}} \left[1, e^{2\pi D \sin(\varphi_i)}, \dots, e^{2\pi(N_{MS}-1)D \sin(\varphi_i)} \right]^T \quad (4)$$

其中 $D = d/\lambda$, 属于相邻天线之间的归一化间隔, λ 是信号波长, d 为相邻天线之间的间隔, 因此毫米波信道 H 可以写为 $H = A_{BS} D A_{MS}^H$, 其中 $A_{BS} = [a_{BS}(\theta_1), \dots, a_{BS}(\theta_L)]$, $A_{MS} = [a_{MS}(\varphi_1), \dots, a_{MS}(\varphi_L)]$, 对角矩阵 D 可以写为 $D = \text{diag}(d)$, $d = \sqrt{N_{BS} N_{MS} / L} [\alpha_1, \dots, \alpha_L]$ 。

2.2 毫米波信道估计

利用 OMP^[10] 对 AOA、AOD 和 TOA 进行估计, 首先构造字典矩阵, 利用字典矩阵对信号参数进行估计, 因此字典矩阵中应该包括 AOA、AOD、TOA 3 个参数。假设天线阵列天线数为 M , 子载波数为 N , AOA、AOD、TOA 3 个参数的搜索范围和搜索步长确定, AOA 的搜索范围和搜索步长确定的搜索角度值组成向量 searching_aoa, AOD 的搜索范围和搜索步长确定的搜

索角度值组成向量 searching_aod , TOA 的搜索范围和搜索步长确定的搜索角度值组成向量 searching_toa , 因此, 由 AOA 的第 i_{aoa} [$1 \leq i_{\text{aoa}} \leq \text{length}(\text{searching_aoa})$] 个搜索角度构造的原子为:

$$\Theta_{\text{aoa}}(i_{\text{aoa}}) = [1 \ e^{-j2\pi f d \sin[\text{searching_aoa}(i_{\text{aoa}})]/c} \dots e^{-j2\pi f(M-1)d \sin[\text{searching_aoa}(i_{\text{aoa}})]/c}]^T \quad (5)$$

其中, $\Theta_{\text{aoa}}(i_{\text{aoa}})$ 的维度为 $M \times \text{length}(\text{searching_aoa})$, f 为信号频点, d 为天线之间的间距, c 为光速。

由 AOA 的第 i_{aod} [$1 \leq i_{\text{aod}} \leq \text{length}(\text{searching_aod})$] 个搜索角度构造的原子为:

$$\Theta_{\text{aod}}(i_{\text{aod}}) = [1 \ e^{-j2\pi f d \sin[\text{searching_aod}(i_{\text{aod}})]/c} \dots e^{-j2\pi f(M-1)d \sin[\text{searching_aod}(i_{\text{aod}})]/c}]^T \quad (6)$$

其中, $\Theta_{\text{aod}}(i_{\text{aod}})$ 的维度为 $M \times \text{length}(\text{searching_aod})$, f 为信号频点, d 为天线之间的间距, c 为光速。

由 AOA 的第 i_{toa} [$1 \leq i_{\text{toa}} \leq \text{length}(\text{searching_toa})$] 个搜索角度构造的原子为:

$$\Theta_{\text{toa}}(i_{\text{toa}}) = [1 \ e^{-j2\pi f d \sin[\text{searching_toa}(i_{\text{toa}})]/c} \dots e^{-j2\pi f(M-1)d \sin[\text{searching_toa}(i_{\text{toa}})]/c}]^T \quad (7)$$

其中, $\Theta_{\text{toa}}(i_{\text{toa}})$ 的维度为 $M \times \text{length}(\text{searching_toa})$, f 为信号频点, d 为天线之间的间距, c 为光速。

因此, 由第 i_{aoa} 个搜索角度、 i_{aod} 个搜索角度和第 i_{toa} 个搜索时延构造的字典矩阵为:

$$\Theta(i_{\text{aoa}}; i_{\text{aod}}; i_{\text{toa}}) = \Theta_{\text{aoa}}(i_{\text{aoa}}) \otimes \Theta_{\text{aod}}(i_{\text{aod}}) \otimes \Theta_{\text{toa}}(i_{\text{toa}}) \quad (8)$$

其中, Θ 的维度为 $(MN) \times [\text{length}(\text{searching_toa}) \times \text{length}(\text{searching_toa})]$ 。假设接收阵列接收到的接收信号为 y , 初始化残差 $r_0 = y$, 索引集 $\Lambda_0 = \emptyset$, 将字典矩阵中的每一个原子, 即字典矩阵的每一列分别与残差进行内积运算, 找到字典矩阵中与残差的投影系数最大的原子, 并将该原子从字典矩阵中删掉。然后更新残差值 $r_t = y - \Theta_t \hat{x}_t$, $t = t + 1$ 。直到满足迭代终止条件 $t > K$, 此时, K 表示待估计的信源个数。因此待估计的信号的 AOA、AOD 和 TOA 3 个参数就等于依次找出的字典矩阵中与残差的投影系数最大的原子对应的 AOA、AOD 和 TOA。

3 毫米波 NLOS 环境室内定位

3.1 模拟 LOS 环境虚拟基站

NLOS 环境如图 2 所示, 由于基站与用户之间受干扰源遮挡, 不存在直射路径, 信号经过散射体的反射、

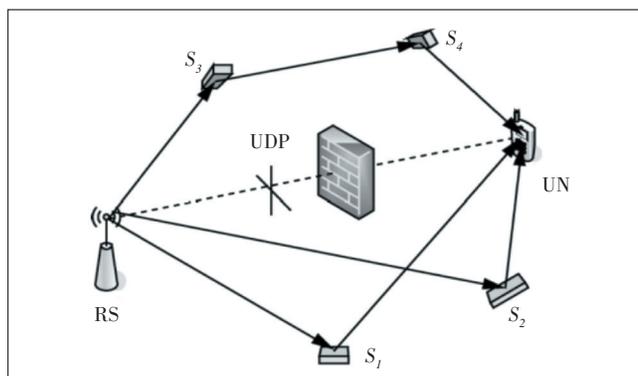


图2 NLOS 环境

折射将信号传送到用户。

为了方便计算, 本文将 AOA、AOD、TOA 的数学公式表示为:

TOA: $\tau_l = \|x_{s,l} - x_{\text{BS}}\|/C + \|x_{s,l} - x\|/C + B$, 其中 B 是时钟偏移误差, $x_{s,l}$ 为散射体的位置, $x_{s,l} = [x_{s,l}, y_{s,l}, z_{s,l}]^T$, x_{BS} 为基站的位置, $x_{\text{BS}} = [x_{\text{BS}}, y_{\text{BS}}, z_{\text{BS}}]^T$

AOA 方位角: $\theta_l^{\text{az}} = \pi + \arctan 2(y_{s,l} - y, x_{s,l} - x) - \alpha$, 其中 α 为终端航向偏差。

AOA 俯仰角: $\theta_l^{\text{el}} = \arcsin[(z_{s,l} - z)/\|x_{s,l} - x\|]$

AOD 方位角: $\phi_l^{\text{az}} = \arctan 2(y_{s,l}, x_{s,l})$

AOD 俯仰角: $\phi_l^{\text{el}} = \arcsin[(z_{s,l} - z_{\text{BS}})/\|x_{s,l} - x_{\text{BS}}\|]$

根据空间几何关系, 利用 AOD、时钟偏移量 B 、以及基站的位置 x_{BS} , 飞行时间 τ_l 可以确定一个点 s_l , 表示为:

$$s_l = x_{\text{BS}} + \rho_l \begin{bmatrix} \cos \theta_l^{\text{el}} \cos \theta_l^{\text{az}} \\ \cos \theta_l^{\text{el}} \sin \theta_l^{\text{az}} \\ \sin \theta_l^{\text{el}} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \rho_l = \tau_l - B, \text{ 表示}$$

的是信号从基站到达用户的真正时间。散射体 $x_{s,l}$ 在基站 x_{BS} 与 s_l 2 点之间的线段上。

根据 AOA θ_l 以及 s_l 的位置可以确定另外一个点 \tilde{s}_l , 表示为:

$$\tilde{s}_l = s_l + \rho_l \begin{bmatrix} \cos \theta_l^{\text{el}} \cos(\theta_l^{\text{az}} + \alpha - \pi) \\ \cos \theta_l^{\text{el}} \sin(\theta_l^{\text{az}} + \alpha - \pi) \\ \sin(-\theta_l^{\text{el}}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

用户的位置 x 即在点 s_l 和 \tilde{s}_l 之间的线段上。则点 s_l 可以表示为和用户处于 LOS 环境的虚拟基站。

3.2 多虚拟基站联合定位

根据参数 $[\phi_l, \theta_l, \alpha, B]$, 可以确定用户位置 x 所处的线段, 即点 s_l 和 \tilde{s}_l 之间的线段 l , 假设有 L 条路径, L 条路

径的交点即是用户 x 的位置。

为了避免噪声的干扰, 本文在同一个位置进行多次采样求平均值, 对每个采样点 $n = 1, 2, \dots, N_s$, 得到 s_l 和 \tilde{s}_l 之间的线段 l 后, 可以计算虚拟基站与用户之间的 AOA, 表示为 γ , 则可利用虚拟基站与用户通过联合多个虚拟基站的 AOA 信息对目标进行定位, 这里假设有 R 个虚拟基站, 利用最小二乘法^[11-12] 得到目标的位置为:

$$x^{(n)} = \arg \min_p \sum_{i=1}^R (\hat{\gamma}_i - \gamma_i)^2 \quad (10)$$

其中 $x^{(n)}$ 表示的是第 n 个采样点得到的 UE 的位置, $\hat{\gamma}_i$ 表示第 i 个虚拟基站到位置 p 的角度, γ_i 为位置 p 估计的角度。

将到任意 2 条路径线段 $l^{(n)}$ 和 $l'^{(n)}$ 的距离之和 $d_{l,l'}$ 最小的点表示为 $x_{l,l'}^{(n)}$, 其中 $l \neq l'$, 如图 3 所示, 如果 (α, B) 计算正确的话, $x_{l,l'}^{(n)}$ 就集中在真实的 UE 位置附近。

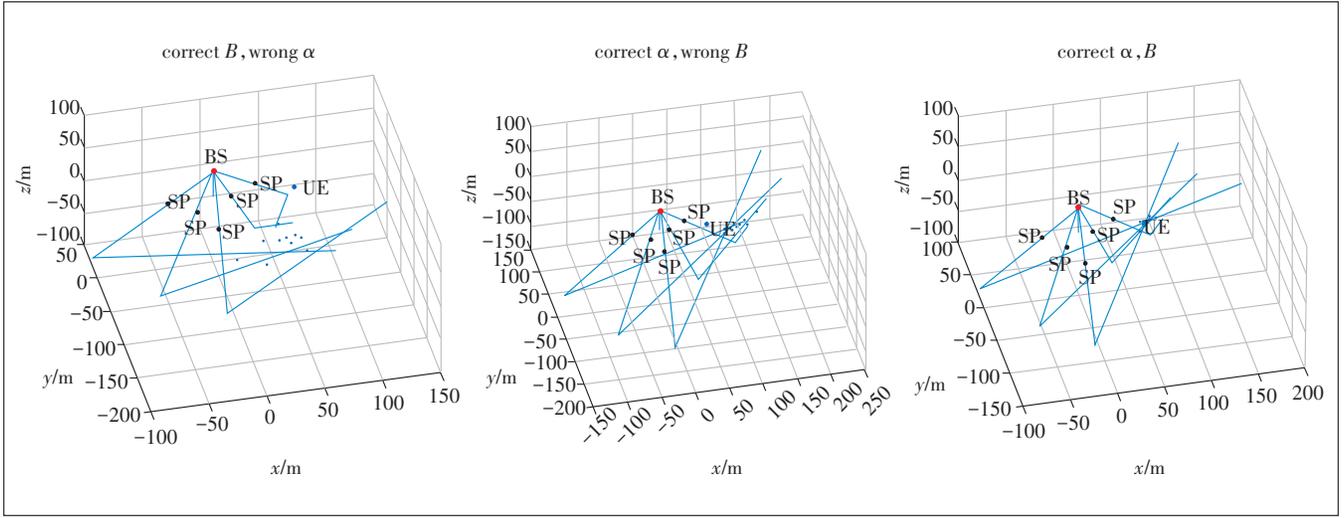


图3 不同 $[\alpha, B]$ 对应的 UE 的位置

将 (α, B) 的误差表示为:

$$\varepsilon(\alpha, B) = \frac{2}{N_s [L(L-1)]} \sum_{n=1}^{N_s} \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L d_{l,l'}^{(n)} \quad (11)$$

计算终端 UE 位置的期望和方差:

$$\mu_{UE}(\alpha, B) = \frac{2}{N_s [L(L-1)]} \sum_{n=1}^{N_s} \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L x_{l,l'}^{(n)} \quad (12)$$

$$\Sigma_{UE}(\alpha, B) = \frac{2}{N_s [L(L-1)]} \times$$

$$\sum_{n=1}^{N_s} \sum_{l=1}^L \sum_{l'=1}^L [x_{l,l'}^{(n)} - \mu_{UE}(\alpha, B)] [x_{l,l'}^{(n)} - \mu_{UE}(\alpha, B)]^T \quad (13)$$

则最优的 (α, B) 可以表示为:

$$(\alpha^*, B^*) = \arg \min_{(\alpha, B)} (\varepsilon(\alpha, B)) \quad (14)$$

在得到最优 (α^*, B^*) 以后可以解算出准确的用户位置, 再结合 AOA 即可以得到散射体 SP 的位置。

4 仿真分析

本文假定一种场景, 有 5 个散射体, TOA 的标准差为 10 cm (换算为距离), AOA 和 AOD 的标准差为 0.01

弧度, (α, B) 的值设为 $\alpha = \pi/3, B = 20$ m, 基站的位置已知, AOA、AOD、TOA 可以通过信道估计得到, 采样点的数量设定为 10, 首先对 (α, B) 的最优值 (α^*, B^*) 进行估计, 结果如图 4 所示, 其中蓝色的点表示的为真实的 (α, B) , 红色的点表示的是估计的 (α^*, B^*) 。

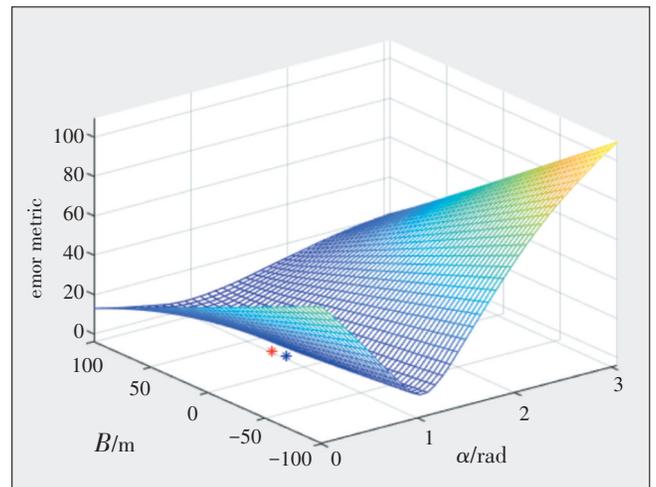


图4 仿真结果——真实的 $[\alpha, B]$ 以及估计的 $[\alpha^*, B^*]$

在得到 (α^*, B^*) 以后,即可对UE的位置以及散射

体的位置SP进行估计,如图5所示。

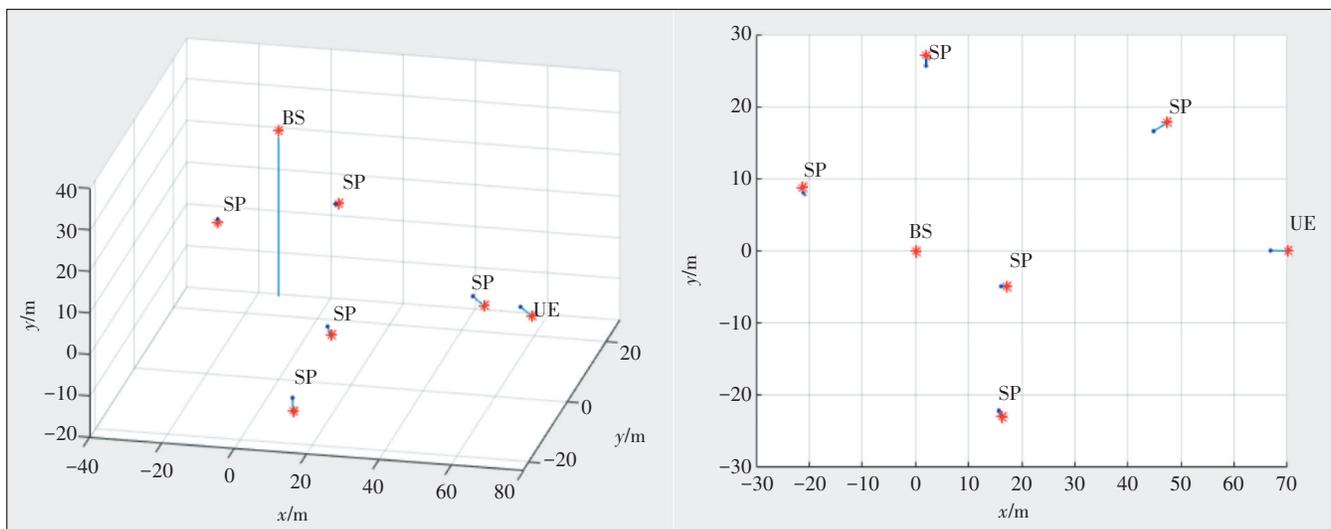


图5 仿真结果——UE的位置以及SP的位置

其中红色的点为真实的位置,蓝色的点为估计出的位置,由于 (α, B) 是未知的,因此其准确性对UE的位置以及SP的位置有很大的影响,本文对 (α, B) 进行粗略的估计,主要解决的是在NLOS环境下无法定位的问题。

5 结论

本文提出一种算法复杂度低的5G毫米波NLOS环境下的室内定位方法,在用户位置、时钟误差、终端航向偏差未知的情况下,通过信道估计得到的AOA、AOD、TOA信息,构造虚拟基站,规避严重NLOS场景下障碍物的遮挡现象,并根据空间位置关系推导出UE的位置以及散射体SP的位置,仿真结果表明,该算法可以估计出用户的位置以及散射体SP的位置,解决在NLOS环境下无法定位的问题。

参考文献:

[1] 田增山,张千坤,周牧,等.基于CFR的角度/距离联合单站定位[J].电子科技大学学报,2019,48(5):698-705.
 [2] 田增山,张千坤,周牧,等.基于CFR虚拟阵列天线的AOA室内定位[J].电子学报,2018,46(6):1468-1474.
 [3] 何维,岳紫颖,周牧,等.基于载波相位差值的室内Wi-Fi定位方法[J].北京邮电大学学报,2021,44(4):19-25.
 [4] 周牧,王斌,田增山,等.室内BLE/MEMS跨楼层融合定位算法[J].通信学报,2017,38(5):1-10.
 [5] 何成文,袁运斌,谭冰峰.一种基于UWB TDOA定位模式的迭代最小二乘算法[J].大地测量与地球动力学,2021,41(8):806-

809.
 [6] 杨旺强,张胜钦,荆曦.5G融合定位技术在引航员便携终端的应用[J].船舶物资与市场,2021,29(7):3-6.
 [7] 肖峰,宋喆女,姜闻.基于5G基站定位服务的应用探讨[J].电子测试,2021(12):59-60,81.
 [8] 徐霞艳.5G毫米波关键特性分析与应用建议[J].信息通信技术与政策,2021,47(7):87-92.
 [9] 李伟斌,张学良,余炜平.基于混合波束赋形架构的射频系统方案设计[J].自动化与仪器仪表,2020(12):190-193,197.
 [10] 雷芳,方泽圣,徐勇军,等.一种改进的压缩采样匹配追踪算法[J].光通信研究,2021(6):72-76.
 [11] 陈志强,鲍鹏宇,宁云转.卫星定位轨迹最小二乘拟合适应性分析[J].铁路通信信号工程技术,2020,17(4):21-24.
 [12] 谭志,梁丽文,夏磊.最小二乘拟合的蒙特卡罗移动定位算法研究[J].现代电子技术,2018,41(15):10-15.
 [13] 王洁,王洪玉,高庆华,等.一种适用于移动传感器网络的增强型蒙特卡罗定位跟踪算法[J].电子与信息学报,2010,32(4):864-868.
 [14] 宋宇,孙富春,李庆玲.移动机器人的改进无迹粒子滤波蒙特卡罗定位算法[J].自动化学报,2010(6):7.
 [15] 曹树林.基于拓扑结构变化趋势的MCL优化算法[D].广州:华南师范大学,2015.

作者简介:

张千坤,助理工程师,硕士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;陈任翔,高级工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;钟志刚,中讯邮电咨询设计院有限公司总工程师,教授级高级工程师,先后在微波通信、卫星通信和移动通信领域开展了工程咨询、规划、设计和研究等工作;周国栋,高级工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作。