

一种基于RIS的宽带毫米波SISO定位方法

孙俊倡^① 谷荣妍^① 马帅^② 柴进晋^③ 李世银^{*①}

^①(中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116)

^②(鹏城实验室 深圳 518055)

^③(空军工程大学防空反导学院 西安 710038)

摘要: 针对毫米波定位过程中空间宽带效应产生的影响, 该文基于可重构智能超表面(RIS)和单输入单输出(SISO)毫米波系统提出一种新颖的3维(3D)定位估计方法。首先, 通过设计RIS相位, 利用快速傅里叶逆变换(IFFT)粗略地估计直射路径的视距(LoS)时延、RIS路径的虚拟视距(VLoS)时延以及RIS与用户之间的出发角(AoD)等信道参数。然后, 利用拟牛顿法修正上述参数进而估计用户的位置坐标。通过仿真模拟对比了所提宽带估计方法和传统的窄带估计方法的定位性能, 结果表明, 通过考虑空间宽带效应, 带宽为240 MHz时定位精度大约可提高10%, 随着带宽增大超过800 MHz时定位性能可提高超过20%。

关键词: 毫米波定位; 空间宽带效应; 可重构智能超表面; 单站定位

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1240-07

DOI: [10.11999/JEIT230401](https://doi.org/10.11999/JEIT230401)

An RIS assisted Wideband Millimeter Wave SISO-Based Positioning Method

SUN Junchang^① GU Rongyan^① MA Shuai^② CHAI Jinjin^③ LI Shiyin^①

^①(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

^②(Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China)

^③(School of Air Defence and Antimissile, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: For the effects of spatial-wideband effects during millimeter wave positioning, a novel 3-Dimensional (3D) positioning estimation method based on Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) and Single Input Single Output (SISO) millimeter wave system is proposed. First, by designing the RIS phase profiles, the channel parameters of the direct Line-of-Sight (LoS) delay, the RIS-aided Virtual Line-of-Sight (VLoS) delay, and the Angle-of-Departure (AoD) between the RIS and the user are coarsely estimated based on the Inverse Fast Fourier Transform (IFFT). Then, the quasi-Newton method is used to refine these parameters and to estimate the location of the user. Simulations are conducted to compare the positioning performance of the proposed spatial-wideband estimation method with that of the traditional narrowband estimation method. The results show that by taking into account the spatial-wideband effects, the positioning accuracy can be improved by approximately 10% for a bandwidth of 480 MHz and by more than 20% as the bandwidth increases beyond 800 MHz.

Key words: Millimeter wave positioning; Spatial-wideband effect; Reconfigurable Intelligent Surface (RIS); Single station positioning

收稿日期: 2023-05-11; 改回日期: 2023-07-12; 网络出版: 2023-07-20

*通信作者: 李世银 lishiyin@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771474, 62371451)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771474, 62371451)

1 引言

随着无线服务系统的高速发展,用户的位置信息在众多新型应用中起着至关重要的作用,精确的位置信息是高质量无线通信的保障。传统的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)等技术缺点之一在于无法在复杂的、存在遮挡的环境中工作,如室内场景、城市峡谷以及地下隧道等环境,为此,蜂窝定位网络成为一种替代方法,其根据基站和用户之间交换的无线电信号进而估计用户的位置。在第四代(Fourth Generation, 4G)无线通信系统中,常见的定位方法是通过计算用户和多个基站之间的到达时间(Time of Arrival, ToA)或到达时间差(Time Difference of Arrival, TDoA)信息来估计位置^[1]。随着第五代(Fifth Generation, 5G)毫米波以及大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术的广泛应用,除了基于时延估计结果外,毫米波还可以凭借高时间分辨率和高空间分辨率的优势,通过利用基站和用户之间的出发角(Angle of Departure, AoD)和到达角(Angle of Arrival, AoA)等角度信息进行定位^[2],即可以利用单个基站实现用户的位置估计。

单站定位技术,即通过一个发射基站,同时利用时延信息和角度信息估计目标的位置。文献^[3]考虑室内单基站场景,结合用户运动特征、视距(Line of Sight, LoS)信息和一阶反射路径的AoA-ToA信息,提出一种改进最小均方算法细化多径AoA估计,并提出一种改进的多径无迹卡尔曼滤波器追踪用户位置。文献^[4]基于毫米波信道的稀疏性,提出了估计AoD, AoA和ToA的方法,并且利用迭代吉布斯采样方法获得用户位置和方向的联合估计。文献^[5]通过联合波束选择以及基站的ToA和AoA信息,在上行链路中追踪估计用户位置,然后通过接收端的联合波束选择和跟踪,使用位置信息获得用户旋转角度,在数据传输阶段执行基站和用户的波束选择以及ToA和AoA估计。文献^[6]根据来自单个基站的毫米波信号,提出了一种位置和旋转角估计算法,该算法基于多个测量向量匹配进行粗估计,然后基于空间交替广义期望(Space-alternating Generalized Expectation, SAGE)最大化算法细化估计用户位置和角度。

然而,上述研究工作忽略了非视距(Non Line of Sight, NLoS)环境的影响,现有的研究表明,毫米波传输受到NLoS的干扰较大^[7]。为此,文献^[8]在NLoS环境的影响下,利用最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计方法,研究了毫米波多

输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统的定位方法,并通过和LoS环境中的定位仿真结果对比,验证其所提算法的有效性。文献^[9]在室内定位场景中研究了毫米波MIMO定位方案,设计了一种新颖的信道压缩方法,降低了计算复杂度,提高了定位精度。文献^[10]考虑NLoS产生的多径效应,利用压缩感知的方法识别LoS和NLoS路径信号,并直接进行位置估计。文献^[11]通过利用多径效应和信号相位差,提出了一种基于相位比较的定位算法,克服了NLoS难题,并通过实测数据验证其定位效果。

随着可重构智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)的发展,针对毫米波信号传输NLoS遮挡问题有了新的解决思路^[12-14]。RIS也被称为智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS),被认为是一种用于通信和定位的有效辅助技术。RIS由大量无源元件组成,通过调整入射电磁信号的相移,以重新配置无线环境,为传输信号建立一个VLoS链路^[15-17],进而避免了NLoS环境对信号传输的影响。大量的研究工作表明,基于RIS辅助的定位策略和方法可以达到有效的定位效果。文献^[18]利用RIS和毫米波MIMO技术,同时考虑直射信号和RIS反射信号,通过优化RIS的相位实现高精度的定位。文献^[19]通过优化RIS的反射系数重新配置信道参数,用于区别来自多处反射的接收信号强度值,减少了相邻的接收信号强度干扰,提高了定位精度。针对RIS大量的发射单元所产生的定位算法复杂度高的难题,文献^[20]利用贝塞尔函数展开的方法,研究了一种低复杂度的空间窄带定位方法,在满足定位精度要求的前提下,大大降低了计算复杂度。此外,在直射链路和反射链路同时存在的情况下,接收端除了接收到直射路径的信号外,还可以额外接收到由RIS反射的信号,因此,基于RIS定位的另一个优势在于可以实现异步单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统的定位功能^[21,22]。文献^[21]基于RIS,利用快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)估计时延和角度,解决了毫米波SISO系统联合定位和同步问题。文献^[23]利用RIS提出一种上行近场区单站定位方案,通过压缩感知解决定位模型匹配问题,并通过优化RIS相位提高定位精度。文献^[24]基于多个RIS部署,利用ML估计方法估计AoA和AoD参数,然后利用迭代定位算法估计目标物位置,结果表明其定位方法可达到厘米级的定位精度。文献^[25]考虑RIS辅助的动态目标物场景,利用拟牛顿法同时估计速率、时延等参数,实现非时间同步正交频分复

用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统中的定位功能。

然而,上述针对毫米波定位的研究工作忽略了空间宽带效应的影响。空间宽带效应是指由于信号带宽内频率的变化从而导致的阵列响应变化^[25,26],进而导致远场区域信号传输的波束倾斜效应^[27]和近场区域信号传输的错焦效应^[28]。文献[29]在RIS辅助的大规模MIMO系统中,研究了考虑空间宽带效应的信道模型,并在此基础上提出了相应的信道估计算法,研究结果表明了空间宽带效应影响信道状态信息(Channel State Information, CSI)的估计和系统定位性能。文献[25]根据研究分析直接得出结论,在高带宽的毫米波定位系统中,空间宽带效应严重影响了定位估计器性能。因此,本文基于RIS辅助提出了一种考虑空间宽带效应的毫米波单站定位估计方法,主要的创新点如下所示:

(1) 考虑空间宽带效应的影响,设计了基于RIS辅助的异步毫米波SISO定位系统,并基于此系统提出了一种新颖的定位估计方法。首先,通过设计RIS的相位并利用快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)估计信道参数,主要包括时延参数和角度参数;然后,利用拟牛顿法修正这些参数,进而估计用户的位置信息。

(2) 简述了传统的忽略宽带效应的窄带定位估计器模型,并通过仿真,对比了所提基于空间宽带效应的定位估计方法和窄带定位估计方法的仿真结果,结果表明,相同仿真条件下所提估计方法能达到更高的定位精度,验证了本文所提定位估计方法的有效性。

2 系统模型

2.1 系统几何模型

本文考虑了一个RIS辅助的3维(3-Dimensional, 3D)非同步毫米波定位系统,包含一个单天线的发射基站、一个单天线的接收用户和一个RIS,如图1所示。其中,异步的定位系统具有未知的时钟偏差

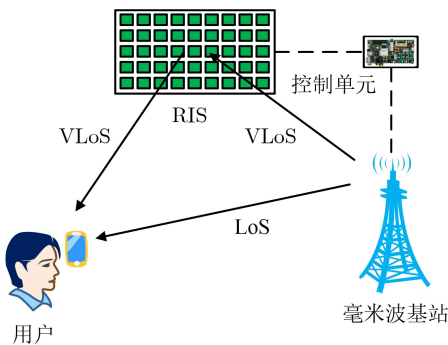


图1 RIS辅助的毫米波SISO定位系统模型

τ_{Δ} , 控制单元用于基站控制RIS相位的调节, RIS含有 $L = L_x \times L_y$ 个反射单元, 其中 L_x 和 L_y 分别表示RIS在水平和垂直方向的反射单元数量。基站和RIS的放置位置是已知的, 分别表示为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 和 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$, 且RIS的旋转矩阵表示为 $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 。用户的位置是未知的, 表示为 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$ 。基站和RIS之间的AoA以及RIS和用户之间的AoD分别表示为 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_{az}, \theta_{el}]^T$ 和 $\boldsymbol{\phi} = [\phi_{az}, \phi_{el}]^T$, 其中 $[\cdot]^T$ 表示转置, $(\cdot)_{az}$ 和 $(\cdot)_{el}$ 分别表示方位角和俯仰角。在RIS坐标系中, 第 l 个反射单元的位置表示为 $\mathbf{q}_l, l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。

2.2 信号传输模型

考虑一个含有 T 个符号和 N 个子载波的OFDM传输系统, 不失一般性, 假设所有的传输符号都为1。用户接收到的信号包括直接来自基站的LoS传输信号和来自RIS反射路径的VLoS传输信号, 在频率上进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后, 可以将接收信号 \mathbf{Y} 表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_b + \mathbf{Y}_r + \mathbf{W} \quad (1)$$

其中, \mathbf{W} 是均值为零、双边功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN), \mathbf{Y}_b 和 \mathbf{Y}_r 分别表示接收到的来自LoS和VLoS路径的信号, 表达式为

$$\mathbf{Y}_b = \rho_b \mathbf{D}(\tau_b) \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_r = \rho_r \mathbf{D}(\tau_r) \odot \mathbf{B}(\boldsymbol{\phi}) \quad (3)$$

其中, ρ_b 和 ρ_r 分别为LoS链路和VLoS链路的复信道增益, \odot 表示Hadamard乘积, $\tau_b = \|\mathbf{p} - \mathbf{u}\|/c + \tau_{\Delta}$ 和 $\tau_r = (\|\mathbf{r} - \mathbf{p}\| + \|\mathbf{r} - \mathbf{u}\|)/c + \tau_{\Delta}$ 表示相对应的时延, c 表示光速, $\mathbf{D}(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times T}$ 定义为时延矩阵, 表示为

$$\mathbf{D}(\tau) = \left[1, e^{-j2\pi\Delta_f\tau}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\Delta_f\tau} \right]^T \mathbf{1}_T^T \quad (4)$$

其中, Δ_f 表示子载波的间距, $\mathbf{1}_T \in \mathbb{R}^T$ 表示元素全为1的 T 维向量。

在式(3)中, RIS的相位调制矩阵 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\phi}) \in \mathbb{C}^{N \times T}$ 表示为

$$[\mathbf{B}(\boldsymbol{\phi})]_{n,t} = \mathbf{a}_n^T(\boldsymbol{\theta}) \text{diag}\{\gamma_t\} \mathbf{a}_n(\boldsymbol{\phi}) \quad (5)$$

其中, $\gamma_t \in \mathbb{C}^L$ 表示第 t 个传输符号对应的RIS相位的响应向量, $[\cdot]_{n,t}$ 表示矩阵中第 n 行第 t 列的元素, $\mathbf{a}_n(\boldsymbol{\phi}) \in \mathbb{C}^L, \boldsymbol{\phi} \in \{\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\phi}\}$ 为天线的响应向量, 表示为

$$[\mathbf{a}_n(\boldsymbol{\phi})]_l = e^{j\boldsymbol{\kappa}_n^T(\boldsymbol{\phi})\mathbf{q}_l} \quad (6)$$

其中, $[\cdot]_l$ 表示向量中第 l 个元素, 且

$$\boldsymbol{\kappa}_n(\boldsymbol{\phi}) = \frac{2\pi}{\lambda_n} [\sin(\varphi_{el}) \cos(\varphi_{az}), \sin(\varphi_{el}) \sin(\varphi_{az}), \cos(\varphi_{el})]^T \quad (7)$$

考虑空间宽带效应的影响, 式(7)中第 n 个子载波的波长 λ_n 表示为

$$\lambda_n = \frac{c}{f_c + n\Delta_f} \quad (8)$$

其中, f_c 为载波频率。

3 定位算法设计

3.1 RIS相位设计

假设RIS含有 K 个相位束, 每个束包含 T/K 个符号, 在设置RIS相位时, 需要保证 T/K 为整数。然后, 定义一个矩阵 $\Gamma_k \in \mathbb{C}^{L \times T/K}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, 表示为

$$\Gamma_k = \gamma_{kT/K} \mathbf{1}_{T/K}^T \quad (9)$$

为了估计信道时延参数, 首先设计RIS的相位, 具体地, 保证 K 为偶数, 并设置 $\Gamma_{2m-1} = -\Gamma_{2m}$, $m \in \{1, 2, \dots, K/2\}$, 定义

$$\mathbf{Y}_b \triangleq [\tilde{\mathbf{Y}}_{b,1}, \tilde{\mathbf{Y}}_{b,2}, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{b,K}] \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}_r \triangleq [\tilde{\mathbf{Y}}_{r,1}, \tilde{\mathbf{Y}}_{r,2}, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{r,K}] \quad (11)$$

其中, $\tilde{\mathbf{Y}}_{b,k}, \tilde{\mathbf{Y}}_{r,k} \in \mathbb{C}^{N \times T/K}$, 即可以得到

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{b,2m-1} - \tilde{\mathbf{Y}}_{b,2m} = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{r,2m-1} + \tilde{\mathbf{Y}}_{r,2m} = \mathbf{0} \quad (13)$$

3.2 LoS路径参数估计

将式(1)中的接收信号 \mathbf{Y} 改写为

$$\mathbf{Y} \triangleq [\tilde{\mathbf{Y}}_1, \tilde{\mathbf{Y}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_K] \quad (14)$$

其中, $\tilde{\mathbf{Y}}_k \in \mathbb{C}^{N \times T/K}$ 。定义一个矩阵 $\mathbf{Z}_b \in \mathbb{C}^{N \times T/2}$ 为

$$\mathbf{Z}_b \triangleq [\tilde{\mathbf{Y}}_1 + \tilde{\mathbf{Y}}_2, \tilde{\mathbf{Y}}_3 + \tilde{\mathbf{Y}}_4, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{K-1} + \tilde{\mathbf{Y}}_K] \quad (15)$$

然后, 利用IFFT的方法估计LoS时延, 即

$$\hat{k}_b = \arg \max_k \left\| [\mathcal{F}^{-1}(\mathbf{Z}_b)]_{k,:} \right\| \quad (16)$$

其中, $[\cdot]_{k,:}$ 表示矩阵中第 k 行的所有列, $\|\cdot\|$ 表示取 ℓ_2 范数, $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 表示 $N_F \times N$ 的IFFT操作, N_F 表示为IFFT的维度。

因此, LoS路径时延的粗值估计 $\tilde{\tau}_b$ 为

$$\tilde{\tau}_b = \frac{\hat{k}_b}{N_F \Delta_f} \quad (17)$$

最后, 将粗值估计 $\tilde{\tau}_b$ 作为迭代初始点, 利用拟牛顿法获得更准确的估计值 $\hat{\tau}_b$, 该优化方法的目标函数为

$$f(\tau) = \min_{\tau} - \|\mathbf{d}^H(\tau) \mathbf{Z}_b\| \quad (18)$$

其中, $\mathbf{d}(\tau) = [\mathbf{D}(\tau)]_{:,1}$ 。

基于LoS路径的时延估计值 $\hat{\tau}_b$, 可以估计LoS路径的复信道增益 $\hat{\rho}_b$ 为

$$\hat{\rho}_b = \frac{1}{NT} \mathbf{d}^H(\hat{\tau}_b) (\mathbf{Z}_b \mathbf{1}_{T/2}) \quad (19)$$

3.3 VLoS路径参数估计

类似地, 定义一个矩阵 $\mathbf{Z}_r \in \mathbb{C}^{N \times T/2}$ 为

$$\mathbf{Z}_r \triangleq [\tilde{\mathbf{Y}}_1 - \tilde{\mathbf{Y}}_2, \tilde{\mathbf{Y}}_3 - \tilde{\mathbf{Y}}_4, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{K-1} - \tilde{\mathbf{Y}}_K] \quad (20)$$

因此, VLoS路径时延的粗值估计 $\tilde{\tau}_r$ 可以表示为

$$\tilde{\tau}_r = \frac{\hat{k}_r}{N_F \Delta_f} \quad (21)$$

其中,

$$\hat{k}_r = \arg \max_k \left\| [\mathcal{F}^{-1}(\mathbf{Z}_r)]_{k,:} \right\| \quad (22)$$

将粗值估计 $\tilde{\tau}_r$ 作为迭代初始点, 利用拟牛顿法获得更准确的估计值 $\hat{\tau}_r$, 该优化方法的目标函数为

$$f(\tau) = \min_{\tau} - \|\mathbf{d}^H(\tau) \mathbf{Z}_r\| \quad (23)$$

然后, VLoS路径的复信道增益估计值 $\hat{\rho}_r$ 和RIS和用户之间的AoD粗值估计 $\tilde{\phi}$ 可以由式(24)得到

$$(\hat{\rho}_r, \tilde{\phi}) = \arg \min_{\phi, \rho_r} \|\mathbf{M} - \rho_r \mathbf{B}(\phi)\|_F^2 \quad (24)$$

其中, $\|\cdot\|_F$ 表示Frobenius范数, 且

$$\mathbf{M} \triangleq \mathbf{D}(-\hat{\tau}_r) \odot (\mathbf{Y} - \hat{\rho}_b \mathbf{D}(\hat{\tau}_b)) \quad (25)$$

式(24)的求解分为两步, 第1步估计复信道增益 $\hat{\rho}_r$, 即

$$\hat{\rho}_r = \frac{(\text{vec}(\mathbf{B}(\phi)))^H (\text{vec}(\mathbf{M}))}{\|\text{vec}(\mathbf{B}(\phi))\|^2} \quad (26)$$

其中, $\text{vec}(\cdot)$ 表示向量化。基于估计的 $\hat{\rho}_r$, 第2步估计AoD的粗值 $\tilde{\phi}$, 即

$$\tilde{\phi} = \arg \min_{\phi} \|\mathbf{M} - \hat{\rho}_r \mathbf{B}(\phi)\|_F^2 \quad (27)$$

最后, 将粗值估计 $\tilde{\phi}$ 作为迭代初始点, 利用拟牛顿法获得更准确的估计值 $\hat{\phi}$, 其目标函数为式(27)。

3.4 定位估计

基于估计的AoD值 $\hat{\phi}$, 可以计算得到

$$\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{R}^T \left[\sin(\hat{\phi}_{\text{el}}) \cos(\hat{\phi}_{\text{az}}), \sin(\hat{\phi}_{\text{el}}) \sin(\hat{\phi}_{\text{az}}), \cos(\hat{\phi}_{\text{el}}) \right]^T \quad (28)$$

基于3.2节和3.3节估计得到的信道参数, RIS和用户之间的距离 \hat{d} 可以由下式计算得到

$$\hat{d} = \arg \min_d |d + \|\mathbf{p} - \mathbf{r}\| - \|\mathbf{p} - d\hat{\mathbf{k}} - \mathbf{r}\| - \Delta_d| \quad (29)$$

其中, $|\cdot|$ 表示取绝对值, $\Delta_d = c(\hat{\tau}_r - \hat{\tau}_b)$ 。因此, 估计的用户位置 $\hat{\mathbf{u}}$ 表示为

$$\hat{\mathbf{u}} = \hat{d}\hat{\mathbf{k}} + \mathbf{r} \quad (30)$$

详细的定位估计算法如算法1所示。

4 仿真结果与分析

利用MATLAB仿真软件对所提定位算法进行仿真。针对式(27)中AoD的搜索, 方位角 ϕ_{az} 和俯仰角 ϕ_{el} 分别在 $[0, \pi)$ 和 $[0, \pi/2)$ 内进行有限搜索。为了验证本文所提定位算法有效性, 仿真同时对比了忽略宽带效应的定位方法, 即式(8)中 $\lambda_n \approx c/f_c$, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。仿真参数设置如表1所示。

图2展示了定位估计误差随接收信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的变化情况, 其中, RIS的相位服从 $[0, 2\pi)$ 区间内的均匀分布, 子载波数目 $N = 2000$, 带宽为 $N\Delta_f = 480$ MHz。结果表明,

算法1 基于RIS的毫米波SISO系统定位算法

- 输入: 接收信号 \mathbf{Y}
 输出: 用户估计位置 $\hat{\mathbf{u}}$
- 1: 定义矩阵 \mathbf{Z}_b 并利用IFFT估计 \hat{k}_b
 - 2: 粗估计LoS时延 $\hat{\tau}_b$
 - 3: 利用拟牛顿法准确估计LoS时延 $\hat{\tau}_b$
 - 4: 估计LoS复信道增益 $\hat{\rho}_b$
 - 5: 定义矩阵 \mathbf{Z}_r 并利用IFFT估计 \hat{k}_r
 - 6: 粗估计VLoS时延 $\hat{\tau}_r$
 - 7: 利用拟牛顿法准确估计VLoS时延 $\hat{\tau}_r$
 - 8: 粗估计RIS和用户之间的AoD $\hat{\phi}$
 - 9: 利用拟牛顿法准确估计AoD $\hat{\phi}$
 - 10: 估计RIS和用户之间的距离 \hat{d}
 - 11: 估计用户位置 $\hat{\mathbf{u}}$

表1 仿真参数设置

参数	值
频率 f_c	30 GHz
RIS尺寸大小 L	64×64
子载波间距 Δ_f	240 kHz
符号数目 T	120
RIS相位束数目 K	12
噪声PSD N_0	-174 dBm/Hz
噪声因子	8 dB
IFFT维度 N_F	4096
基站位置 \mathbf{p}	(2, 2, -7)
RIS位置 \mathbf{r}	(0, 0, 0)
用户位置 \mathbf{u}	$(-5/\sqrt{2}, 5/\sqrt{2}, -10)$

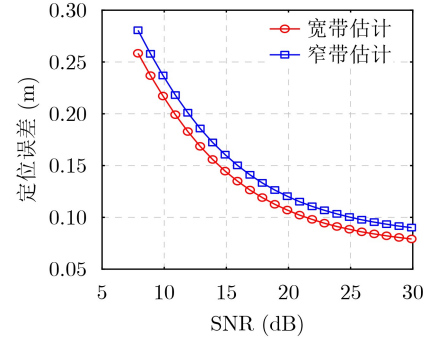


图2 定位估算误差随接收SNR的变化趋势

随着接收SNR的提高, 定位估计误差逐渐减小, 并且, 考虑空间宽带效应的定位估计方法的结果明显优于窄带估计方法, 总体而言, 所提方法的定位精度相较于传统方法大约可提高10%。该结果验证了本文所提定位估计方法的有效性。

图3研究了定位估计误差随着带宽的变化情况, 此时发射功率设置为10 dBm。结果表明, 定位估计误差随着带宽的增大而减少, 这表明在更高的带宽下可以获得更好的定位结果。此外, 所提出的考虑空间宽带效应的定位方法与窄带估计方法在较低带宽下的性能相近, 但随着带宽的增加前者的性能更好, 当带宽大于800 MHz时, 所提方法的定位性能相较于传统方法可提高超过20%。该结果表明本文所提的空间宽带估计方法在高带宽的情况下效果更加显著。

5 结论

本文在基于RIS辅助的异步毫米波SISO系统中提出了一个新颖的定位估计方法, 该方法考虑了毫米波的空间宽带效应, 通过设计RIS相位, 并利用IFFT和拟牛顿法估计信道参数和用户位置。此外, 通过模拟仿真比较了所提出的考虑空间宽带效应的定位方法与传统窄带定位方法的性能, 仿真结果验证了所提定位方法在3维定位中的有效性, 且在高带宽时定位的优势更加显著。

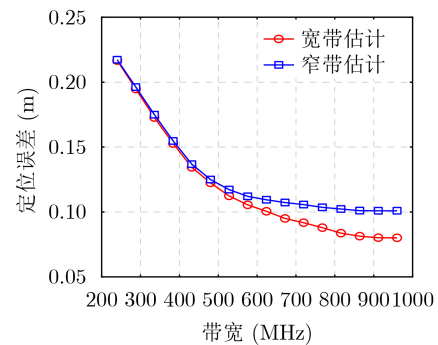


图3 定位估算误差随带宽的变化趋势

致谢 感谢巴塞罗那自治大学Gonzalo Seco-Granados教授, 查尔姆斯理工大学Henk Wymeersch教授和Kamran Keykhosravi对该论文的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] 王丹阳, 薛秀珍, 魏伟, 等. 基于多天线信号合成的优化到达时间差定位算法[J]. 光学技术, 2022, 48(5): 536–540. doi: [10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.05.004](https://doi.org/10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.05.004).
WANG Danyang, XUE Xiuzhen, WEI Wei, et al. Optimal the time difference of arrival location algorithm localization algorithm based on multi-antenna signal combining[J]. *Optical Technique*, 2022, 48(5): 536–540. doi: [10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.05.004](https://doi.org/10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.05.004).
- [2] 郭文飞, 齐书峰, 邓玥, 等. 融合TOA/AOD的5G/SINS紧组合导航定位算法分析[J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 367–374. doi: [10.11947/j.AGCS.2023.20210555](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2023.20210555).
GUO Wenfei, QI Shufeng, DENG Yue, et al. Analysis of 5G/SINS tightly coupled navigation algorithm with TOA/AOD[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(3): 367–374. doi: [10.11947/j.AGCS.2023.20210555](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2023.20210555).
- [3] PALACIOS J, BIELSA G, CASARI P, et al. Single- and multiple-access point indoor localization for millimeter-wave networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(3): 1927–1942. doi: [10.1109/TWC.2019.2899313](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2899313).
- [4] TALVITIE J, KOIVISTO M, LEVANEN T, et al. High-accuracy joint position and orientation estimation in sparse 5G mmWave channel[C]. 2019 IEEE International Conference on Communications, Shanghai, China, 2019: 1–7. doi: [10.1109/ICC.2019.8761910](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761910).
- [5] SHAHMANSOORI A, UGUEN B, DESTINO G, et al. Tracking position and orientation through millimeter wave lens MIMO in 5G systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(8): 1222–1226. doi: [10.1109/LSP.2019.2925969](https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2925969).
- [6] 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. doi: [10.1109/TWC.2017.2785788](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2785788).
- [7] MENDRZIK R, WYMEERSCH H, BAUCH G, et al. Harnessing NLOS components for position and orientation estimation in 5G millimeter wave MIMO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 93–107. doi: [10.1109/TWC.2018.2877615](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2877615).
- [8] FASCISTA A, COLUCCIA A, WYMEERSCH H, et al. Millimeter-wave downlink positioning with a single-antenna receiver[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4479–4490. doi: [10.1109/TWC.2019.2925618](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2925618).
- [9] LIN Zhipeng, LV Tiejun, and MATHIOPOULOS P T. 3-D indoor positioning for millimeter-wave massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(6): 2472–2486. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2797993](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2797993).
- [10] GARCIA N, WYMEERSCH H, LARSSON E G, et al. Direct localization for massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(10): 2475–2487. doi: [10.1109/TSP.2017.2666779](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2666779).
- [11] GUO Shisheng, ZHAO Qingsong, CUI Guolong, et al. Behind corner targets location using small aperture millimeter wave radar in NLOS urban environment[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 460–470. doi: [10.1109/JSTARS.2020.2963924](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2963924).
- [12] 崔铁军. 电磁超材料—从等效媒质到现场可编程系统[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
CUI Tiejun. Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
- [13] WU Qingqing and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394–5409. doi: [10.1109/TWC.2019.2936025](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025).
- [14] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: [10.1109/MCOM.001.1900107](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107).
- [15] 刘海霞, 易浩, 马向进, 等. 基于无源可重构智能超表面的室内无线信号覆盖增强[J]. 通信学报, 2022, 43(12): 32–44. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022229](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022229).
LIU Haixia, YI Hao, MA Xiangjin, et al. Indoor wireless signal coverage and enhancement based on passive reconfigurable intelligent metasurface[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(12): 32–44. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022229](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022229).
- [16] LIU Penglu, LI Yong, CHENG Wei, et al. Intelligent reflecting surface aided NOMA for millimeter-wave massive MIMO with lens antenna array[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 4419–4434. doi: [10.1109/TVT.2021.3067938](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3067938).
- [17] LIU Yang, SHI Qingjiang, WU Qingqing, et al. Joint node activation, beamforming and phase-shifting control in IoT sensor network assisted by reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9325–9340. doi: [10.1109/TWC.2022.3175740](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3175740).
- [18] ZHANG Jingwen, ZHENG Zhong, FEI Zesong, et al.

- Positioning with dual reconfigurable intelligent surfaces in millimeter-wave MIMO systems[C]. 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Chongqing, China, 2020: 800–805. doi: [10.1109/ICCC49849.2020.9238887](https://doi.org/10.1109/ICCC49849.2020.9238887).
- [19] ZHANG Haobo, ZHANG Hongliang, DI Boya, *et al.* Towards ubiquitous positioning by leveraging reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 284–288. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3023130](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3023130).
- [20] ABU-SHABAN Z, KEYKHOSRAVI K, KESKIN M F, *et al.* Near-field localization with a reconfigurable intelligent surface acting as lens[C]. 2021 IEEE International Conference on Communications, Montreal, QC, Canada, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICC42927.2021.9500663](https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500663).
- [21] KEYKHOSRAVI K, KESKIN M F, SECO-GRANADOS G, *et al.* SISO RIS-enabled joint 3D downlink localization and synchronization[C]. 2021 IEEE International Conference on Communications, Montreal, Canada, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICC42927.2021.9500281](https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500281).
- [22] RAHAL M, DENIS B, KEYKHOSRAVI K, *et al.* RIS-enabled localization continuity under near-field conditions[C]. 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Lucca, Italy, 2021: 436–440. doi: [10.1109/SPAWC51858.2021.9593200](https://doi.org/10.1109/SPAWC51858.2021.9593200).
- [23] RINCHI O, ELZANATY A, and ALOUINI M S. Compressive near-field localization for multipath RIS-aided environments[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(6): 1268–1272. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3151036](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3151036).
- [24] WANG Wei and ZHANG Wei. Joint beam training and positioning for intelligent reflecting surfaces assisted millimeter wave communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6282–6297. doi: [10.1109/TWC.2021.3073140](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3073140).
- [25] KEYKHOSRAVI K, KESKIN M F, SECO-GRANADOS G, *et al.* RIS-enabled SISO localization under user mobility and spatial-wideband effects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, 16(5): 1125–1140. doi: [10.1109/JSTSP.2022.3175036](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2022.3175036).
- [26] WANG Bolei, GAO Feifei, JIN Shi, *et al.* Spatial- and frequency-wideband effects in millimeter-wave massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(13): 3393–3406. doi: [10.1109/TSP.2018.2831628](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2831628).
- [27] CAI Mingming, GAO Kang, NIE Ding, *et al.* Effect of wideband beam squint on codebook design in phased-array wireless systems[C]. 2016 IEEE Global Communications Conference, Washington, D.C., USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7841766](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7841766).
- [28] MYERS N J and HEATH R W. InFocus: A spatial coding technique to mitigate misfocus in near-field LoS beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(4): 2193–2209. doi: [10.1109/TWC.2021.3110011](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3110011).
- [29] MA Siqi, SHEN Wenqian, AN Jianping, *et al.* Wideband channel estimation for IRS-aided systems in the face of beam squint[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6240–6253. doi: [10.1109/TWC.2021.3072694](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3072694).
- 孙俊倡: 男, 博士生, 研究方向为毫米波定位、可重构智能超表面等。
- 谷荣妍: 女, 硕士生, 研究方向为语义通信、信息论等。
- 马 帅: 男, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为语义通信、通信定位一体化、信息论等。
- 柴进晋: 男, 讲师, 研究方向为无线定位、OFDM系统、编码技术等。
- 李世银: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为煤矿信息化、移动目标定位等。

责任编辑: 马秀强