DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209892

基于脉冲响应消歧重构的 UWB 测距优化方法*

从飞云[1],洪纵横[1],汤子安[1],李慧敏[1],林小杰[2]
(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027; 2. 浙江大学能源工程学院 杭州 310027)

摘 要: UWB 测距技术因功耗低、安全性高等优势在工业领域应用日益广泛。工业非视距场景下 UWB 脉冲信号由于穿透衰减和多通道反射等因素,存在首径信号衰减和多径延迟的问题,将会降低系统的定位精度。针对该问题,通过对 UWB 信号传递及响应建模,提出一种基于 UWB 信道脉冲响应的消歧重构算法,将信道脉冲簇信号进行泊松过程解析,对代表直线传播距离的首径信号进行特征增强,实现了复杂多径干扰下的首径信号提取与分离,提高了信号到达时间辨识精度,减少了 UWB 测距误差。进一步地,依据 IEEE802015.4a 标准对 UWB 信道响应进行仿真,并实现了不同遮挡环境下的实验研究,仿真和实验结果表明,本文提出的消歧重构算法能够显著提高多干扰环境下的定位精度,在存在多反射源和多遮挡物的工业非视距场景下,可使定位误差相较于传统阈值法降低约 79.1%。

关键词: UWB 定位;定位误差;信号处理
中图分类号: TH70 TN92 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

An optimization method of UWB ranging based on pulse response disambiguation and reconstruction

Cong Feiyun[1], Hong Zongheng[1], Tang Zi'an[1], Li Huimin[1], Lin Xiaojie[2]
(*1. The State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*; *2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: The UWB ranging technology is widely used in the industrial field because of its low power consumption and high security. Due to the attenuation of penetration and multi-channel reflection of UWB pulse signal in industrial non line of sight (NLOS) scene, the direct path signal attenuation and multi-path delay will reduce the positioning accuracy of the system. To solve this problem, a disambiguation and reconstruction algorithm is proposed, which is based on UWB channel impulse response by modeling UWB signal transmission and response. This algorithm analyzes the channel impulse cluster signals by Poisson distribution and enhances the characteristics of the head path signals representing the linear propagation distance. Therefore, it realizes the extraction and separation of the direct path signals under complex multipath interference, which improves the identification accuracy of signal arrival time and reduces the UWB ranging error. Furthermore, we simulate the UWB channel response according to the IEEE802015.4a standard and establish the experimental research system under different sheltered environments. Simulation and experimental results show that the proposed disambiguation and reconstruction algorithm can significantly improve the positioning accuracy in the multi-interference environment. Especially in the industrial NLOS scene with multiple reflectors and multiple obstructions, the error can be reduced by about 79.1% compared with threshold method.

Keywords: UWB positioning; positioning error; signal processing

0 引 言

超宽带(ultra wideband,UWB)技术是一种短距离无线载波通信技术,利用纳秒级的非正弦窄脉冲传输数据,因此占有的频谱范围很宽。相较于传统的 Wi-Fi 定位、超声波定位技术,UWB 技术具有传输快、实现简单、功耗低、安全性高等特点,因此在工业生产的各个领域,如传

收稿日期:2022-06-01 Received Date: 2022-06-01
*基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0194400)项目资助

感器数据收集[1]，设备导航[2]和位置、位姿定位[3-4]等领域中具有广泛且突出的应用。

UWB 定位算法在视距(line of sight, LOS)条件下定位效果良好，但是由于非视距(non line of sight, NLOS)传播的影响，信号到达时间(time of arrival, TOA)方法在 UWB 信道脉冲响应(channel impulse response, CIR)中识别到的往往不是真正的首径信号(direct path, DP)，使得定位精度显著降低[5]。因此提高 NLOS 场景下信号首径识别准确率，对于基于 UWB 技术的室内定位系统来说至关重要。

现有的基于 TOA 的前沿识别算法主要分为两类——时延估计补偿法，阈值比较法。

时延估计补偿法通过分析信道脉冲响应特点预计上升时间和最大超额延迟实现前沿检测和误差补偿。李珂[6]提出一种基于前沿检测互相关和数据子载波相位差拟合的分级时延估计算法，具备较好的多径环境适应能力。Savic 等[7]基于大量统计数据分析得到信号首径特征，将其应用于 NLOS 的识别，而最大峰的时延估计应用于 NLOS 的误差补偿。然而时延估计法基于统计数据对信号时延估计，从而对误差进行矫正，并未从根本上解决首径衰减严重导致难以识别的问题。

阈值比较法通过选择合适的阈值，从而过滤掉噪声信号，定位首径信号 DP 到达时间。目前已经研究出许多阈值设计算法。任斌等[8]将利用总体最小二乘评估目标点的初始位置最为泰勒级数展开点，使用加权最小二乘迭代计算搜索最优阈值。Guvenc 等[9]提出了一种归一化阈值选择技术，通过仿真模拟研究峰度与最佳归一化阈值之间的依赖性。然而阈值法受制于信号多径延迟以及首径衰减的特性，以及噪声信号的存在较大的干扰，往往无法在原 CIR 中选择较为合适的阈值，使得定位误差始终较大[10]；

本文提出一种信道脉冲响应消岐重构算法，有效解决信号首径误识别的难题，同时结合 MATLAB 仿真和 UWB 测距系统实现对算法有效性进行了验证。

1 UWB 测距误差分析及建模

在过去的几年中，许多 UWB 信道模型标准已经公布(如 OFDM-UWB，IEEE 802.15.4a 和 IEEE 802.15.3c)[11]，然而大多数可公开的信道统计信息的模型都没有明确包含测距相关的参数信息。因此我们基于 IEEE 802.15.4a 模型构建了传播路径损耗模型和多径延迟传播概率模型。

理想空间传播：信号传输通过直接路径到达接收器，途中无遮挡物和反射源。对于这种理想空间传播情形，在频率 f 和距离 d 处的接收功率可以表示为[12]：

$$P_{rx}(d,f) = P_{tx}G_{tx}(f)\eta_{tx-ant}(f)G_{rx}(f)\eta_{rx-ant}(f) \times \left(\frac{c}{4\pi fd}\right)^2 \tag{1}$$

其中，P_{tx} 为发射功率，G_{tx} 和 G_{rx} 分别为发射天线和接收天线的天线增益，c 为光速，η_{tx-ant}、η_{rx-ant} 分别为发射天线和接收天线的效率。

现实传播环境：在现实环境中，各种障碍物会对传播特性造成两种影响，如图 1 所示：1)传播路径损耗：阻挡信号传播的直接路径，导致信道脉冲响应(CIR)中首径衰减。2)多径传播延迟：将发射器发射的 UWB 信号反射给接收器，导致 CIR 具有多径延迟特性。

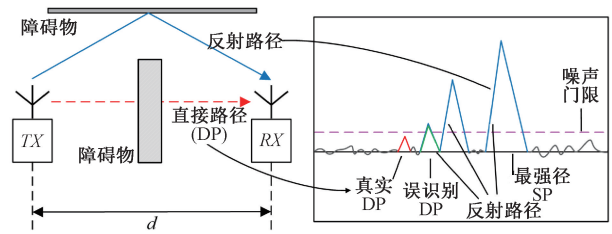


图 1 现实环境信号传播模型

Fig. 1 Signal propagation model in real space

可以发现，在 NLOS 场景中，若发射器和接收器之间的直接路径受阻，DP 的衰减很大，可能淹没在噪声中，以至于接收器根本无法观察到。这极大降低了 DP 识别的准确度，很可能使得 TOA 估计错误。

而当传播存在大量反射、衍射，多径分量(MPCs)以不同的衰减水平和延迟到达接收模块时，它们互相叠加，互相干扰。又考虑到 NLOS 场景下 DP 信号可能因障碍物阻挡衰减，因此最强径(strongest path, SP)往往不是首径 DP 并且与首径 DP 之间存在延迟，Sahinoglu 等统计，在某些情况下，多径干扰下的信号过延迟甚至高到一百纳秒，使 TOA 估计偏离真实的 TOA[13]。

如果将发射功率表示为 P_{tx}，则接收功率可以表示为：

$$P_{rx}(d_1,d_2,f) = P_{tx}G_{tx}(f)\eta_{tx-ant} \times (f)G_{rx}(f)\eta_{rx-ant}(f)\frac{c^2\sigma_{rcs}(f)}{4\pi(4\pi fd_1d_2)^2} \tag{2}$$

其中，$d_1(d_2)$ 是发射器(接收器)与物体之间的距离，σ_{rcs} 是物体的雷达横截面(radar cross-section, RCS)[14]。

2 基于信道脉冲响应消岐重构的前沿检测算法

基于信道脉冲响应(CIR)消岐重构的 TOA 估计算法流程如下：接收端接收到的 UWB 信号为 $r(t)$，对 $r(t)$ 进行

基于分段样本噪声的自适应降噪滤波处理后得到的 CIR 信号记为 $r'(t)$;再基于信道脉冲响应路径损耗模型和多径延迟模型,利用峰值比例迭代(peak ratio iteration, PRI)算法构建路径损耗因子和多径延迟因子,对信道脉冲响应进行消歧重构得到重构后的信道脉冲响应 $C(t)$,将首径 DP 从原 CIR 中凸显出来;最后,引入一种基于最强径回溯搜索的自适应前沿检测技术检测 DP 信号,由此实现对 TOA 的准确估计。

2.1　基于 PRI 的信道脉冲响应消歧重构算法

基于信道脉冲响应 CIR 的传播路径损耗模型和多径延迟模型,应用峰值比例迭代算法(PRI)方法对信道脉冲响应进行重构,将 DP 从衰减和时延干扰中凸显出来。

图 2 为 LOS/NLOS 环境下接收端的 CIR。通过 LOS 及 NLOS 场景下信道脉冲响应分析对比可发现 NLOS 复杂工业场景下的 CIR 信号具有以下特点:

1)DP 衰减明显,这意味着在直接路径上存在严重的阻挡现象,这也是传统阈值法无法准确识别 DP 位置的原因。

2)DP 位置总是处于最强径(SP)左端不远处。

3)DP 信号与第 2 到达路径信号、第 3 到达路径信号的幅值大小差异明显,呈现明显的倍数增长,该现象由 DP 衰减与多径到达叠加影响造成。

不难看出,CIR 中各峰的幅值大小及相对位置很好的表现出 UWB 信号路径损耗和多径延迟的特征,因此接下来将提取各峰幅值信息,并结合路径损耗模型、多径延迟模型构建重构因子,以此将 DP 信号凸显出来。

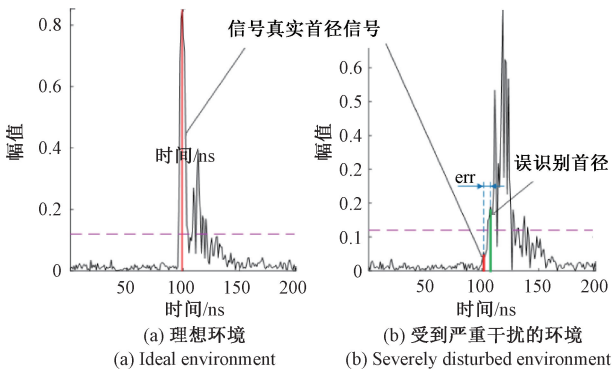


图 2　不同场景下的信道脉冲响应

Fig. 2　Channel impulse response in different scenarios

1)基于路径损耗的重构因子构建

由前文 CIR 信号特点 1)、3)研究可知,NLOS 场景下,CIR 首径 DP 衰弱比第 2 径、第 3 径等严重得多。因此通过求得相邻峰的幅值比例大小可以表征首径 DP 出现的可能性,即前后两径峰值比例越大,DP 出现在前峰的可能性越大。通过此现象构建基于路径损耗的重构因子。

首先标记出 CIR 的所有峰值如图 3 所示。即:

$$\exists loc \in [0,R],\quad p_k(loc \pm e) < p_k(loc) \wedge p_k(loc) > u(\varepsilon) \tag{3}$$

式中:R 为信号 $r'(t)$ 长度,$p_k(loc)$ 为 CIR 峰值,即多径分量,loc 为多径分量所在横坐标,通过与 loc 距离为 e 的正负区间取极值,找出峰值 p_k,为了避免非多径分量误识别及多径分量漏选,取 $e=2$。

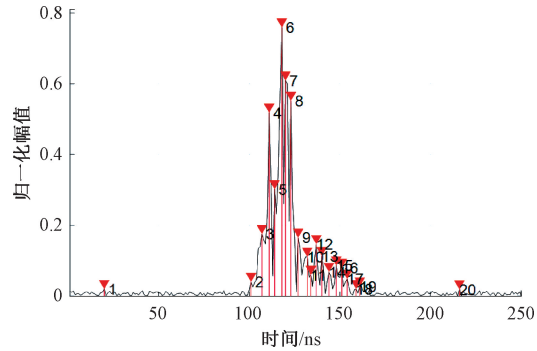


图 3　对信道脉冲响应多径分量进行峰标记

Fig. 3　Peak marking of channel impulse response multipath components

对由式(3)所得峰进行如下变换:

$$fac = p_k(loc+1)/p_k(loc) \tag{4}$$

其中,fac 为峰值比例,表征多径分量衰减程度间的关系,为避免 CIR 重构时原信道脉冲响应峰值影响及后续优化,取:

$$fac_1 = \zeta \times p_k(loc+1)/p_k^{\,2}(loc) \tag{5}$$

ζ 为峰值比例调节因子,此外,由前文 CIR 信号特点 2)可知,DP 位置处于 SP 左端,且 DP 总是在 SP 不远处,因此,将峰值比例映射至对应多径分量(峰值)处,其余位置取 0,有:

$$f_1(t) = \begin{cases} fac_1, & t = loc(i) \text{ 且 } (t - t_{sp}) \in [-b.\,b] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

其中,$loc(i)$ 为多径分量到达时间,t_{sp} 为最强多径分量(SP)到达时间,b 为 DP 可能距离 SP 的最大长度。

显然,DP 与 SP 间的时间间隔不可能超过有效信息长度,即不超过 100 ns,取 $b=50$ ns,得到基于路径损耗的重构因子如图 4 所示。

2)基于多径延迟的重构因子构建

UWB 信号的多径分量不仅受到路径损耗影响出现衰减现象,同时还因为信号反射、衍射出现多径延迟及叠加,影响多径分量到达时间及功率幅值,为了更好对 CIR 进行重构,还需要考虑构建基于多径延迟现象的重构因子。已知多径延迟模型中,簇的到达时间符合泊松过程[15],多径分量的到达时间是两个泊松过程的混合,当

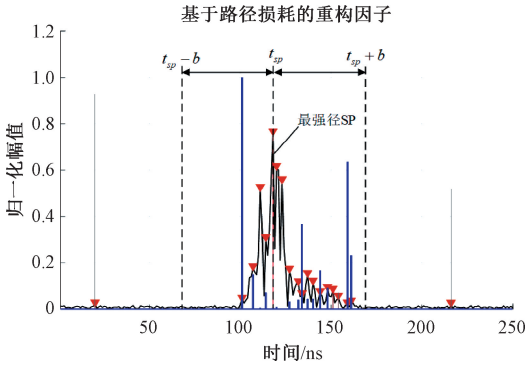


图 4 基于路径损耗的重构因子

Fig. 4 Reconstruction factor based on path loss

样本充分大时,泊松分布近似于正态分布。因此,考虑重构因子 $f_2(t)$:

$$f_2(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

由前文可知,$f_1(t)$ 反映了多径分量簇衰减程度,对 $f_1(t)$ 进行包络处理(如图 5 所示),即:

$$\begin{aligned}&\Psi(t)=envelope(\hat{f}_1(t))s.t\\&\Psi(loc)-f_1(loc)=\Delta\ 且\ \Delta\in[-u(\varepsilon),u(\varepsilon)]\end{aligned} \tag{8}$$

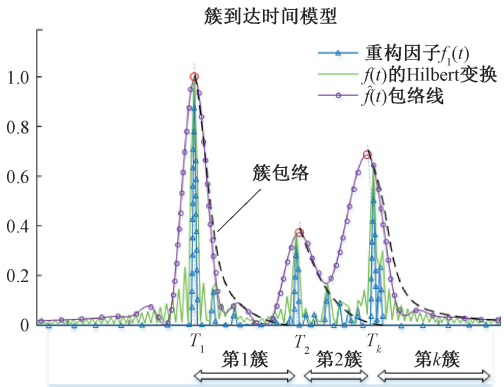


图 5 时延常数估计

Fig. 5 Time delay constant estimation

$\Psi(t)$ 为对 $f_1(t)$ 进行包络处理后的包络线,且包络线总是经过离 $f_1(t)$ 峰值不远处,误差范围需要尽量小,但其具体数值对本部分要求的趋势影响不大,因此令 Δ 不超过信号自适应噪声水平,这样的好处在于可根据信号不同环境下的噪声干扰进行自适应变换且减少了运算复杂度。其中:

$$\hat{f}_1(t)=H(f_1)(t)=\frac{1}{\pi}p.v.\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{f_1(v)}{t-v}\mathrm{d}v \tag{9}$$

$\hat{f}_1(t)$ 即为对 $f_1(t)$ 进行 Hilbert 变换,从而将实信号转换为复信号,便于后续包络处理。又考虑到 $f_1(t)$ 为离散值,因此 $\hat{f}_1(t)$ 代替 $f_1(t)$ 作为重构因子进行消歧重构。

由多径延迟模型可知,UWB 信号多径时延可通过簇到达时间差值进行估计,对时延常数 τ,有:

$$\tau=\frac{\rho}{k-1}(T_k-T_1),\ K\leqslant 3 \tag{10}$$

其中,k 为总簇数,T_k 为第 k 簇到达时间,T_1 为第 1 簇到达时间,ρ 为时延调节因子。

令 $\sigma=loc(i_{sp})-loc(i_{sp}-l)$,$i_{sp}$ 为 SP 到达时的多径序列,l 为一个标准差区间内包含的多径分量数目,l 越大则 $f_2(t)$ 越宽。得到基于多径延迟的重构因子如图 6 所示。

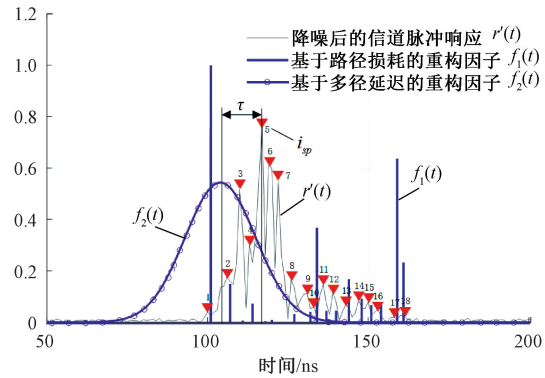


图 6 基于多径延迟的重构因子

Fig. 6 Reconstruction factor based on multipath time delay

3)信道脉冲响应消歧重构

综合考虑 NLOS 场景下的 CIR 信号的 DP 信号衰减规律和多径延时特点,基于峰值比例迭代方法对重构因子 $\hat{f}_1(t)$、$f_2(t)$ 进行了构建,利用 PRI-CIR 方法对 CIR 进行消歧重构后得到 $C(t)$:

$$C(t)=r'(t)\times\hat{f}_1(t)\times f_2(t) \tag{11}$$

得到消歧重构后的信道脉冲响应与原始信道脉冲响应对比如图 7 所示。

2.2 消歧重构自适应前沿检测技术

为更好的实现 DP 识别,提出了一种自适应前沿检测技术,该技术基于最强径回溯搜索(strongest path search back, SPSB)。该算法首先找到 SP 位置,然后从该位置回溯搜索一定的长度的区域,该区域内幅值最早超过门限 u_C 的样本所在峰处即为 DP,即:

$$\hat{n}_{DP}=\min\{n\mid\tilde{C}[n]>u_c+\Delta_{DP}\} \tag{12}$$

其中,

$$\tilde{C}[n]=\{C[n_{sp}-w_{sb}],C[n_{sp}-w_{sb}+1],\cdots,C[n_{sp}]\} \tag{13}$$

显然,回溯窗口长度与有效样本(非噪声样本)量相关,DP 与 SP 间的时间间隔不可能超过有效样本长度的

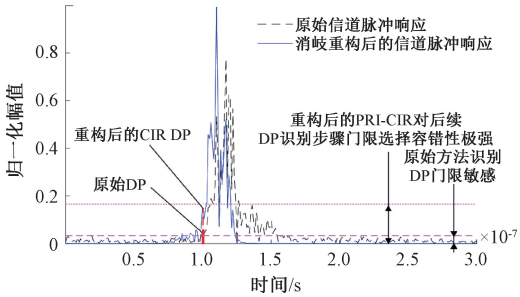


图 7　信道脉冲响应消歧重构前后对比

Fig. 7　Comparison before and after channel impulse response disambiguation and reconstruction

一半,不失一般性地,记过场景噪声样本为有效样本量,则回溯窗口 w_{sb} 有:

$$w_{sb} = \text{count}\{n \mid C[n] > u_{\varepsilon}\}/2 \tag{14}$$

如图 8 所示,Δ_{DP} 为最早过门限样本 n_D 与其所在峰间宽度,为避免误识别伪峰,定义 DP 所在峰的峰-谷比大于 1.2,即 $\hat{n}_{DP}$ 处幅值满足:

$$C[\hat{n}_{DP}] > C[\hat{n}_{DP} + m] \text{ 且}$$
$$C[n_{va}] < C[n_{va} + 1] \wedge C[\hat{n}_{DP}]/C[n_{va}] > 1.2 \tag{15}$$

其中,$m = 1,2,\cdots,n_{va} - \hat{n}_{DP}$。由此,即可得到 TOA 估计值:

$$t_{toa} = \hat{n}_{DP} T_{sample} \tag{16}$$

其中,T_{sample} 是采样时间间隔。

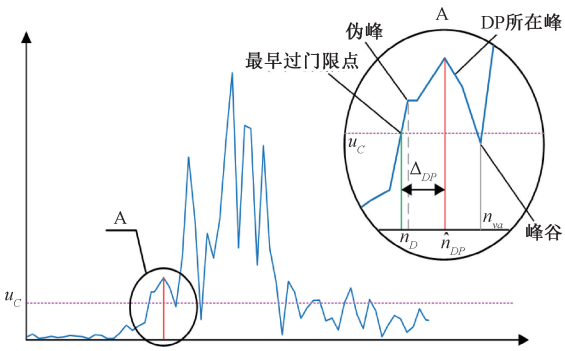


图 8　DP 位置确定

Fig. 8　Position determination of direct path

3　仿真及实验验证

上述建模研究已经对基于信道脉冲响应消歧重构的前沿检测算法基本原理和分析过程进行了详细说明。接下来将详细讨论不同材质障碍物对 UWB 信道脉冲响应的影响,并通过一系列仿真以及实验的结果对提出的改进算法进行进一步验证,更有效地评估该算法突出首径的性能,同时和传统的定位技术得到的结果进行相应的对比。

3.1　障碍物材质对 UWB 信道表征参数的影响分析

UWB 信号在空间中传播将产生路径损耗、多径延时及小尺度衰落现象,这些现象与空间中传播介质息息相关,为研究不同材质障碍物对 UWB 信道的表征参数产生的具体影响,进行了 NLOS 障碍物穿透实验。

为了研究障碍物对信道表征参数的影响在发射时使用相同的脉冲波形,在相同的距离(4 m)处放置了 3 mm 厚的板材类障碍物,对不同材质障碍物干扰下的信道脉冲响应数据进行采集,绘制接收信号的信道脉冲脉冲响应如图 9 所示。

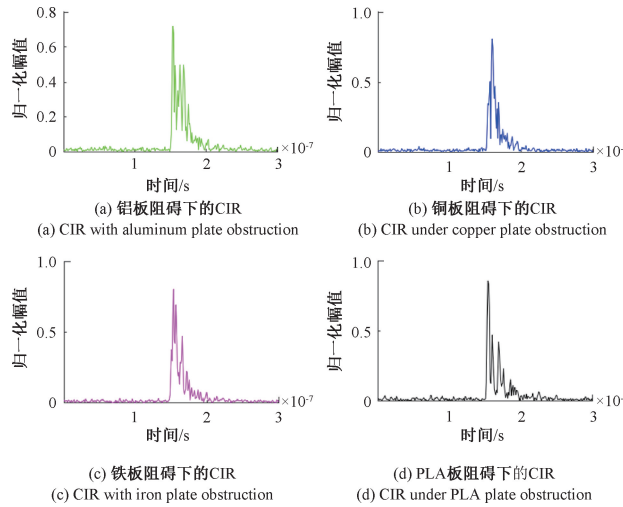


图 9　不同材质障碍物影响下的 CIR

Fig. 9　CIR under the influence of obstacles of different materials

可以注意到信道脉冲响应的波形与障碍物的材质息息相关,与塑料材质相比,金属板影响下信号的衰减要严重得多,提取信道的有量纲特征值如最大幅值、整流平均值及无量纲指标如峭度、偏度和裕度于图 10。

由图 10 中数据可知,铝板遮挡下 CIR 幅值衰减最为严重,铝板与铜板影响衰减次之,塑料板对其几乎无影响。整流平均值指信号绝对值的平均值,即信号经过全波整流后的平均值,相比 LOS(无遮挡)环境下,铝、铜、铁及塑料板遮挡下的信道整流平均值均有不同程度的上升,即障碍物的遮挡引入了环境噪声,铝板的影响最为严重。峭度因子反映了波形的平缓程度,LOS 场景及塑料挡板遮挡下信道的峭度最高,说明能量集中,铜铁铝板的遮挡下 CIR 逐渐平缓,即信道能量开始分散出现多径延迟现象。偏度值按照 LOS、塑料、铜、铁、铝板的顺序逐渐降低,即峰值开始右偏,信号首径(DP)受到障碍物干扰不再是 CIR 最强径(SP)且随着干扰增大,SP 逐步右移。

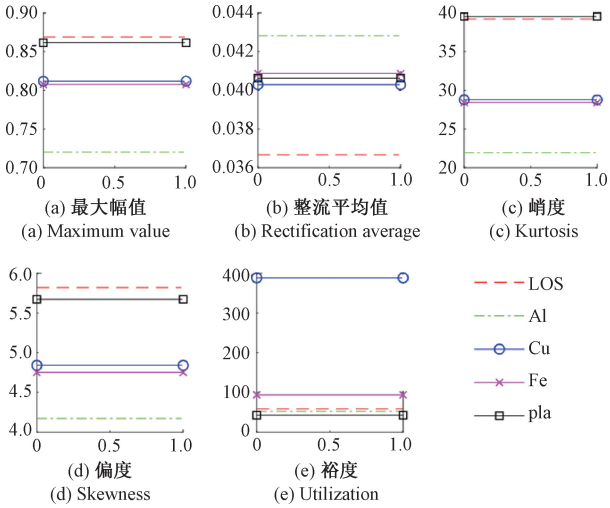


图 10 不同材质障碍物影响下的信道特征值

Fig. 10 Channel eigenvalues under the influence of obstacles of different materials

3.2 基于 IEEE802015.4a 标准的算法仿真验证

IEEE802015.4a 按照不同的使用场景，可划分为 8 个信道[16]，信道 CM1、CM2 对应室内 LOS/NLOS 传播场景，CM3、CM4 对应办公室 LOS/NLOS 传播场景，CM5、CM6 对应户外 LOS/NLOS 传播场景，CM7、CM8 对应工业 LOS/NLOS 传播场景。

在 CM1～CM8 信道情况下对本文提出的算法进行仿真，仿真采用的信道模型基于 IEEE802015.4a，采用的 UWB 信号为二阶 Gaussian 脉冲，其脉冲宽度为 0.9 ns，脉冲成型因子为 0.4 ns。接收信号采样频率 6 GHz，采样时间间隔为 0.16 ns，获取 1 800 组 CIR 数据。首先，对所提出的基于信道脉冲响应消歧重构的前沿检测算法进行信道普适性研究，通过仿真得到信噪比为 10 dB 条件下 CM1～CM8 的信道脉冲响应及消歧重构后的 PRI-CIR。

由图 11 可知，在 CM1、CM3、CM5、CM7 信道下，因处于 LOS 场景下，DP 误识别现象不明显，因此 PRI-CIR 与原始 CIR 差距不大。而在 CM2、CM4、CM6、CM8 信道下，PRI-CIR 较原始 CIR 可较好的对 DP 衰弱进行还原，对信号延迟现象有较好的改善。因此，所提出的基于信道脉冲响应消歧重构的前沿检测算法对 LOS、NLOS 场景都有较好的适用性。

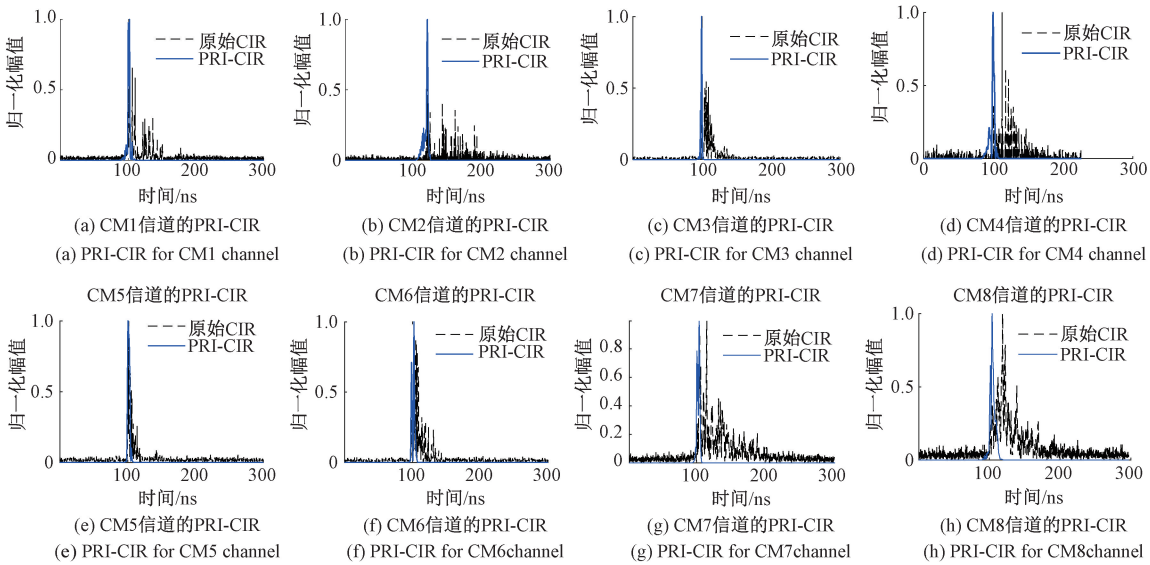


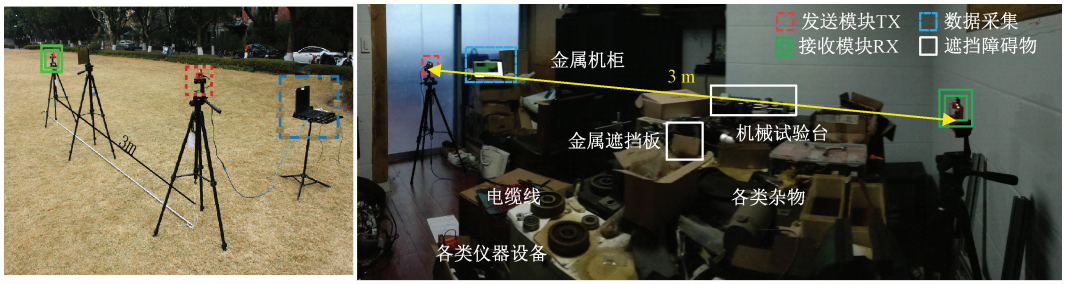
图 11 CM1～CM8 条件下的 CIR 及其消歧重构曲线

Fig. 11 CIR and its disambiguation reconstruction curve from CM1 to CM8

3.3 UWB 测距实验验证

在实际环境中搭建 UWB 测距系统验证本算法。图 12 为系统实现环境，其中图 12(a)为简单非视距场景，信号传播过程中受到单块隔板干扰，对首径信号传播有一定的衰减作用。图 12(b)为复杂工业非视距场景，存在各类仪器设备、电缆线路等障碍物。发送模块与接收模块间物理距离皆设置为 3 m，硬件设备为 DWM1001。UWB 信号中心频率为 6.5 GHz，带宽为 499.2 MHz。对不同场景下的信道脉冲响应进行收集，将真实 DP 绘制在时间轴 100 ns 处以方便后续计算。

根据实验结果绘制原始的 CIR 曲线，并应用基于峰值比例迭代的 CIR 消歧重构算法对原始 CIR 进行重构，获得 PRI-CIR 如图 13 实线所示。基于 SPSB 检测技术对不同实验环境下的 PRI-CIR 进行 SP 回溯搜索，取门限

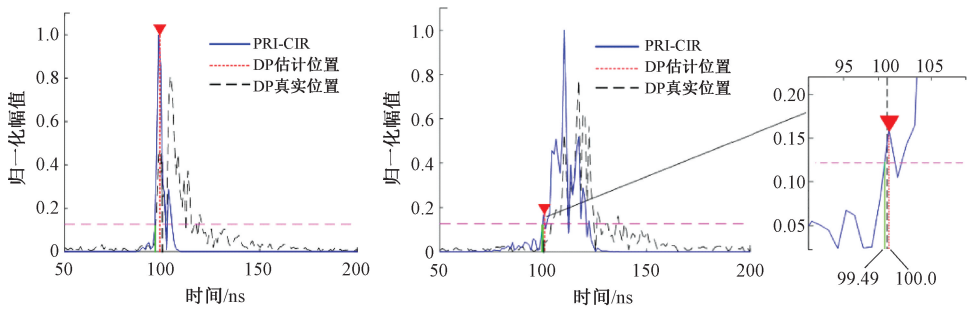


(a) NLOS环境
(a) NLOS environment

(b)工业NLOS环境
(b) Industrial NLOS environment

图 12　PRI-CIR 算法系统实现环境

Fig. 12　Implementation environment of the PRI-CIR algorithm system



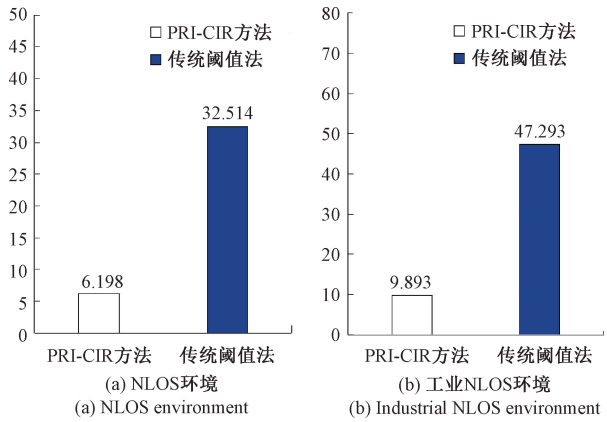
(a) NLOS环境
(a) NLOS environment

(b) 工业NLOS环境
(b) Industrial NLOS environment

图 13　不同实验环境下的 DP 估计

Fig. 13　Direct path estimation in different experimental environments

因子为 10,分别检测到它们的最早过门限的样本所在峰位置(DP 索引位置)如图 13 点虚线所示。设置传统阈值法过门限因子 a = 10,自适应场景噪声为 $u(\varepsilon)$,门限 $u_C = a \times u(\varepsilon)$。通过实测数据对比传统方法与提出的基于信道脉冲响应消歧重构的 TOA 估计算法,可得测距误差结果如图 14 所示。



(a) NLOS环境
(a) NLOS environment

(b) 工业NLOS环境
(b) Industrial NLOS environment

图 14　本算法和传统阈值法在不同实验环境下平均定位误差

Fig. 14　The average error of the proposed algorithm and the threshold algorithm in different experimental environments

由图 14 得出以下结论:

1)在两种方法应用下,测距误差都随测距环境复杂度增加而变大。

2)NLOS 及工业 NLOS 场景下,由于因为信号传递过程中直接路径受阻,DP 信号严重衰减,识别精度受所选阈值影响大。较大的阈值易忽略在 NLOS 环境下严重衰减的 DP 信号,较小的阈值则难以从噪声中识别出 DP,TOA 估计的准确性很难保证。

3)基于信道脉冲响应消歧重构的 TOA 估计算法,将 DP 信息从嘈杂干扰中凸显出来,为信号前沿检测提供了巨大优势。其无论在 NLOS 还是工业复杂 NLOS 场景下,与传统阈值法相比测距误差都大大降低,具有良好的场景适应性及测距鲁棒性。

实验表明,本算法在 NLOS 环境下,10 cm 以内的误差占数据 93.7%,其中 38.8% 的实验数据测距误差在 5 cm 内,相比传统阈值法误差平均值下降约 80.9%。在工业 NLOS 环境下,20 cm 内的测距误差占 92.85%,其中 87.49% 的实验数据测距误差在 10 cm 以下,相比传统阈值法误差平均值下降约 79.1%。

4 结 论

本文研究了 UWB 信号在不同环境下的信道冲击响应衰减规律,根据 UWB 信号在工业 NLOS 环境下的传播路径损耗及多径延迟特征,提出了一种基于 CIR 消歧重构的 TOA 估计算法,成功将首径信息从嘈杂干扰中凸显出来,避免了复杂环境极易出现的首径误识别现象,提高了 TOA 估计精度,降低了测距误差。同时基于仿真及实验对所提出算法的有效性进行评估验证,结果表明,本算法在不同程度上有效提高了不同环境下的测距精度,尤其在工业 NLOS 场景下,在 92.85% 的情况下实现了误差在 20 cm 范围内,87.49% 的情况下误差在 10 cm 以下,相比传统阈值法误差平均值下降约 79.1%。因此本算法具有良好的场景适应性和测距鲁棒性。

参考文献

[1] 李静. 电子侦察用超宽带信号采样系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
LI J. Design and implementation of UWB signal sampling system for electronic reconnaissance [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[2] 李荣冰, 王念曾, 刘建业, 等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 28-35.
LI R B, WANG N Z, LIU J Y, et al. UWB ranging error estimation and compensation method for relative navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 28-35.

[3] 李倩, 蒋正华, 孙炎, 等. 基于因子图的 INS/UWB 室内行人紧组合定位技术[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 32-45.
LI Q, JIANG ZH H, SUN Y, et al. INS/UWB tight integrated localization technology for pedestrian indoor based on factor graph[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 32-45.

[4] 符世琛, 李一鸣, 宗凯, 等. 面向掘进机的超宽带位姿检测系统精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1978-1987.
FU SH CH, LI Y M, ZONG K, et al. Ultra-wideband pose collaborative detection method of roadheader[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1978-1987.

[5] 王沁, 何杰, 张前雄, 等. 测距误差分级的室内 TOA 定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2851-2856.
WANG Q, HE J, ZHANG Q Q, et al. Ranging error classi-fication based indoor TOA localization algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2851-2856.

[6] 李珂. Wi-Fi 网络下基于 TOA 测距机制的室内定位算法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2017.
LI K. TOA Ranging based indoor positioning methods using Wi-Fi network [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2017.

[7] SAVIC V, FERRER-COLL J, ÄNGSKOG P, et al. Measurement analysis and channel modeling for TOA-based ranging in tunnels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(1): 456-67.

[8] 任斌, 徐会彬. 基于总体最小二乘的泰勒级数展开的 TOA 的 UWB 定位方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6129-6133.
REN B, XU H B. A taylor series expansion TOA based on total least square in UWB[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(21): 6129-6133.

[9] GUVENC I, SAHINOGLU Z. Threshold selection for UWB TOA estimation based on kurtosis analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9 (12): 1025-1027.

[10] LI J, CUI X, SONG H, et al. Threshold selection method for UWB TOA estimation based on wavelet decomposition and kurtosis analysis [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017, 2017(1): 1-10.

[11] UGUEN B, PLOUHINEC E, LOSTANLEN Y, et al. A deterministic ultra wideband channel modeling [C]. Proceedings of the 2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (IEEE Cat No 02EX580), 2002.

[12] MOLISCH A F. Ultrawideband propagation channels-theory, measurement, and modeling [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1528-1545.

[13] SAHINOGLU Z, GEZICI S, GUVENC I. Ultra-wideband positioning systems [M]. Cambridge, 2008.

[14] RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing [M]. McGraw-Hill Education, 2014.

[15] 杨维, 李滢, 孙继平. 类矩形矿井巷道中 UHF 宽带电磁波统计信道建模[J]. 煤炭学报, 2008 (4): 467-472.

YANG W, LI Y, SUN J P. A statistical channel model of wideband UHF radio waves along rectangular-like mine tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2008 (4): 467-472.

[16] MOLISCH A F, BALAKRISHNAN K, CHONG C C, et al. IEEE 802.15.4a channel model-final report [J]. IEEE P802, 2004, 15(4): 0662.

作者简介

从飞云(通信作者),2006 年于浙江大学获得学士学位,2012 年于上海交通大学获得博士学位。毕业后在浙江大学机械设计研究所工作,并在东京大学人工智能研究所担任研究员。主要研究方向为复杂机械系统的信号处理、设备健康监测与诊断以及移动机器人。

E-mail: fycong@zju.edu.cn

Cong Feiyun (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Zhejiang University in 2006 and received his Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2012. After graduation, he worked in the Mechanical Design Institute at Zhejiang University, and worked as a research fellow at the Artificial Intelligence Institute at Tokyo University. His main research interests include signal processing of complex mechanical systems, equipment health monitoring and diagnosis, and mobile robotics.

洪纵横,2020 年于西南交通大学获得学士学位,现为浙江大学硕士研究生,主要研究方向为智能机器人的结构设计与控制算法。

E-mail: hongzh44@zju.edu.cn

Hong Zongheng received his B.Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2020. He is currently pursuing his master degree at Zhejiang University. His research interests include structure design and control algorithm of robot.

汤子安,现为浙江大学本科生在读,主要研究方向为智能机器人结构设计和控制算法。

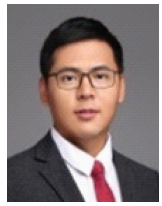
E-mail: 3190104102@zju.edu.cn

Tang Zi'an is currently an undergraduate student at Zhejiang University. His main research interests include robot structure design and control algorithm.

李慧敏,2017 年于武汉工程大学获得学士学位,2021 年于浙江大学获得硕士学位。主要研究方向为移动机器人的控制及定位技术。

E-mail: huimin-li@zju.edu.cn

Li Huimin received her B.Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 2017, and received her M.Sc. degree from Zhejiang University in 2021. Her main research interests include control and localization of mobile robots.



林小杰,2012 年于浙江大学获得学士学位,2017 年于马里兰大学获得博士学位。毕业后在浙江大学浙江大学能源工程学院工作。主要研究方向为智能能源系统的优化设计和模拟。

E-mail: xiaojie.lin@zju.edu.cn

Lin Xiaojie received his B.Sc. degree from Zhejiang University in 2012 and received his Ph.D. degree from University of Maryland, College Park in 2017. After graduation, he worked at Mitsubishi Electric Research Laboratories in Boston before joining the College of Energy Engineering at Zhejiang University. His main research interests include the optimal design and simulation of smart energy system with a special interest in data-driven approaches in industrial energy scenarios.