

文章编号:1004-9037(2014)03-0397-06

基于接收信号强度的非视距检测与修正算法

赵泰洋 郭成安

(大连理工大学电子信息与电气工程学部,大连,116024)

摘要:为了减少非视距(Non-light of sight, NLOS)误差对基于到达时间(Time of arrival, TOA)的无线定位系统性能的影响,本文提出一种采用接收信号强度(Received signal strength, RSS)与 TOA 测量值相结合的方法对含有 NLOS 误差的 TOA 测量值进行检测并修正。在视距(Light of sight, LOS)传播的 TOA 与 RSS 之间关系已知的前提下,利用定位基站得到的 TOA 与 RSS 测量值,计算 TOA 测量值中含有 NLOS 误差的可能性,并对 TOA 测量值进行修正。该方法在不增加通信次数的情况下,大大提高了定位精度。最后在一个无线定位系统上实现了该算法,并进行了对比实验。实验结果表明,该算法不需对多次定位结果进行统计,即可有效降低 NLOS 误差对系统性能的影响,适用于对功耗要求苛刻的场合。

关键词:无线定位;非视距检测;到达时间;接收信号强度

中图分类号:TP958.97

文献标志码:A

NLOS Detection and Mitigation Algorithm Using Received Signal Strength

Zhao Taiyang, Guo Chengan

(Faculty of Electronic & Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China)

Abstract: A new algorithm is proposed for detecting and mitigating non-light of sight(NLOS) error in a time of arrival(TOA) based wireless positioning system. Received signal strength (RSS) is employed to detect whether a TOA value contains NLOS error and mitigate it. When the relationship between TOA and RSS in light of sight (LOS) situation is known, a possibility of NLOS can be calculated using the TOA & RSS measurement results which are provided by a base station. Then the TOA measurement results can be trimmed using the possibility mentioned above. Finally, the algorithm is implemented in a wireless positioning system. Experiment results show that the algorithm can mitigate the effect of NLOS without increasing times of measurements.

Key words: wireless positioning; non-light of sight detection; time of arrival; receive signal strength

引 言

在基于到达时间(Time of arrival, TOA)的定位系统中,当移动节点与定位基站间存在障碍物时,无线信号只能以非视距(Non-light of sight, NLOS)方式传播。在这种情况下基站得到的 TOA 值就会存在 NLOS 误差。NLOS 误差已成为影响无线定位系统定位性能的一项重要因素。随着移动节点所处环境的变化,NLOS 误差呈现不

同的分布^[1],因此如何减少其对定位性能的影响已成为当前的一个研究热点。现有的 NLOS 误差处理算法,大多分成两个步骤:(1)对 TOA 测量结果进行检测,判断其中是否含有 NLOS 误差;(2)采用一定的方法对含有 NLOS 误差的 TOA 值进行修正,减小 NLOS 误差的影响。

对于 TOA 值中 NLOS 的检测,常用的方法可分为两类:(1)对一系列 TOA 值进行分析的方法,如文献[2-4]中,分析采集到的多个 TOA 值的概率分布函数,文献[5]采用对多个 TOA 值进行平

滑处理的方法检测 NLOS 误差。文献[2-5]的方法都需要短时间内多次测量 TOA 值,这样会大大增加移动节点的功耗,这与移动节点的小体积、低功耗的要求是矛盾的。文献[6-7]提出了一种迭代残差法,该方法适用于提供 TOA 值的基站数量大于最少基站数的情况,当参与定位的基站数量较少时体现不出其优势。文献[8,9]针对超宽带(Ultra wide bandwidth,UWB)系统提出了一种基于多径分量统计特性的 NLOS 检测方法,但该方法不适用于传统的调制通信系统。

另一类就是采用 TOA 与其他信号参量(如波达方向,信号强度)进行数据融合的方法^[10-12]。因为采用了另一个维度的信息,有可能得到更好的结果。但这类方法其计算量通常也要大于第 1 种方法。对于含有 NLOS 误差的 TOA 值,文献[5-7]直接放弃含有 NLOS 误差的 TOA 值,这种方法适用于有多个可选 TOA 值的情况,但当移动节点附近基站较少时,无法采用这种方法。在这种情况下常采用 Kalman 滤波^[2-4]或加权最小二乘法^[8]抑制 NLOS 误差。

本文提出一种采用(Receive signal strength,RSS)与 TOA 数据融合的方法,通过检测 RSS 的变化程度来修正 TOA 测量值。该方法首先利用 TOA 测量值与 RSS 值之间的关系,得出该 TOA 测量值中存在 NLOS 误差的可能性。之后根据该可能性的大小对 TOA 测量值进行修正,最后用修正后的 TOA 值进行定位。实际应用结果表明,本文提出的算法与单纯基于 TOA 的定位方法相比,可有效地抑制 NLOS 对 TOA 值的影响,从而提高定位精度。

1 系统模型

本文讨论的基于 TOA 的无线定位系统中,基站与移动节点通信,在通信过程中获取移动节点到基站的 TOA 和基站接收信号的 RSS。在 LOS 信道环境下的 TOA 测量值为

$$T = T_0 + t_e \quad (1)$$

对于 NLOS 信道环境

$$T = T_0 + t_{\text{NLOS}} + t_e \quad (2)$$

式中: T_0 为移动节点和基站间电波的视距传播时间, t_e 为由 TOA 测量系统引起的均值为零的高斯随机变量。 t_{NLOS} 为由 NLOS 所引起的附加时延,是一个均值大于零的随机变量。

对于 RSS,参照文献[13]中的公式,可得到 LOS 信道的 RSS 值表示为

$$\text{RSS}_{\text{LOS}}(d) = P_0 - P_{\text{LOS}}(d) - e \quad (3)$$

NLOS 信道的 RSS 值表示为

$$\text{RSS}_{\text{NLOS}}(d) = P_0 - P_{\text{LOS}}(d) - P_{\text{NLOS}} - e \quad (4)$$

式中: P_0 为移动节点的发射功率; $P_{\text{LOS}}(d)$ 为信号在空气中的传播损耗,是一个与传播距离有关的量; e 为测量误差,是一个均值为零的高斯随机变量; P_{NLOS} 为在 NLOS 传播过程中信号在反射点的反射损耗,是一个均值为正的随机变量。

2 算法描述

2.1 NLOS 误差检测

在本文讨论的定位系统中,假设移动节点与某一基站间距离为 d_0 ,在视距(Light of sight,LOS)传播时,对应的 TOA 值为 T_0 。对于 NLOS 传播的情况,当信号经过反射后,信号的传播路程为 d ,对应 TOA 值为 T 。显然 d 大于 d_0 , T 大于 T_0 。此时测得的信号强度为 RSS_{NLOS} 。根据式(3)可以计算出 LOS 传播情况下距离为 d 时,基站接收信号强度为 RSS_{LOS} 。定义这两种情况下的接收信号强度的变化量为 ΔRSS ,即

$$\Delta\text{RSS} = \text{RSS}_{\text{LOS}} - \text{RSS}_{\text{NLOS}} \quad (5)$$

从式(3,4)可知,理论上这个差值 ΔRSS 即是反射损耗 P_{NLOS} ,为一个非负的值。在实际应用中,由于测量误差的存在,该差值有可能为一个绝对值较小的负数。

ΔRSS 可以反应信号的传播状态, ΔRSS 越大,说明信号在传播过程中附加损耗越大,即存在 NLOS 传播的可能性就越大。由于无线传播环境的复杂性,很难给出一个阈值来准确判断一个 TOA 测量值中是否含有 NLOS 误差,因此采用软判决的方法,定义一个反映存在 NLOS 可能性的参数 R_{NLOS} 如下

$$R_{\text{NLOS}} = \begin{cases} 0 & \Delta\text{RSS} < 0 \\ \frac{\Delta\text{RSS}}{R_0} & 0 < \Delta\text{RSS} < R_0 \\ 1 & \Delta\text{RSS} > R_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_0 为一个归一化因子,其值与系统的具体工作环境有关。

2.2 采用 RSSI 值对含有 NLOS 误差的 TOA 值进行修正

对于 2.1 节讨论的 NLOS 测距,若能找到 ΔRSS 与 t_{NLOS} 之间的关系,即可在一定程度上消除 NLOS 对 TOA 测量值的影响。但由于移动节点的位置及周围环境有极大的不确定性,不可能找到

一个确定的函数关系从 ΔRSS 精确解出 t_{NLOS} 。然而通过对大量实验数据的分析,发现 NLOS 误差与 ΔRSS 之间有一定的统计关系。例如,NLOS 误差的均值与 ΔRSS 有一定的相关性。利用这一相关性,设法得到二者之间的统计关系,从而可以对 TOA 测量值进行修正,以降低 NLOS 误差对 TOA 测量结果的影响。

根据这一思路,本文设计一个具体实现的算法。该算法分为统计学习和误差修正两个步骤。

在统计学习步骤中,设法得到定位系统中无线信号的传播特性,该步骤的具体算法如下:

(1)确定出无线信号在 LOS 传播情况下的信号强度与传播距离之间的关系,即式(3)的具体表达式。

(2)对于不同的 ΔRSS ,通过测试实验,计算出 t_{NLOS} 的均值 M_{NLOS} ,用于后续对 TOA 测量值的修正。 M_{NLOS} 可表示为

$$M_{\text{NLOS}} = E(t_{\text{NLOS}} | \Delta\text{RSS}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_{\text{NLOS}}(k) \quad (7)$$

式中: N 为测试次数。

在误差修正步骤中,当基站测量得到一组 TOA 值和 RSS 值后,采用下面的算法对 TOA 值进行修正:

(1)利用式(3)计算出 LOS 情况下对应 TOA 测量值的 RSS 值 RSS_{LOS} 。

(2)按式(5)计算 RSS_{LOS} 和 RSS 测量值的差值 ΔRSS 。

(3)利用该组 ΔRSS 和式(7)计算出均值 M_{NLOS} 。

(4)对 TOA 测量值进行修正:从 TOA 测量值中减去 M_{NLOS} ,得到修正后的 TOA 值。

3 算法实现

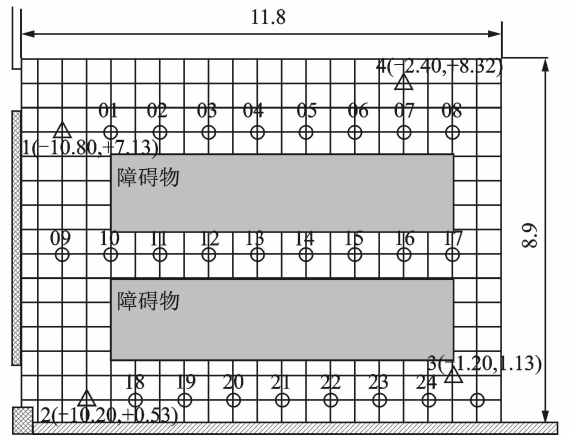
为了考查本文提出的算法性能,本文设计了一个基于 NanoPAN 扩频测距模块的室内无线定位实验系统。NanoPan 测距模块是由 Nanotron 公司生产的一款工作于 2.45 GHz 频段的射频通信模块,采用 Chirp 扩频调制,通信带宽最大为 80 MHz。该模块采用对称双边双路测距方式。该方式利用测量数据包在两个模块间进行双向传输的时间来计算 TOA。这种方式不需要两个节点的时钟同步,降低了对硬件时钟的要求。除 TOA 外,该模块还提供接收机中可变增益放大器(Variable gain amplifier, VGA)的放大倍数。该 VGA 采用自动增益控制(Automatic gain control,

AGC),使输出信号强度 P 基本保持不变,所以可以从 AGC 值(即 VGA 的放大倍数)计算出接收信号强度 RSS 来,即

$$\text{RSS} = 10 \text{Log}_{10} \frac{P}{\text{AGC}} \quad (8)$$

该实验系统采用基于基站的定位方式。基站与移动节点均采用 NanoPan 作为射频通信模块。移动节点在与基站通信的过程中,基站可得到移动节点到基站的 TOA 和此时基站接收机中的 AGC 值。然后基站将这两个信息通过网络传输给数据处理中心,计算出修正后的 TOA 值。采用同样的方法,利用多个基站提供的 TOA 值,然后采用多维标度法(Multidimensional scale, MDS)^[14]对移动节点进行定位。

该实验安排在一个长 11.8 m,宽 8.9 m 的房间中进行。房间一面是玻璃窗,3 面是混凝土的墙壁。房间内部有大量高约 1.2 m 的木制障碍物(工作台),这些障碍物对于中间的测试点会造成 NLOS 问题。该实验场景如图 1 所示。图 1 中三角形为基站所在位置,圆圈为移动节点的测试位置。



注: Δ 基站位置, \circ 移动节点的测试位置。

图 1 实验场景分布图

Fig. 1 Configuration of experiment environment

在实际应用问题中,第 1 节中给出的 TOA 测量模型(即式(3,4))所涉及的函数关系及其参数都是未知,因此并不能直接用来计算 RSS 与 TOA 之间的关系。针对该问题,本文通过 2.2 节给出的统计学习算法步骤,以实测方式来近似得到 RSS 与 TOA 的关系,进而利用式(7)计算出 t_{NLOS} 的均值参数 M_{NLOS} 。

对于该统计算法的具体实施,考虑到 NanoPan 通信模块提供的是 TOA 值和 AGC 值,为了减小计算量,本实验直接采用 AGC 值进行判断。

在此情况下,式(3)可修正为

$$G(T_d) = G_d \quad (9)$$

式中: G_d 为距离为 d 时基站接收机中放大器的放大倍数。这时根据式(7),式(5)则修正为

$$\Delta \text{RSS} = 10 \text{Log}_{10} \frac{G_d'}{G_d} \quad (10)$$

式中: G_d' 为实际的 AGC 测量值。

为了得到式(9)所描述 AGC 值与距离之间关系的解析表达式,本文设计了如下实验测试步骤:在无遮挡的环境下,测量出移动节点处于不同位置时基站得到的 TOA 和 AGC 值。在该实验中,每个位置做 50 次测量。然后对 50 次测量结果取 α 均值^[15],即将 50 次实验结果按由小到大的顺序排列,之后取中间的 30 个值的均值作为实验测试值。图 2 所示的结果(图中的黑点)即为实验所得到的 AGC 值的 α 均值。

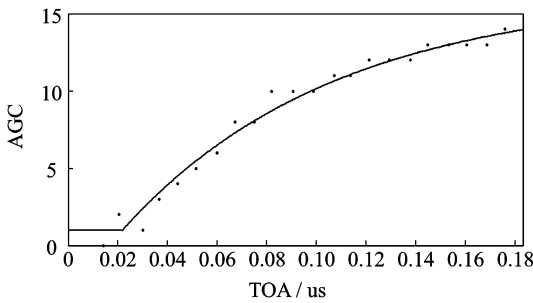


图 2 直达波的 TOA 值与 AGC 值之间的关系

Fig. 2 Relationship between TOA & AGC of LOS signal

在得到实测数据后,本文进一步采用指数函数对实验数据进行拟合,以此来得到 TOA 值 t 与 AGC 值 G_d 之间的解析表达式。在本文的实验中,最后的拟合结果如式(11)所示

$$G(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < 0.0217 \\ 16.3 - 19.8e^{-12t} & t \geq 0.0217 \end{cases} \quad (11)$$

图 2 中的连续曲线即为该拟合函数所给出的曲线。

在得到 LOS 情况下 TOA 值与 AGC 值的关系之后,下一项工作是获得 ΔRSS 与 t_{NLOS} 之间的统计关系,即式(7)的统计表达式。根据图 1 所示的实验环境,取单数号的节点位置作为测试采样点,每个点进行 30 次实验,记录基站得到的 TOA 值和 AGC 值。图 3 给出了室内测量得到的 ΔRSS 与测距误差 t_{NLOS} 的实验结果,在本实验中对该组实验数据进一步采用多项式拟合的方法得到了 ΔRSS 与测量误差均值 M_{NLOS} 间的近似解析表达式 $M_{\text{NLOS}}(\Delta \text{RSS}) = -0.0041\Delta \text{RSS}^4 + 0.086\Delta \text{RSS}^3 -$

$$0.60\Delta \text{RSS}^2 + 1.6\Delta \text{RSS} + 0.38 \quad (12)$$

图 3 中的各个圆圈为各次实验的实测结果,连续曲线则是通过多项式拟合方法获得的解析表达式。

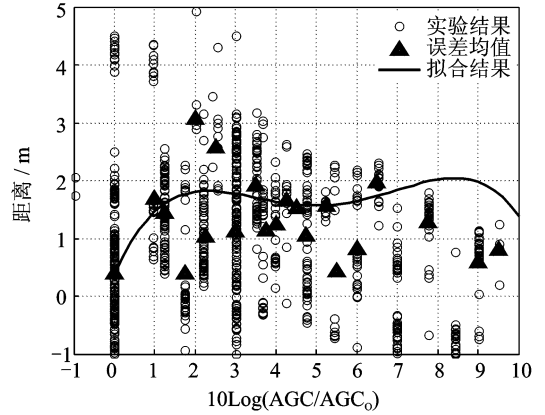


图 3 ΔRSS 与测距误差的关系

Fig. 3 Relationship between ΔRSS & ranging error

4 实验结果

4.1 TOA 修正实验

该实验仍然在如图 1 所示的实验环境中进行。实验中采用一个移动节点在不同位置与某一基站通信,得到移动节点到达该基站信号的 TOA 值和 AGC 值。然后采用本文在 2.2 节中给出的误差修正算法对 TOA 值进行修正。

在此次实验中,移动站分别在如图 1 所示的位置 2,3,11,13,15,18 及 21 号 7 个位置与基站 2 进行通信,每个位置通信 30 次。图中每个位置的数据是 30 次实验的平均结果。表 1 是未采用本文修正方法的测量结果,表 2 是采用了本文修正方法的最终结果。对比表 1 与表 2,可见后者的测量误差较前者有明显的改善。

表 1 未采用本文修正方法的 TOA 测量结果 ns

Table 1 Results of TOA measurement without correction

| 位置 | 2 | 3 | 11 | 13 | 15 | 18 | 21 |
|---------|------|------|------|------|------|-----|------|
| TOA 真实值 | 22.8 | 24.1 | 13.9 | 18.4 | 25.0 | 5.3 | 14.4 |
| TOA 测量值 | 28.6 | 29.4 | 16.1 | 24.0 | 28.3 | 6.3 | 17.9 |
| 测量误差 | 5.8 | 5.3 | 2.2 | 5.6 | 3.3 | 1.0 | 3.5 |

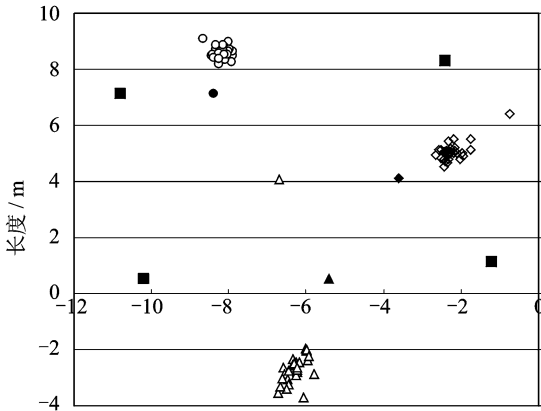
表 2 采用本文修正方法的 TOA 测量结果 ns

Table 2 Result of TOA measurement with correction

| 位置 | 2 | 3 | 11 | 13 | 15 | 18 | 21 |
|---------|------|------|------|------|------|-----|------|
| TOA 真实值 | 22.8 | 24.1 | 13.9 | 18.4 | 25.0 | 5.3 | 14.4 |
| TOA 测量值 | 26.5 | 26.4 | 13.9 | 21.4 | 26.9 | 5.3 | 16.0 |
| 测量误差 | 3.7 | 2.3 | 0 | 3.0 | 1.9 | 0 | 1.6 |

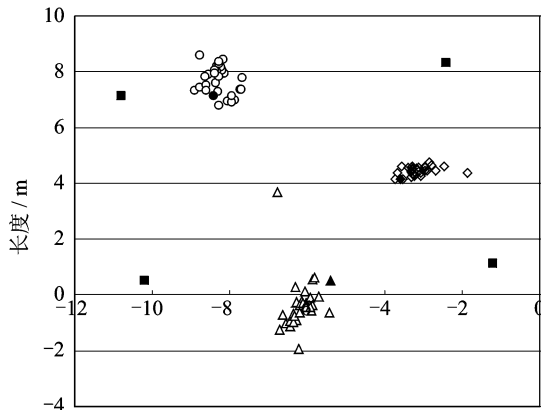
4.2 定位实验

本文还进行了定位实验。图 4 给出了移动节点分别在 2 号,15 号和 21 号位置处各 30 次未采用及采用 RSS 的定位实验结果。



注: ○位置2的估计 ●位置2的实际位置 ◇位置15的估计
◆位置15的实际位置 △位置21的估计 ▲位置21的实际位置
■基站

(a) 未采用RSS补偿的室内定位结果
(a) Test result without RSS compensation



注: ○位置2的估计 ●位置2的实际位置 ◇位置15的估计
◆位置15的实际位置 △位置21的估计 ▲位置21的实际位置
■基站

(b) 采用RSS补偿的室内定位结果
(b) Test result with RSS compensation

图 4 两种定位算法的室内定位结果

Fig. 4 Results of positioning method with and without RSS compensation

表 3 给出了各个位置上的具体实验结果。表中的数据为平均定位误差,即 30 次实验的定位结果与真实位置距离之差的平均值。从表 3 中可见,除了位置 11 外,对其他各个位置,本文提出的采用 RSS 补偿的 TOA 定位方法的定位精度都比直接采用 TOA 值定位的结果要好。对于位置 11,采用本文算法的定位结果略微逊于直接定位算法。因为在 11 号位置处,虽然与基站之间存在障碍物,但无

线信号并没有产生反射,而是穿过了障碍物。这样造成了 TOA 测量值误差不大的情况下,RSS 值却有了较大的衰减。所以在进行 TOA 误差修正时,跟据 RSS 的衰减对 TOA 值进行了较大的修正,使修正结果的误差大于实测值的误差,这样就造成了该处修正效果不佳,但这时二者定位误差均比较小,本文算法并未造成明显的不利影响,而从总体的实验结果来看,这种补偿算法还是比较有效的。

表 3 两种定位方法的平均定位误差比较

Table 3 Mean positioning error of two positioning methods

| 位置 | 2 | 3 | 11 | 13 | 15 | 18 | 21 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 无修正 | 1.48 | 1.54 | 0.26 | 2.68 | 1.66 | 1.80 | 2.74 |
| 本文算法修正后 | 0.76 | 1.03 | 0.55 | 1.75 | 0.60 | 1.26 | 1.37 |

5 结束语

本文针对无线定位系统中的 NLOS 问题,提出了一种采用 RSS 对 TOA 值进行补偿的算法,该算法计算复杂度较低,在不增加通信次数的前提下,可提高定位精度。文中采用实验方式在室内环境下实现了该算法,给出了一套具体的算法实施方案,并进行了大量定位实验,实验结果表明该算法是有效的。

参考文献:

[1] Wang Wei, Jost T, Fiebig U C. Characteristics of the NLOS bias for an outdoor-to-indoor scenario at 2.45 GHz and 5.2 GHz [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 1127-1130.

[2] 黄耀光,高博,李建新,等.基于平方根 UKF 双向滤波的单站无源定位算法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 1-7.
Huang Yaoguang, Gao Bo, Li Jianxin, et al. Square-Root UKF with forward-backward filtering for single-observer passive location [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(2): 1-7.

[3] Guan Weiguo, Deng Zhongliang, Yu Yanpei, et al. A NLOS mitigation method for CDMA2000 mobile location system[C]// 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. Beijing, China: IEEE, 2010: 668-672.

[4] 耿剑,张玲华.一种基于修正卡尔曼滤波的蜂窝定位算法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 1-7.
Geng Jian, Zhang Linghua. A cellular location method based on modified kalman filter[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(2): 1-7.

[5] Riba J, Urruela A. A non-line-of-sight mitigation technique based on ML-detection[C]// ICASSP '04.

- Montreal, Quebec, Canada; IEEE, 2004, 2:153-156.
- [6] Chen Pi chun. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation [C] // WCNC 1999 IEEE. [S. l.]: IEEE, 1999; 316-320.
- [7] Fukuda K, Okamoto E. Performance improvement of TOA localization using IMR-based NLOS detection in sensor networks [C] // ICOIN 2012. Bangkok, Thailand: [s. n.], 2012: 13-18.
- [8] Ismail G, Chong Chia-Chin, Watanabe F. NLOS identification and mitigation for UWB localization systems [C] // WCNC 2007. Hong Kong, China: [s. n.], 2007: 1573-1578.
- [9] Guvenç I, Chong C C, Watanabe F, et al. NLOS identification and weighted least squares localization for UWB systems using multipath channel statistics [J]. *Advances in Signal Processing*, 2008, 1: 1-14.
- [10] Wang Z, Zekavat S. Omni-Directed mobile NLOS identification and localization via multiple cooperative nodes [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 11(12): 1-25.
- [11] 毛永毅, 李明远, 张宝军. 一种 NLOS 环境下的 TOA/AOA 定位算法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 37-40.
Mao Yongyi, Li Mingyuan, Zhang Baojun. A TOA/AOA location algorithm in NLOS environment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 37-40.
- [12] Wann ChinDer, Chin HaoChun. Hybrid TOA/RSSI wireless location with unconstrained nonlinear optimization for indoor UWB channels [C] // WCNC 2007. Hongkong, China: [s. n.], 2007: 3940 - 3945.
- [13] Wang Qinghua, Balasingham I, Zhang Miaomiao, et al. Improving RSS-Based ranging in LOS-NLOS scenario using GMMs [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(10): 1065-1067.
- [14] 陈璋鑫. LOS/NLOS 无线定位方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
Chen Zhangxin. Research on wireless localization in LOS/NLOS environments [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [15] Bednar J B, Watt T L. Alpha-trimmed means and their relationship to median filters [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1984, 32(2): 145-153.
- 作者简介:**赵泰洋(1979-),男,博士研究生,研究方向:无线定位、无线通信, E-mail: taiyang@dlut.edu.cn; 郭成安(1955-),男,教授,博士生导师,研究方向:数字信号处理、数字图像处理与识别、智能计算。