

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.004

引用格式:张浩,梁晓林,吕婷婷,等.一种新颖的基于偏度的非视距区分算法[J].电讯技术,2015,55(5):484-490.[ZHANG Hao,LIANG Xiaolin,LYU Tingting,et al.A Novel Non-Line-of-Sight Identification Algorithm Based on Skewness[J].Telecommunication Engineering,2015,55(5):484-490.]

一种新颖的基于偏度的非视距区分算法*

张浩^{1,2},梁晓林^{1,**},吕婷婷¹,徐凌伟¹

(1.中国海洋大学 信息科学与工程学院,山东 青岛 266100;
2.加拿大维多利亚大学 电子与计算机工程学院,维多利亚 V8W 3P6)

摘要:在超宽带(UWB)定位系统中,非视距(NLOS)传播是降低通信与定位精度可靠性的主要原因。因此,区分NLOS环境对提高定位精度尤为重要。针对该问题,提出了一种新的基于信道统计特性——偏度(Skewness)的NLOS区分算法。该算法首先将偏度在IEEE 802.15.4a信道模型(特别是室内家居和办公环境)中建模为对数正态分布,然后对其概率密度函数(PDF)做似然比检验来区分视距(LOS)与NLOS环境。仿真结果表明:室内UWB定位系统中,偏度可以更好地区分信道状态,在室内办公环境中,正确区分NLOS环境的概率可达99.99%。在定位模块中融入所获得的区分NLOS的结果将有助于定位精度的进一步提升。

关键词:室内定位;超宽带;非视距区分;信道统计特性;偏度;定位精度

中图分类号:TN925 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0484-07

A Novel Non-Line-of-Sight Identification Algorithm Based on Skewness

ZHANG Hao^{1,2},LIANG Xiaolin¹,LYU Tingting¹,XU Lingwei¹

(1.College of Information Science and Engineering,Ocean University of China,Qingdao 266100,China;
2.Department of Electrical and Computer Engineering,University of Victoria,Victoria V8W 3P6,Canada)

Abstract:Non-line-of-sight(NLOS) propagation can severely degrade the reliability of communication and localization accuracy in indoor ultra-wide-band(UWB) positioning systems. It was important to distinguish NLOS for positioning precision. For this problem,a novel NLOS identification technique based on skewness is proposed,which is one of the channel statistics. The IEEE 802.15.4a channel models are employed for simulation. Skewness can be well modelled as a log-normal distribution especially in the indoor and office environments. Subsequently,a likelihood ratio test for Probability Density Function(PDF) is used to identify LOS/NLOS. The simulation results show that skewness can better distinguish the channel state with up to 99.99 percent accuracy on the quiz responses in the indoor office environments. Localization accuracy is expected to be improved by incorporating the NLOS identification results into the positioning module.

Key words:indoor positioning;UWB;NLOS identification;channel statistics;skewness;localization accuracy

* 收稿日期:2014-12-31;修回日期:2015-04-07 Received date:2014-12-31;Revised date:2015-04-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60902005);青岛市国际科技合作项目(12-1-4-137-hz)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 60902005);International Science and Technology Cooperation Projects of Qingdao(12-1-4-137-hz)

** 通讯作者:xiaolin87liang@163.com Corresponding author:xiaolin87liang@163.com

1 引言

超宽带(UWB)技术使用处于纳秒级的窄脉冲,拥有足够的带宽^[1],具有很强的多径分辨能力,在室内定位系统中的应用越来越广泛。在接收端,如果直达径(Direct Path, DP)被准确识别,则信号的到达时间(Time of Arrival, TOA)就能够准确估计。然而在密集多径传播环境尤其是在室内环境中,由于非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS)影响,参考节点与待测节点之间的 LOS 路径被阻挡,信号 TOA 很难准确估计,这会降低测距与定位精度。若发射端与接收端不存在任何的 DP,信号在传播过程中就会引入更大的额外附加时延,造成 NLOS 误差。因此,消除 NLOS 误差影响对提高测距与定位精度至关重要。

消除 NLOS 影响的研究主要集中在两个方面^[2-3]:NLOS 识别和 NLOS 误差消除。若在对接收信号进行处理之前就已经得知信号是来自于 LOS 还是 NLOS 环境,这对提高定位精度很有帮助。如果接收信号是来自于 LOS 环境,我们就可对接收信号不做任何处理,直接获得测距估计值,从而得到较高精度待测节点位置估计值。如果接收信号来自 NLOS 环境,则可以先对接收信号进行消除或减轻 NLOS 误差的处理^[4-8],或者直接抛弃来自于 NLOS 环境的信号,然后再进行定位。

已有的 LOS 与 NLOS 的区分算法大体上可以分为两种:基于测距估计的算法和基于信道统计特性的算法。过去几年,已经提出许多区分 NLOS 状态的算法^[9-14],例如 Guvenc^[9]提出综合使用峭度(Kurtosis, K)、平均附加时延(Mean Excess Delay, MED)、均方根时延(Root-Mean-Square, RMS)区分 NLOS 环境。这种算法若使用单一变量,则无法正确区分 NLOS 环境;若使用混合变量,虽然取得不错的效果,但是计算复杂,效率降低。Venkatesh^[10]提出了基于接收信号 TOA、接收信号强度(the Received Signal Strength, RSS)、RMS 的 NLOS 环境区分算法,在已知实际距离的情况下,可以用来区分 NLOS 环境,然而,在实际应用中,参考节点与待测节点之间的距离无法事先知道,并且变量过多,运算复杂,效率低下。Li^[11]提出一种依赖机器学习的 NLOS 区分算法,这种算法虽然区分结果比较好,但是过于复杂。Tabaa^[12]提出一种支持向量机的 NLOS 区分算法,效果较好,但是与该文提出方法相

比较相对复杂,在实际定位应用中,运算量较大。TIAN^[13]提出一种基于支持向量数据分析(the Support Vector Data Description, SVDD)的 NLOS 区分算法,从文中仿真结果可以看出,在 NLOS 区分方面效果不错,然而该算法最大的问题是在与其他方法所需时间相比所花费的时间过长,然而作者并没有解决这个问题。YU^[14]提出一种数据自动更新的 LOS 与 NLOS 区分算法,该算法必须有先验假设,并且作者提出该算法的目的是为了提高定位精度,所以并未考虑算法的复杂程度,导致算法在自动更新数据时费时费力。

针对已有算法的不足,本文提出了一种基于偏度(Skewness, S)的 NLOS 区分算法,该算法简单、有效,易于实现。在仿真过程中发现,在室内家居环境(CM1/CM2)与室内办公环境(CM3/CM4)中,正确区分 NLOS 的概率,在同类型单变量 NLOS 区分算法中表现最好,达到多变量算法的水平。该算法仅仅使用 S 一个变量,就在保证正确区分 NLOS 环境的情况下,简化了运算,提高了效率。

在本文中,我们根据 IEEE 802.15.4a 标准建立了信道冲激响应的系统模型;然后对 S 的样本值进行对数正态分布的曲线拟合以及正态分布检验,将 S 建模为对数正态分布,通过对 S 在不同信道状态下的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)做似然比检验,分别求出 S 正确区分信道状态的概率;最后,对全文进行总结。

2 系统模型

在 IEEE 802.15.4a 信道模型下,信道冲激响应可以表示为

$$h(t)=\sum_{l=1}^L\gamma_l\delta(t-\tau_l)。(1)$$

式中, L 表示多径信道的数目, γ_l 、 τ_l 分别表示第 l 条路径的幅度和时移。

信号最先到达接收端的路径的到达时间为 $\tau_{\text{TOA}}=\tau_1$ 。设 d 表示参考节点与待测节点之间的真实距离, NLOS 环境的鉴别问题可简单概括为如下假设检验问题:

$$\begin{cases} H_0:d=c\tau_1,\rightarrow\text{LOS} \\ H_1:d<c\tau_1,\rightarrow\text{NLOS} \end{cases}。(2)$$

式中, c 表示光速, H_0 表示 LOS 的假设检验, H_1 表示

NLOS 的假设检验。

在 NLOS 环境下,DP 在传播过程中要经过一个或多个障碍物。由于障碍物的介电常数大于 1,所以信号在穿过障碍物的过程中的速度始终小于 c ,导致在 τ_1 中引入了恒正的附加时延,在这种情况下, τ_1 是不可能被准确估计的,测距结果势必会存在较大的恒正误差。如果将这些存在 NLOS 误差的测距估计值直接应用到定位模块中,定位精度将难以保证。因此,在使用测距估计值之前,最好是先在 NLOS 环境进行区分,然后再进行定位,由此便可在一定程度上消减 NLOS 误差^[15]。所以,区分 NLOS 节点并降低影响对提高定位的精度很有必要。

3 NLOS 区分算法

3.1 参数提取

偏度 (Skewness, S) 是统计数据分布偏斜方向和程度的度量,是统计数据分布非对称程度的数字特征。表征概率分布密度曲线相对于平均值不对称程度的特征数^[16-18],直观看来就是密度函数曲线尾部的相对长度。对一个随机变量 X 而言, S 是样本的三阶标准化矩:

$$S(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] = \frac{E[(X-\mu)^3]}{\sigma^3} \quad (3)$$

式中, μ 、 σ 分别表示 X 的平均值和标准差。对于正态分布而言, $S=0$, 两侧尾部长度对称; $S<0$ 称分布具有负偏离, 也称左偏态, 此时数据位于均值左边的比位于右边的少, 直观表现为左边的尾部相对于右边的尾部要长, 因为有少数变量值很小, 使曲线左侧尾部拖得很长; $S>0$ 称分布具有正偏离, 也称右偏态, 此时数据位于均值右边的比位于左边的少, 直观表现为右边的尾部相对于左边的尾部要长, 因为有少数变量值很大, 使曲线右侧尾部拖得很长; 而 S 接近 0 则可认为分布是对称的。若知道分布有可能在偏度上偏离正态分布时, 可用偏离来检验分布的正态性。

在实际计算中可以利用样本的 1 ~ 3 阶原点矩进行计算:

$$S(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] = \frac{E[(X-\mu)^3]}{\sigma^3} = \frac{EX^3 - 3\mu EX^2 + 3\mu^2 EX - \mu^3}{\sigma^3}$$

$$\frac{EX^3 - 3\mu EX^2 + 2\mu^3}{\sigma^3} = \frac{EX^3 - 3EXEX^2 + 2(EX)^3}{[EX^2 - (EX)^{2/2}]^{23/2}} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = E(X-EX)^2 = EX^2 - E^2X = EX^2 - \mu^2 \quad (5)$$

对于给定的信道冲激响应 $h(t)$, $|h(t)|$ 的 S 可以描述为

$$S = \frac{E[(|h(t)| - \mu_{|h|})^3]}{\sigma_{|h|}^3} \quad (6)$$

式中, $\mu_{|h|}$ 、 $\sigma_{|h|}$ 分别表示 $|h(t)|$ 的平均值和标准差。由式(4)可以看出, S 仅与样本值的 1 ~ 3 阶原点矩有关, 而在仿真过程中发现, 在不同信道状态下, S 差异性较大。通常, 在 LOS 状态下 S 的值要比在 NLOS 状态下的值大。由此可以看出, 在 LOS 状态下, 信道冲激响应偏离正态分布的状态更加严重, 由此确定 S 可以用来区分不同的信道状态。

3.2 算法实现

已有的区分 NLOS 状态的算法^[19]均是通过似然比检验的算法来区分 NLOS 状态, 本文中为了与已有的基于 K、MED、RMS、重要路径数目 (Number of Significant Path, NSP) 的 NLOS 状态识别算法进行比较, 仍旧采用似然比检验算法。进行似然比检验的过程中, 必须事先得到参数的概率密度分布函数, 如已有的基于 K、MED、RMS、NSP 的 NLOS 状态识别算法。

基于 NSP 的区分:

$$\frac{P_{\text{los}}^{\text{NSP}}(x)}{P_{\text{nlos}}^{\text{NSP}}(x)} \begin{cases} > 1 \rightarrow H_0 \\ < 1 \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (7)$$

基于 K 的区分:

$$\frac{P_{\text{los}}^{\text{K}}(y)}{P_{\text{nlos}}^{\text{K}}(y)} \begin{cases} > 1 \rightarrow H_0 \\ < 1 \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (8)$$

基于 MED 的区分:

$$\frac{P_{\text{los}}^{\text{MED}}(\tau)}{P_{\text{nlos}}^{\text{MED}}(\tau)} \begin{cases} > 1 \rightarrow H_0 \\ < 1 \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (9)$$

基于 RMS 的区分:

$$\frac{P_{\text{los}}^{\text{RMS}}(\gamma)}{P_{\text{nlos}}^{\text{RMS}}(\gamma)} \begin{cases} > 1 \rightarrow H_0 \\ < 1 \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (10)$$

已知上述参量的 PDF 均满足对数正态分布, 可以通过似然比检验的方法进行区分 LOS 与 NLOS 环境。设 $P_{\text{los}}^{\text{NSP}}(x)$ 、 $P_{\text{nlos}}^{\text{NSP}}(x)$ 、 $P_{\text{los}}^{\text{K}}(y)$ 、 $P_{\text{los}}^{\text{K}}(y)$ 、 $P_{\text{los}}^{\text{MED}}(\tau)$ 、 $P_{\text{los}}^{\text{MED}}(\tau)$ 、 $P_{\text{los}}^{\text{RMS}}(\gamma)$ 、 $P_{\text{nlos}}^{\text{RMS}}(\gamma)$ 分别表示各信道环境下

NSP、K、MED、RMS 在 LOS 与 NLOS 环境下的 PDF。

已知,若随机变量 X 服从正态分布,则 $\exp(X)$ 服从对数正态分布。为了验证信道冲激响应的 S 的分布规律,我们在 IEEE 802. 15. 4a 标准下,在各信道状态下分别产生 S 大量样本,对样本直方图进行曲线拟合(CM4 信道为例),如图 1 所示。

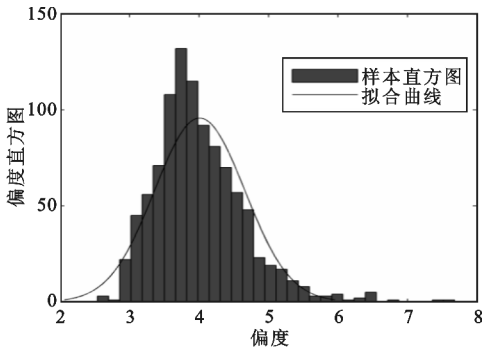


图 1 偏度拟合曲线
Fig. 1 The curve fitting line of skewness

图 1 中,直方图所表示的是偏度的样本值的分布情况,曲线表示的是对样本值直方图所做的对数正态分布的拟合曲线。为了进一步验证信道冲激响应 S 统计特性,我们又对各样本值取对数(即 $\ln(s)$)进行正态分布水平检验,显著性水平为 0. 05,如图 2 所示。图 2 中直线表示正态分布的累计分布函数,“+”部分表示样本值的累计分布函数。可以看出,偏度的样本值符合对数正态分布的概率超过了 95%,因此,可以认为信道冲激响应的偏度可以很好地拟合为对数正态分布的随机变量。

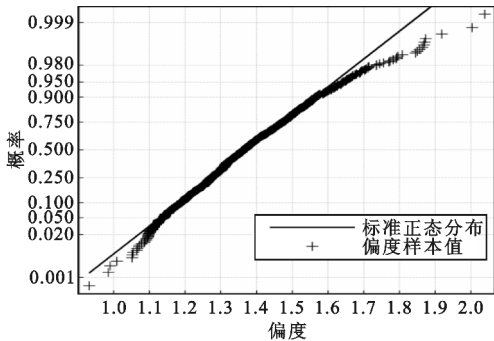


图 2 偏度正态分布检验
Fig. 2 Normal distribution test of skewness

信道冲激响应偏度的 PDF 可以建模为

$$f(s)=\frac{1}{s\sigma_s\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\ln(s)-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right)。(11)$$

式中, μ_s 、 σ_s 分别为 $\ln(s)$ 的平均值和标准差,拟合值分别见表 1。

表 1 在各信道模式下 S 的 PDF 拟合参量值
Table 1 The fitting parameter values of PDF for skewness in different channel model

信道模式	平均值	标准差
CM1	2. 310 6	0. 291 4
CM2	1. 767 9	0. 248 8
CM3	3. 017 9	0. 250 1
CM4	1. 321 9	0. 152 9
CM5	2. 457 9	0. 240 2
CM6	2. 400 6	0. 230 6
CM7	2. 297 4	0. 400 7
CM8	0. 779 4	0. 052 7

4 算法仿真与性能分析

已知 S 可以视为对数正态分布的随机变量,为验证 S 区分不同信道状态的有效性,我们根据表 1 中给出的各信道状态下的平均值与标准差,在 IEEE. 802. 15. 4a 信道模型下,分别得到室内家居环境(CM1(LOS)、CM2(NLOS))、室内工作环境(CM3(LOS)、CM4(NLOS))、室外环境(CM5(LOS)、CM6(NLOS))、工业环境(CM7(LOS)、CM8(NLOS))信道的冲激响应 S 的 PDF,如图 3~6 所示。

从图 3~6 可直观看出在 LOS 环境和 NLOS 环境下 S 值 PDF 都有很大差异,这种差异的存在意味着依靠 S 来区分 NLOS 环境是可行的。为对比本文提出的参量与传统参量的区分性能,将本文提出的方法与基于 K、MED、RMS 的 NLOS 环境区分算法进行比较。从文献[7]中可知,K、MED、RMS 的 PDF 均可拟合为对数正态分布。

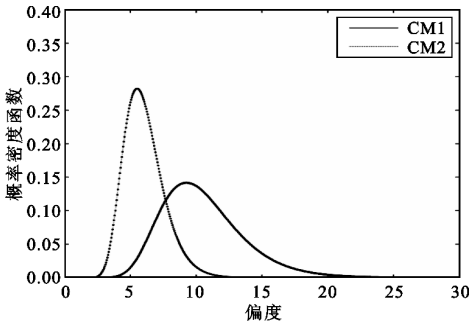


图 3 室内家居环境偏度的概率密度分布
Fig. 3 The PDF of skewness in indoor residential environment

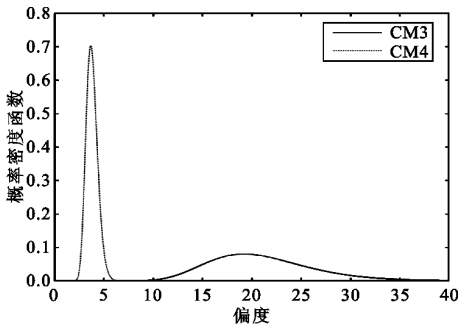


图 4 室内办公环境偏度的概率密度分布
Fig. 4 The PDF of skewness in indoor office environment

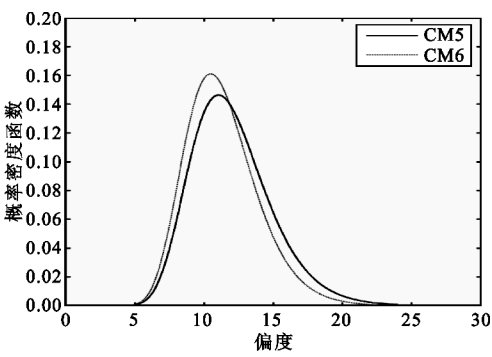


图5 室外环境偏度的概率密度分布
Fig.5 The PDF of skewness in outdoor environment

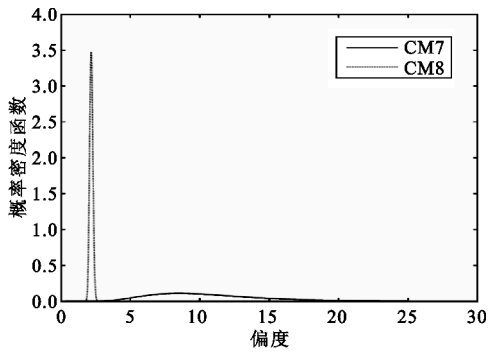


图6 工业环境偏度的概率密度分布
Fig.6 The PDF of skewness in industrial environment

本节将通过在 IEEE 802. 15. 4a 的 CM1 ~ CM8 信道下的仿真结果来说明第 3 节中所讨论的 NLOS

区分算法的性能。仿真中各信道模式均产生了 1000 个独立的信道冲激响应。

从所产生的 1000 个独立的信道冲激响应中分别得到各参量值,然后使用似然比检验方法来区分信道状态,最后将各种情况下的鉴别成功率总结为表 2。由表 2 可见,各区分算法在室内家居环境 (CM1 (LOS) 与 CM2 (NLOS)) 下的鉴别成功率均比在室内办公环境 (CM3 (LOS) 与 CM4 (NLOS)) 下的要低,原因是后者的信号传播环境更为复杂,信道冲激响应在 LOS 条件和 NLOS 条件下的差异更为明显,所以容易区分。在工业环境中 (CM7 (LOS) 与 CM8 (NLOS)) 由于环境更加复杂,各区分算法的结果几乎接近理想。各区分算法在相同环境下,可发现基于 K、MED、RMS 的 NLOS 环境区分算法均不如本文中所提的方法 (室外环境 (CM5 (LOS) 与 CM6 (NLOS)) 除外)。S 正确区分室内家居环境 (CM1/CM2) 的概率分别为 83. 38%、85. 22%, 正确区分室内办公环境 (CM3 (LOS)/CM4 (NLOS)) 的概率分别为 99. 99%、99. 99%, 正确区分工业环境 (CM7 (LOS)/CM8 (NLOS)) 的概率分别为 99. 99%、99. 99%。在这三种环境下,概率均达到最优。通过表 2 还可以发现,在单变量的信道状态区分算法中, S 正确区分信道状态的概率达到最优。在计算复杂度相当的情况下, S 可以得到更高的正确率。

表 2 各种方法正确区分信道状态的概率
Table 2 Probability of correctly distinguishing the channel state with various methods

算法	CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	CM7	CM8
MED	55. 94	75. 24	84. 14	94. 47	96. 67	96. 56	98. 98	99. 99
RMS	52. 59	82. 84	71. 65	91. 15	94. 82	92. 11	98. 99	99. 85
NSP	75. 25	82. 59	84. 99	89. 13	82. 71	85. 04	99. 99	99. 91
K	80. 52	84. 55	97. 83	98. 31	72. 55	62. 77	99. 05	99. 87
S	83. 38	85. 22	99. 99	99. 99	48. 29	61. 51	99. 95	99. 99
K-RMS	71. 53	81. 16	90. 33	96. 70	89. 20	87. 89	99. 96	99. 90
MED-RMS	60. 49	84. 47	89. 30	97. 02	98. 94	92. 37	99. 99	99. 99
K-MED-NSP	80. 50	84. 10	99. 80	99. 30	94. 60	91. 40	99. 99	99. 99
K-NSP-RMS	82. 80	85. 40	99. 99	99. 99	92. 90	97. 00	99. 99	99. 99
K-MED-RMS	80. 10	87. 00	99. 99	93. 30	97. 92	98. 20	99. 99	99. 99

5 结束语

在室内 UWB 定位系统中, NLOS 传播是降低通

信与定位精度可靠性的主要原因, 当前解决 NLOS 传播问题主流思路是对 NLOS 环境进行区分, 然后

在定位程序中融入鉴别结果,从而使定位精度得到改善。已有的 NLOS 区分算法或者以节点的移动性为前提,不适合节点静止的无线通信网络,或者需要先验已知信息,实际应用的局限性很大。为了更好地区分 NLOS 环境,提高定位精度,我们提出了基于偏度的 NLOS 区分算法。该算法与同类型单变量 NLOS 区分算法相比,在计算复杂度相当的情况下,可以提高正确区分 NLOS 环境的概率。与同类型多变量 NLOS 区分算法相比,在得到相似准确率的同时,可以简化运算、提高效率。但 S 在区分室外环境 ($CM5(LOS)/CM6(NLOS)$) 时正确率比较低,这是在以后的研究过程中需要深入研究和改进的,力争得到更加准确的 NLOS 状态识别算法。但是在室内环境中,实验结果表明,基于偏度的 NLOS 区分算法是有效可行的。

参考文献:

- [1] Oguz Y, Kaya H. A linear signal combination model for UWB applications[C] //Proceedings of 2014 Signal Processing and Communications Applications Conference. Trabzon:IEEE,2014: 23–25.
- [2] Khodjaev J, Park Y, Mail A S. Survey of NLOS identification and error mitigation problems in UWB-based positioning algorithms for dense environments[J]. Ann Telecommunication,2010,65(5–6): 301–311.
- [3] Heidari M, Akful F O, Pahlavan K. Identification of the absence of direct path in indoor localization systems[C]//Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Athens, Greece:IEEE,2007:1–6.
- [4] YU Kegen, GUO Y J. NLOS error mitigation for mobile location estimation in wireless networks[C] //Proceedings of Vehicular Technology Conference. Dublin:IEEE,2007: 1071–1075.
- [5] Venkatesh S, Buehrer R M. NLOS mitigation using linear programming in UWB location-aware networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 3182–3198.
- [6] Wann C D, Hsueh C S. NLOS mitigation with biased Kalman filters for range estimation in UWB systems[C] //Proceedings of IEEE Region 10 Conference on TENCON. Taipei, Taiwan:IEEE,2007:1–4.
- [7] 黄梦雅,丁召,胡明哲. UWB 天线的宽带化技术及其发展[J]. 电讯技术,2014,54(2):236–244.
HUANG Mengya, DING Zhao, HU Mingzhe. Ultra-wide Band Technology and its Development of UWB Antennas[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(2): 236–244. (in Chinese)
- [8] 张士杰,王丹. 修正 Kalman 滤波多带 UWB 信道估计改进方法[J]. 电讯技术,2014,54(5):632–636.
ZHANG Shijie, WANG Dan. An Improved Channel Estimation Method Based on Modified Kalman Filtering for MB UWB Systems[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(5): 632–636. (in Chinese)
- [9] Guvenc I, Chong C C, Watanbe F. NLOS identification and mitigation for UWB location systems[C] //Proceedings of 2007 Wireless Communications and Networking Conference. Hong Kong:IEEE,2007:1571–1576.
- [10] Venkatesh S, Buehrer R M. NLOS identification in UWB location-aware networks based on received signal statistic[J]. Microwaves & Propagation,2007(6):1120–1130.
- [11] LI W J, ZHANG T T, ZHANG Q Y. Experimental researches on an UWB NLOS identification method based on machine learning[C] //Proceedings of 15th IEEE International Conference on Communication Technology. Guilin:IEEE,2013: 473–477.
- [12] Tabaa M, Diou C, Ei AM, et al. LOS and NLOS identification based on UWB stable distribution[C]//Proceedings of 25th International Conference on Microelectronics. Beirut:IEEE,2013:1–4.
- [13] TIAN S W, ZHAO L W, LI G X. A Support Vector Data Description Approach to NLOS Identification in UWB Positioning[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering,2014(2014):1–6[2014–12–20]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/963418>.
- [14] YU K G, Dutkiewicz E. NLOS Identification and Mitigation for Mobile Tracking[J]. Aerospace and Electronic Systems,2013,49(3): 1438–1452.
- [15] 吴绍华,张钦宇,张乃通. IR-UWB 测距中 NLOS 状态的鉴别[J]. 电子与信息学报,2008,30(11):2541–2546.
WU Shaohua, ZHANG Qinyu, ZHANG Naitong. NLOS Identification for IR-UWB Ranging Systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2008,30(11): 2541–2546. (in Chinese)
- [16] ZHANG H, CUI X R, Gulliver T A. Threshold Selection for TOA Estimation based on Skewness and Slope in Ultra-wideband Sensor Networks[J]. Lecture Notes in Computer Science,2012,69(5): 503–513.
- [17] Mabrouk M, Rajan S, Bolic M, et al. Detection of human targets behind the wall based on singular value Decomposition and skewness variation[C]//Proceedings of 2014 Radar Conference. Cincinnati:IEEE,2014:1466–1470.
- [18] Samonds J, Potetz B, Lee T. Sample Skewness as a Statistical Measurement of Neuronal Tuning Sharpness[J]. Neural Computation,2014,26(5): 860–906.
- [19] Khodjaev J, Park Y, Choi J. A novel UWB channel iden-

tification parameter for indoor positioning applications [J]. Annals of Telecommunications Annalesdes Telecommunications,2011,66(9-10):501-506.

作者简介:



张 浩(1975—),男,江苏人,2004 年于加拿大维多利亚大学获电子与计算机工程专业博士学位,现为教授、博士生导师、维多利亚大学客座副教授,主要研究方向为 UWB 无线通信、60 GHz无线通信和 MIMO 通信;

ZHANG Hao was born in Jiangsu Province,in 1975. He received the Ph. D. degree in Electrical and Computer Engineering from the University of Victoria,Canada in 2004. He is now a guest assistant professor in the Department of Electrical and Computer Engineering University of Victoria,and also a professor and the Ph. D. supervisor in College of Information Science and Engineering, Ocean University of China. His research concerns ultra-wideband radio systems,60 GHz wireless communication system and MIMO wireless communication.

梁晓林(1987—),男,山东烟台人,现为中国海洋大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为 UWB 无线通信和60 GHz无线通信;

LIANG Xiaolin was born in Yantai,Shandong Province,in 1987. He is now a graduate student. His research concerns ultra-wideband radio systems and 60 GHz wireless communication system.

Email:xiaolin87liang@ 163. com

吕婷婷(1983—),女,山东青岛人,2013 年于中国海洋大学信息科学与工程学院获博士学位,现为讲师,主要研究方向为 UWB 无线通信和60 GHz无线通信;

LYU Tingting was born in Qingdao,Shandong Province,in 1983. She received the Ph. D. degree in College of Information Science and Engineering from Ocean University of China in 2013. She is now a lecture. Her research concerns ultra-wideband radio systems and 60 GHz wireless communication system.

徐凌伟(1987—),男,山东高密人,2012 年于中国海洋大学信息科学与工程学院获硕士学位,现在博士研究生,主要研究方向为 MIMO 通信和60 GHz无线通信。

XU Lingwei was born in Gaomi, Shandong Province, in 1987. He received the M. S. degree in College of Information Science and Engineering from Ocean University of China in 2012. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns MIMO wireless communication and 60 GHz wireless communication system.