

基于圆盘散射体的非视距定位算法*

王睿, 杨晓峰, 彭力

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

通讯作者: 王睿, E-mail: maxieewong@gmail.com

摘要: 针对无线传感器网络目标定位中的非视距问题, 为了抑制非视距误差, 提高定位精度, 提出一种基于圆盘散射体的非视距定位算法. 新算法根据基站收到的多径到达时间, 计算加权测量均值, 与圆盘散射体模型理论均值进行匹配, 建立目标函数, 同时引入圆盘半径约束, 通过对目标函数求取极值, 解出含有目标位置的最优解. 仿真实验结果表明, 与其他目标定位算法相比, 该算法能够得到全局最优解, 提高非视距环境下的定位精度.

关键词: 非视距; 圆盘散射体模型; 定位; 无线传感器网络

中文引用格式: 王睿, 杨晓峰, 彭力. 基于圆盘散射体的非视距定位算法. 软件学报, 2015, 26(Suppl. (1)): 1-7. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15001.htm>

英文引用格式: Wang R, Yang XF, Peng L. NLOS mitigation location method based on scatterers model. Ruan Jian Xue Bao/ Journal of Software, 2015, 26(Suppl. (1)): 1-7 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15001.htm>

NLOS Mitigation Location Method Based on Scatterers Model

WANG Rui, YANG Xiao-Feng, PENG Li

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To address the non-line-of-sight (NLOS) issue in the field of target location of wireless sensor network, a target location algorithm based on the disk of scatterers model in NLOS environment is proposed to mitigate the NLOS error. The new algorithm utilizes the weighted measurement mean value of the measurements of multipath time of arrives received by base stations and matches it to the theoretical mean value of the disk of scatterers model to establish the target function. Meanwhile, disk radius constraint is introduced to the target function. Through searching the extreme value of target function, an optimal solution contains the location of target can be obtained. Simulation experiments show that compared with other target location algorithms, the presented algorithm can obtain the global optimal solution and improve the positioning accuracy under NLOS environment.

Key words: non-line-of-sight (NLOS); disk of scatterers model; location; wireless sensor network (WSN)

无线传感器网络(wireless sensor network, 简称 WSN), 由随机散布在检测地区内的大量传感器节点构成, 节点间自组织网络, 具备实时检测、数据采集、数据传输、分布式处理等功能, 已被广泛应用于交通、环境、抗灾、制造等领域. 目标定位是 WSN 的主要应用之一, 其目的是将多个无线传感器节点通过对目标物体状态信息的采集, 对采集数据进行融合计算, 最终得到目标在空间中所处的位置. 目标物体的状态信息包括到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)、到达角(AOA)、信号强度(RSSI)等. 目标定位问题实质上是一个多参数估计问题, 通常使用搜索算法进行求解^[1,2].

在实际的 WSN 目标定位中, 无线信道环境并不理想, 信号在传输过程中无法直达, 会发生折射与反射, 产生非视距(non-line-of-sight, 简称 NLOS)误差, 严重影响定位性能. 现代 3G 移动通信系统率先在标准中制定定位策略, 成为一种新的室外 WSN 定位方式. NLOS 问题已成为在现实环境中阻碍精确定位的关键性挑战之一^[3]. 对于

* 基金项目: 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2013015-33, BY2014024, BY2014023-362014, BY2014023-25)

收稿时间: 2015-04-15; 定稿时间: 2015-07-20

NLOS 情况下的目标定位问题,目前常用的方法有 NLOS 路径识别去除法(NLOS path identifying and discarding)^[4]、NLOS 误差先验分布法(prior knowledge regarding the distribution of NLOS bias)^[5]、测量概率密度修正(PDF of measurement refining)^[6]、线性规划(linear program-ming)^[7]、散射体模型法(scatterers model)^[8]等.散射体模型法是近年发展出来的抑制 NLOS 误差的一种新思路.其主要思想是直接对 NLOS 问题进行建模,将不确定的 NLOS 误差转化为确定的模型参数,将 NLOS 误差的统计特性固有地嵌入到模型自身中,对散射体模型的统计特性进行参数估计.

本文在分析研究现有算法的基础上,提出了基于圆盘散射体的非视距定位算法.基站测得 NLOS TOA 测量值之后,求取加权修正均值,将修正值与圆盘散射体模型的理论均值进行匹配,建立目标函数,同时引入圆盘半径约束,通过对目标函数搜索极值,解出目标位置的最优解.由于这个解是通过圆盘散射体模型对 NLOS 问题建模得出,因而能够抑制 NLOS 误差.

1 相关研究

根据实际环境中 NLOS 误差分布的先验知识,有多种散射体模型被提了出来,包括适合于宏蜂窝环境下的圆环散射体模型(ring of scatterers model,简称 ROS)、圆盘散射体模型(disk of scatterers model,简称 DOS)、高斯散射体模型(Gaussian scattering models)和适合于微蜂窝环境下的椭圆散射体模型(elliptical model)^[9].通过拓扑模型计算出基站(BS)接收到的多径 NLOS TOA 的概率分布,文献[10]提出了联合均值匹配算法(joint mean matching algorithm,简称 JMMA),通过计算散射体模型的理论均值和测量均值,以两者的匹配度为目标函数,利用搜索方法解出目标位置.通过计算散射体模型理论与测量方差的匹配度,文献[11]提出了联合方差匹配算法(joint variance matching algorithm,简称 JVMA).文献[12]提出了贝叶斯估计法(bayesian estimation)和最大似然估计法(ML-EM algorithm),利用先验知识构建,分别根据贝叶斯准则和最大似然法则建立目标函数搜索求解.

与已有的研究工作相比,本文提出的非视距定位算法在 JMMA 算法的基础上进行了改进,具有以下创新优化之处:(1) 根据圆盘散射体理论 NLOS TOA 概率密度对测量数据均值进行修正,以提高测量均值与理论均值的匹配程度,使最优解更接近于目标真实位置;(2) 在目标函数中引入散射体分布半径约束,解决了在搜索求解过程中,由于半径信息的不受约束,模型半径会大大偏离实际值,从而导致最优解偏离真实位置这一问题.

2 DOS 散射体模型

图 1 所示为 NLOS 情况下的环境示意图.图中目标与基站间沿直线传播的信号被障碍物阻断,无法直达.在这一情况下,目标发出的信号,要依靠环境中的其他障碍物(称为散射体)通过折射、散射信号,最终到达基站.由于环境中存在多个散射体,基站收到多条折射、散射路径,称为多径(multipath)现象.

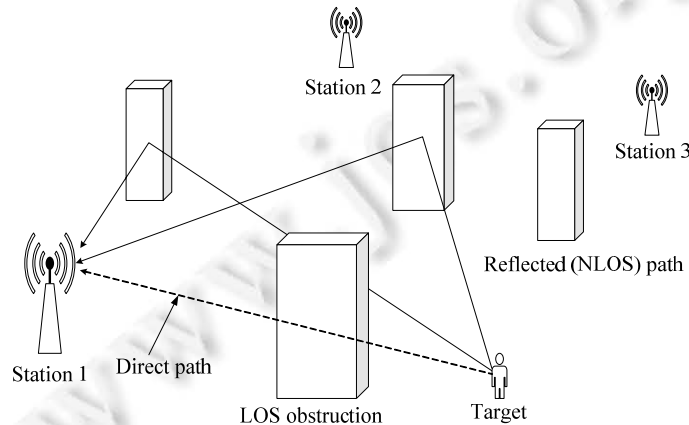


图 1 NLOS 环境示意图

DOS 散射体模型是对图 1 中 NLOS 环境进行建模,其几何拓扑如图 2 所示.图中移动目标 MS 、基站 BS_i 分布在平面区域内.假设基站数目 $N=3$,在图中仅画出其中一个基站.DOS 模型假设图 1 中的散射体数目为 N_s ,均匀分布在以 MS 为圆心,以 R_d 为半径的实心圆盘内部.由于障碍物阻隔了直达信号,基站 BS_i 接收到的信号为多条经过散射体折射、反射后到达的多径信号,即多径 NLOS TOA,假设每个基站接收的多径数目为 N_m ,用 l_{ij} 表示其中的第 j 条路径长度.

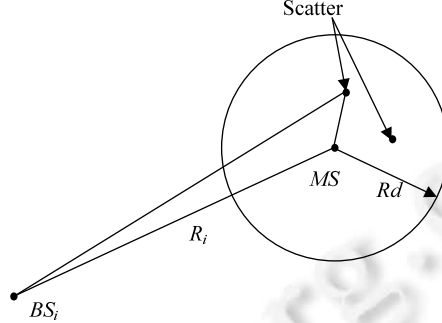


图 2 DOS 散射体模型

设 MS 的坐标为 $x_{ms} = [x_{ms} \ y_{ms}]^T$, BS_i 的坐标为 $x_i = [x_i \ y_i]^T$, BS_i 到 MS 的实际距离 R_i 为

$$R_i = \sqrt{(x_{ms} - x_i)^2 + (y_{ms} - y_i)^2} \quad (1)$$

NLOS 误差可表示为 $\eta_{ij} = l_{ij} - R_i$.

散射体 $x_s = [v \ w]^T$ 在圆盘内部满足均匀分布,概率密度函数为

$$p_{x,y}(v, w) = \begin{cases} 1/\pi R_d^2, & v^2 + w^2 \leq R_d^2 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)通过变换可得 NLOS 情况下 TOA 和 AOA 测量的联合概率密度函数 $p_{DOS}(l_{ij}, \phi)$, 再对 AOA 积分,可以得到 BS_i 多径 NLOS TOA 测量值的概率密度函数^[9]:

$$p_{DOS}(l_{ij}) = 1/(\pi R_d^2) \times \left[\frac{\pi l_{ij}^2 k_2 - l_{ij} k_2^2 + \pi k_2 k_1^2 - 2R_d k_1^2}{4k_1 k_2} + \frac{l_{ij}^2 k_0 k_4 + l_{ij} k_0 k_1^2}{2k_4^2 + 2k_0^2 k_1^2} + \frac{l_{ij}^2 + k_1^2}{2k_1^2} \arctan\left(\frac{k_0 k_1}{k_4}\right) - \frac{R_d - l_{ij}}{(4R_d^2 R_i^2 - k_3^2)^{1/2}} \left(2R_d^2 + \frac{l_{ij} k_1^2 k_4 (1 + k_0^2)}{2k_4^2 + 2k_0^2 k_1^2} \right) \right] \quad (3)$$

其中,

$$k_0 = \tan\left(\frac{1}{2} \arccos\left(\frac{-l_{ij}^2 + R_i^2 + 2R_d l_{ij}}{2R_i R_d}\right)\right) \quad (4-a)$$

$$k_1 = \sqrt{l_{ij}^2 - R_i^2} \quad (4-b)$$

$$k_2 = \sqrt{R_i^2 - 4R_d^2 - l_{ij}^2 + 4R_d l_{ij}} \quad (4-c)$$

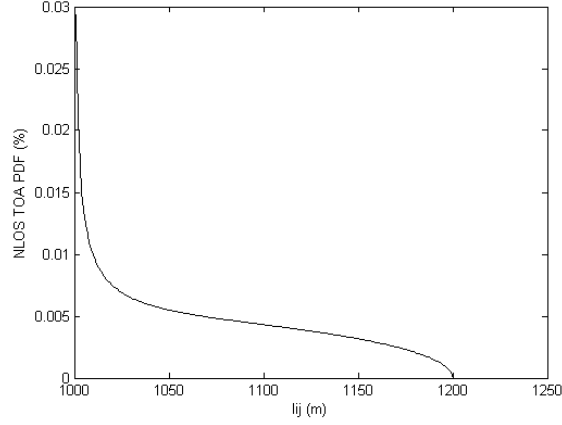
$$k_3 = -l_{ij}^2 + R_i^2 + 2R_d l_{ij} \quad (4-d)$$

$$k_4 = R_i - l_{ij} \quad (4-e)$$

注意,模型需要满足约束条件:

$$R_i < l_{ij} \leq R_i + 2R_d \quad (5)$$

图 3 所示为 $R_d=100\text{m}$, $R_i=1000\text{m}$ 时式(3)概率密度函数的分布情况.

图3 l_{ij} 概率密度函数

从图中可以看出,概率密度函数不对称,多径 NLOS TOA 测量值 l_{ij} 趋于 R_i 的概率较大。

3 基于圆盘散射体的非视距定位算法

JMMA 的基本思想是对每个基站 BS_i 的多径 NLOS TOA 观测数据求得测量均值,对 DOS 模型的概率分布求取理论均值,均值之差为匹配度,以各基站的匹配度之和建立目标函数,通过搜索算法得到最优解^[10]。

由式(3)的 DOS 模型概率密度可知, BS_i 的均值为

$$\hat{\mu}_{DOS,i} = \int_{R_i}^{R_i+2R_d} l_{ij} p(l_{ij}) dl_{ij} \quad (6)$$

对于 DOS 模型,式(3)中的概率密度得不到理论均值的解析解,因此对式(6)采用黎曼和(Riemann sum)方法求取数值解:

$$\hat{\mu}_{DOS,i} \approx \sum_{l_{ij}=R_i}^{R_i+2R_d} l_{ij} p_{DOS}(l_{ij}) \Delta l_{ij} \quad (7)$$

其中, Δl_{ij} 表示黎曼和的分割矩形宽度(bin width)。

BS_i 多径 NLOS TOA 的测量均值为

$$\mu_{i,DOS} = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} l_{ij} \quad (8)$$

其中, N_m 为 NLOS TOA 多径数目。定义目标函数:

$$\Gamma_{DOS}(\hat{x}_{ms}, \hat{y}_{ms}, R_d) = \sum_{i=1}^N |\hat{\mu}_{DOS,i} - \mu_{DOS,i}| \quad (9)$$

对目标函数使用单纯形搜索算法求取极值^[13],即可解出未知参数 $\theta = [x_{ms} \ y_{ms} \ R_d]^T$ 的最优解。这个最优解是使 DOS 模型推出的理论多径 TOA 均值与实际测量均值最为匹配的目标位置和圆盘半径。

本节针对 JMMA 算法对多径 NLOS TOA 测量值 l_{ij} 求取算术平均数,根据与理论均值存在固有匹配误差的问题,以及目标函数中没有考虑对模型半径 R_d 进行匹配的问题,提出一种改进的匹配算法。该算法的主要思想是,在求取测量均值时考虑迭代解处的概率密度,并根据散射体模型的拓扑结构得到模型半径 R_d 的近似约束关系,以此改进目标函数,增加对模型半径的匹配。该算法减小了固有匹配误差,使最优解更加趋近于真实解。

式(8)对观测数据做算术平均,没有考虑 l_{ij} 出现的概率,故用下式加以改进:

$$\mu'_i = \begin{cases} \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} l_{ij}, & p(l_{ij}) = 0 \\ \frac{\sum_{j=1}^{N_m} p(l_{ij}) l_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_m} p(l_{ij})}, & p(l_{ij}) \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

从 DOS 模型拓扑结构中可知, l_{ij}, R_i, R_d 需满足式(5)给出的约束关系,从中可以得出 R_d 满足关系:

$$R_d \geq \frac{1}{2}(l_{ij} - R_i) \quad (11)$$

针对式(11)给出的 R_d 需满足的不等约束近似取等,引入对 R_d 等式的约束信息:

$$R'_d \approx \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{1}{2}(\mu'_i - R_i) \right\} \quad (12)$$

则新的目标函数为

$$\Gamma'(\hat{x}_{ms}, \hat{y}_{ms}, R_d) = \sum_{i=1}^N |\hat{\mu}_i - \mu'_i| + |R_d - R'_d| \quad (13)$$

对式(13)中的目标函数,同样使用单纯形搜索算法求取最优解.与 JMMA 算法不同,该算法在每次迭代过程中使用迭代值更新式(10)、式(12),再用所得到的 μ'_i, R'_d 新值更新目标函数,从而保证目标函数在迭代过程中逐步修正,最终解出未知参数 $\theta = [x_{ms}, y_{ms}, R_d]^T$ 的最优解.

该算法的步骤可概括如下:

Step 1. 根据 θ 选取初始单纯形 $\{\theta^0, \theta^1, \theta^2\}$, 反映系数 $\alpha > 1$, 紧缩系数 $\varphi \in (0, 1)$, 扩展系数 $\gamma > 1$, 收缩系数 $\beta \in (0, 1)$ 以及精度 ε ;

Step 2. 对定点重新编号,使编号满足 $f(\theta^0) \leq f(\theta^1) \leq f(\theta^2)$;

Step 3. 令 $\theta^{n+1} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \theta^j$, 若 $\left\{ \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n [f(\theta^j) - f(\theta^{n+1})]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon$ 或迭代次数超过最大值,则停止迭代并返回

迭代解.

Step 4. 带入式(10)、式(12),得到 μ'_i, R'_d ;

Step 5. 更新式(13)目标函数 $\Gamma'(\hat{x}_{ms}, \hat{y}_{ms}, R_d)$;

Step 6. 计算 $\theta^{n+2} = \theta^{n+1} + \alpha(\theta^{n+1} - \theta^n)$, 若 $f(\theta^{n+2}) < f(\theta^0)$, 转 Step 7, 否则,当 $f(\theta^{n+2}) < f(\theta^{n-1})$ 时转 Step 8, 当 $f(\theta^{n+2}) \geq f(\theta^{n-1})$ 时转 Step 9;

Step 7. 计算 $\theta^{n+3} = \theta^{n+1} + \gamma(\theta^{n+2} - \theta^{n+1})$, 若 $f(\theta^{n+3}) < f(\theta^0)$, 令 $\theta^n = \theta^{n+3}$ 转 Step 2, 否则,转 Step 8;

Step 8. 令 $\theta^n = \theta^{n+2}$, 转 Step 2;

Step 9. 令 $\theta^n = \{\theta^i \mid f(\theta^i) = \min(f(\theta^n), f(\theta^{n+2}))\}$, 计算 $\theta^{n+4} = \theta^{n+1} + \varphi(\theta^n - \theta^{n+1})$, 若 $f(\theta^{n+4}) < f(\theta^n)$, 令 $\theta^n = \theta^{n+4}$, 转 Step 2, 否则,转 Step 10;

Step 10. 令 $\theta^j = \theta^0 + \varphi(\theta^j - \theta^0)$, $j = 0, 1, \dots, n$, 转 Step 2.

4 仿真实验分析

本节通过计算机仿真,选取传统视距定位算法 Chan 和基于 DOS 模型的 JMMA 两种算法与本文算法进行比较.采用的定位场景设置与文献[10]相同.假设基站数目 $N=3$,坐标为(0,0),(10.66,0),(4.33,9.5)(单位:km).移动目标坐标为(3.464,3.9)(单位:km).黎曼和中分割矩形宽度 Δl_{ij} 取值为 10m.迭代算法中对移动目标的初始坐标估计为(2.165,1.560)(单位:km),模型半径 R_d 的初始估计为 300m,精度为 10^{-6} m,最大迭代次数设为 50 次.测量噪声假设标准差为 50m 的高斯白噪声.对 DOS 模型在不同多径数 N_m 、不同模型半径 R_d 时的均方根误差(root mean squared error,简称 RMSE)采用 100 次蒙特卡洛仿真.

图 4 所示为散射体多径数为 4 时的 RMSE 对比曲线.仿真结果表明,当模型半径较小时,3 种算法均有较高的定位精度,随着模型半径的增大,定位精度有所降低.本文算法基于 DOS 模型,充分考虑了 NLOS 的环境因素,并且改进了匹配算法,因此在模型半径较大时,本文算法的定位精度明显高于其他两种算法.

图 5 所示为散射体多径数为 8 时的 RMSE 对比曲线.从仿真结果可以看出,对于 JMMA 和本文算法,随着多径数的增大,定位精度增高,而 Chan 算法定位精度基本保持不变.这主要是因为 DOS 模型直接对 NLOS 因素建模,当处于 NLOS 问题严重的恶劣环境下时,JMMA 和本文算法能够利用 NLOS 因素提高定位精度.

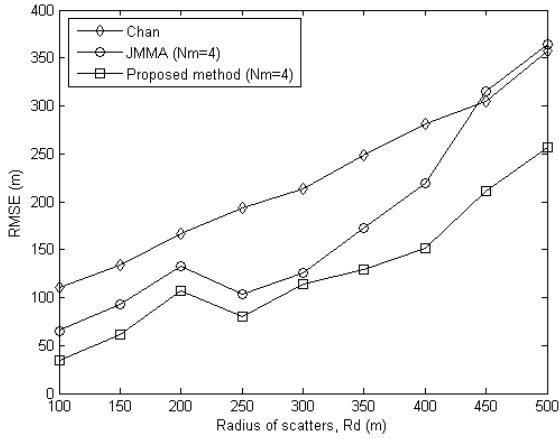


图 4 DOS 模型 $N_m=4$ 时的 RMSE

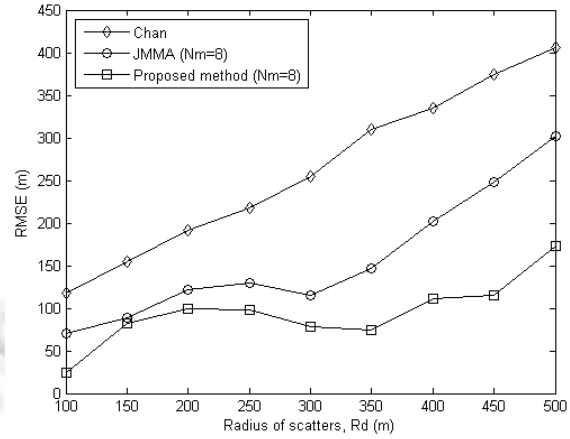


图 5 DOS 模型 $N_m=8$ 时的 RMSE

图 6 为散射体多径数为 12 时的 RMSE 对比曲线.从仿真结果中可以看出,随着模型半径的增大,本文算法的定位精度优于 JMMA,这主要得益于本文算法的匹配改进思想,充分利用多径测量数据,使得测量均值更加接近于理论均值,同时目标函数引入附加约束条件,得到的最优解更加接近于真实值,从而提高定位精度.

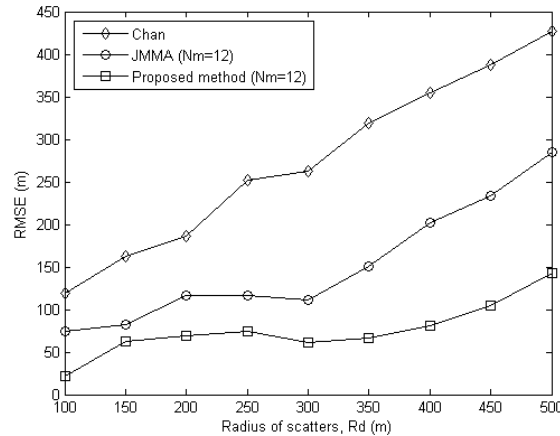


图 6 DOS 模型 $N_m=12$ 时的 RMSE

5 结束语

本文提出了一种基于圆盘散射体的非视距定位算法.与 JMMA 算法不同,本文所提算法在计算测量均值时考虑了 DOS 模型概率分布,使测量均值更接近于理论均值,同时引入圆盘半径约束概念,缩小匹配算法中的固有误差,使得最优解更加接近于目标真实位置.仿真结果表明:本文提出的算法能够得到全局最优解;相对于文献[10],本文提出的算法在不同程度的 NLOS 问题下,对定位精度都有所提高.

References:

- [1] Mao G, Fidan B, Anderson B. Wireless sensor network localization techniques. *Computer Networks*, 2007,51(10):2529–2553.
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008,52(12):2292–2330.
- [3] Guvenc I, Chong CC. A survey on TOA based wire-less localization and NLOS mitigation techniques. *Communications Surveys & Tutorials*, 2009,11(3):107–124.
- [4] Riba J, Urruela A. A non-line-of-sight mitigation technique based on ML-detection. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2004)*, Vol.2. IEEE, 2004,2:ii-153–156.
- [5] Gezici S, Sahinoglu Z. UWB geolocation techniques for IEEE 802.15.4a personal area networks. Technical Report, TR-2004-110, Mitsubishi Electric Research Laboratory, 2004.
- [6] Yin F, Fritsche C, Gustafsson F, *et al.* TOA-Based robust wireless geolocation and Cramér-Rao lower bound analysis in harsh LOS/NLOS environments. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2013,61(9):2243–2255.
- [7] Venkatesh S, Buehrer RM. NLOS mitigation using linear programming in ultrawideband location-aware networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(5):3182–3198.
- [8] Zhu X, Shi M, Zhang J, *et al.* A scattering model based non-line-of-sight error mitigating algorithm via distributed multi-antenna. In: *Proc. of the IEEE 18th Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*. IEEE, 2007. 1–5.
- [9] Al-Jazzar S, Caffery J, You HR. Scattering-Model-Based methods for TOA location in NLOS environments. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(2):583–593.
- [10] Zou H, Chen L, He F, *et al.* Joint mean matching NLOS mitigation method in TOA location. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Communications and Networking in China (ChinaCom 2008)*. IEEE, 2008. 178–181.
- [11] Al-Jazzar S, Caffery J, You HR. A scattering model based approach to NLOS mitigation in TOA location systems. In: *Proc. of the 55th Vehicular Technology Conf. (VTC Spring 2002)*. IEEE, 2002,2:861–865.
- [12] Al-Jazzar S, Caffery J. ML and Bayesian TOA location estimators for NLOS environments. In: *Proc. of the 56th Vehicular Technology Conf. (VTC 2002-Fall)*. IEEE, 2002,2:1178–1181.
- [13] Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 1965,7(4):308–313.



王睿(1990—),男,山东青岛人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络下的目标定位与跟踪.



彭力(1967—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为视觉物联网.



杨晓峰(1990—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络路由算法.