

文章编号: 2095-4980(2021)04-0672-06

基于一次反射的室内 WiFi 辐射源单站定位方法

饶云华^{a,b}, 潘登^a, 朱华梁^a, 万显荣^{a,b}, 易建新^{a,b}, 龚子平^{a,b}, 柯亨玉^{a,b}

(武汉大学 a.电子信息学院, 湖北 武汉 430072; b.深圳研究院, 广东 深圳 518063)

摘要: 为了解决WiFi外辐射源雷达现场应用中首先需要实时获取室内辐射源位置的问题, 通过详细分析室内环境中信号的反射方式和特性, 利用一次反射信号建立了WiFi辐射源测量的到达时间差(TDOA)模型, 并分析推导出辐射源坐标求解方程。对于该非线性方程, 先利用Taylor展开在初值处将其线性化, 然后利用高斯牛顿迭代法估计辐射源坐标, 且具有较快的收敛速度。仿真分析表明其所提算法可实现室内辐射源定位, 且因方程线性化带来的精确度损失可通过迭代得到快速补偿。

关键词: WiFi; 室内辐射源定位; 多径利用; 高斯牛顿迭代法

中图分类号: TN953

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020644

Single station localization of indoor WiFi emitter with multipath exploitation

RAO Yunhua^{a,b}, PAN Deng^a, ZHU HuaLiang^a, WAN Xianrong^{a,b}, YI Jianxin^{a,b}, GONG Ziping^{a,b}, KE Hengyu^{a,b}

(a.School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China; b.Shenzhen Research Institute, Wuhan University, Shenzhen Guangdong 518063, China)

Abstract: In the field application of WiFi external radiation source radar, the location of the indoor radiation source needs to be acquired in real-time. Through detailed analysis of the reflection mode and characteristics of the signal in the indoor environment, the first reflected signal is adopted to establish the Time Difference Of Arrival(TDOA) model of the WiFi radiation source measurement, and the equation is solved by deriving the coordinates of the radiation source. For this nonlinear equation, Taylor expansion is first employed to linearize it at the initial value; and then Gauss-Newton iteration method is adopted to estimate the radiation source coordinates, which has a faster convergence rate. Simulation analysis shows that the proposed algorithm can realize positioning of indoor radiation source, and the accuracy loss caused by the linearization of the equation can be quickly compensated by iteration.

Keywords: WiFi; indoor emitter localization; multipath exploitation; Gauss-Newton iteration

WiFi现已广泛布置于国内外主要城市, 除用于通信进行数据传输外, 由于其信号具有带宽大、覆盖性好等特点, 基于WiFi信号在室内目标探测、定位等方面也引起了研究者的兴趣。目前, 国内外研究和应用较多的有基于接收信号强度(Received Signal Strength Indicator, RSSI)的测距和指纹定位算法、基于信道状态信息(Channel State Information, CSI)目标探测以及基于外辐射源雷达的目标探测与定位等^[1]。由于信号在室内传输中会发生散射、绕射和反射等多种传播模式, RSSI只是多条传播路径信号幅值叠加, 无法对每条传播路径区分, 因此其定位的精确度和鲁棒性都不理想。同时, 由于信道状态信息CSI可以实时反映收发对之间的信道状态变化, 且具有较高的灵敏度, 因此基于CSI的定位技术能有效地提高定位精确度, 成为近年来WiFi室内定位的研究热点, 但也存在探测模糊问题。另外, 利用WiFi信号作为第三方辐射源进行目标探测的WiFi外辐射源雷达具有成本低、无辐射、隐蔽性好、生存能力强等优势, 在安全与侦测领域受到国内外研究者关注^[2]。外辐射源雷达从本质上来说是一种双/多基地雷达, 可以直接获取探测目标的距离、角度和速度等信息。

以上基于WiFi信号的探测与定位都需要预先知道辐射源位置信息, 然而与民用广播电视^[3]等固定辐射源不同, WiFi辐射源的位置通常是可移动的, 不能完全预先获得位置信息, 故在实际应用尤其是室内目标探测应用前

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1933135; 61271400); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0502403); 湖北省技术创新专项重大资助项目(2016AAA017); 深圳市科技计划资助项目(JCYJ20170818112037398)

常常需要现场对室内 WiFi 辐射源进行定位, 获取发射站位置信息。当前针对辐射源的定位方法通常是在对辐射源进行测距、测角等基础上然后再进行定位, 主要有基于到达时间(Time Of Arrival, TOA)、到达时间差(TDOA)、到达角度(Direction Of Arrival, DOA)、接收信号强度(RSSI)等量测数据的定位^[4-7], 而当辐射源与接收站存在相对运动时, 到达频率差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)也被加入定位算法以提高精确度^[8-9]。

基于以上量测参数的目标定位方法主要有总体最小二乘法(Total Least Squares, TLS)、加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)以及约束加权最小二乘法(Constrained Weighted Least Squares, CWLS)等, 其中 ZHU^[10]提出了基于TDOA的辐射源定位方法, 然而算法过程中的近似处理会导致定位精确度下降。以上算法通常进行两步参数估计, 或转换为约束条件下的非线性迭代优化, 其求解步骤复杂且运算量大。同时在信噪比较低时, 会影响算法的定位性能。

为提高运算速度, 研究人员提出了直接解算目标位置或速度的闭式算法, 其中 ZHAO^[11]提出了基于到达角-到达时间差(Angle Of Arrival-Time Difference of Arrival, AOA-TDOA)的联合定位闭合解算法, 但是该算法只考虑了双平台协同定位这一特例。YIN^[12]提出基于AOA-TDOA的联合定位闭合解算法, 但忽略了传感器位置误差的影响。以上算法大都是基于多站辐射源定位模型, 但在室内辐射源定位中, 由于应用环境与条件限制, 采用多站探测方式可行性不高, 而单站辐射源定位的相关算法理论研究并不是很多, 其中, 卢志刚^[13]研究了基于RSSI和TOA的定位方法, 然而只能得到一个次优解。Romain^[14]提出了基于TDOA和AOA的定位方法, 但是并未考虑室内复杂环境对信号传播的影响。WANG^[15]研究了基于TOA的定位算法, 但是噪声较大时定位性能较差。

为此, 本文针对室内辐射源的单站无源定位问题, 从室内信号传播模型出发, 提出了一种利用室内不同墙体的一次反射回波时差关系的定位方法, 建立了不同反射回波时差的TDOA模型方程组。在将时差观测方程线性化后, 考虑到方程中各项系数的误差, 将定位问题转化为最小二乘问题, 并采用高斯牛顿迭代方法求解。该算法不仅将室内强多径影响转化为可利用信息来实现单站定位, 而且对室内复杂电磁环境所带来的量测噪声变化具有较强的稳定性, 可以达到较高的定位精确度, 且其计算收敛速度快, 具有很好的实用性。

1 室内定位模型

室内环境下, 若接收机与辐射源间不存在障碍物, 辐射源发射的信号可直接接收机。设辐射源发射信号为 $s(t)$, 则接收到的直达波信号 $r_{\text{direct}}(t)$ 为:

$$r_{\text{direct}}(t) = \Gamma_0 s(t - \tau_0) + n(t) \quad (1)$$

式中: Γ_0 为衰减系数; τ_0 为信号传播时间, τ_0 可由时延估计算法得到^[16]; $n(t)$ 为高斯噪声。直达路径长度 l_0 为:

$$l_0 = c\tau_0 = d_0 + \Delta d \quad (2)$$

式中: d_0 为路径实际长度; Δd 为接收机与辐射源时间不同步所带来的误差。

通常情况下, 通过建立多个接收站接收辐射源信号并测量出辐射源信号通过不同路径到达各接收机的 TOA, 则其对应的传播路径长度 l_i 为:

$$l_i = ct_i = d_i + \Delta d \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中: c 为信号传播速度; t_i 为第 i 条路径的 TOA 量测值; d_i 为第 i 条路径实际长度; Δd 为接收机与辐射源时间不同步所带来的误差。由式(3)可知, 若接收机与辐射源时间不同步, 则所测量得到的 TOA 是存在误差的。为了消除该误差, 以某条路径为基准得到其他路径与该路径之间的 TDOA, 其对应的路径长度之差为:

$$l_i - l_j = c(t_i - t_j) = d_i - d_j \quad (i=1, 2, 3, \dots, i \neq j) \quad (4)$$

通常而言, 接收机和未知辐射源是时间不同步的, 得出的路径长度会存在误差 Δd , 无法直接利用路径长度对辐射源位置进行估计。除直达波外, 室内环境下的墙体回波多且非常强, 从而对直达波到达时间测量精确度带来很大的影响, 需要进行杂波抑制以降低墙体回波的影响。

但墙体回波同时也携带辐射源信息, 因此可以考虑分析其特性进行利用。若辐射源发出的信号经墙体反射后再到达接收机, 按照光线追踪(Ray Tracing)算法, 反射为镜面反射^[17]; 根据文献[18]所述, 经多次反射后信号能量衰减较大, 不易探测到, 因此可以利用信号较强的一次反射来建立如图 1所示的反射路径模型, 其中 S

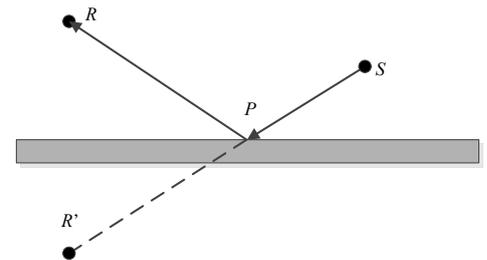


Fig.1 Reflection path
图1 反射路径

为辐射源, R 和 R' 分别为实际接收机和虚拟接收机且二者关于墙体对称。辐射源 S 发出的信号经墙体反射后到达接收机 R , 这个路径可等效为由辐射源 S 发出的信号直达虚拟接收机 R' , 这样可以把非视距问题转化为视距问题。

信号在传播途中存在多条墙体反射路径, 则接收信号 $r_{\text{reflect}}(t)$ 为:

$$r_{\text{reflect}}(t) = \sum_M \Gamma_M S(t - \tau_M) + n(t) \quad (5)$$

式中 M 为反射路径的数量。反射路径的长度 l_i 为:

$$l_i = c\tau_i = |SP_i| + |RP_i| + \Delta d \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

式中 P_i 为反射点。如果墙体位置已知, 那么可以得到虚拟接收机 R' 的位置。此时反射路径长度 l_i 为:

$$l_i = c\tau_i = |SR'| + \Delta d \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

因此下文将对各类传播路径进行分析并利用它们之间的长度差值建立辐射源求解方程。

2 辐射源位置估计方法

2.1 建立求解方程

当接收机和辐射源同处室内时, 只需要考虑信号的反射而无需考虑信号的折射路径, 因此可以建立图 2 信号传播模型。辐射源 S 发出的信号除了可以直达到接收机 R 以外, 还会经墙体一次反射后到达接收机 R 。

如果图 2 中所有墙体位置均已知, 则在接收机 R 位置已知的条件下可得出各反射路径对应的虚拟接收机的位置。按照前文所述将所有反射路径等效为辐射源与虚拟接收机之间的直达路径, 此时非视距定位问题转化成了视距定位问题。利用 TDOA 建立求解方程, 用反射路径长度减去直达路径长度得到式(8):

$$l_i - l_0 = c\Delta\tau_i + n_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (8)$$

式中: $l_i (i=1, 2, 3)$ 为反射路径长度; l_0 为直达路径长度。式(8)转化为代数方程式(9):

$$\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_0 - x_s)^2 + (y_0 - y_s)^2} = c\Delta\tau_i + n_i \quad (9)$$

式中: (x_s, y_s) 为辐射源坐标; (x_0, y_0) 为接收机坐标; n_i 为 TDOA 量测误差对应的距离误差且相互独立, 则其协方差矩阵可表示为 $\sigma^2 \mathbf{I}$; $(x_i, y_i) (i=1, 2, 3)$ 为各虚拟接收机的坐标。

2.2 辐射源位置估计

前文得到了辐射源位置的求解方程组, 该方程组是非线性超定方程组, 因此无法直接使用传统的最小二乘法估计辐射源的位置。为了从该方程组中估计出辐射源坐标, 首先在辐射源坐标初值 (x_{s0}, y_{s0}) 处利用泰勒展开将其线性化得到式(10):

$$f_i(x_{s0}, y_{s0}) + (x_s - x_{s0})g_{i1} + (y_s - y_{s0})g_{i2} = n_i, \quad g_{i1} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_s} \right|_{(x_{s0}, y_{s0})}, \quad g_{i2} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial y_s} \right|_{(x_{s0}, y_{s0})}, \quad (i=1, 2, 3) \quad (10)$$

上述线性超定方程组写成矩阵形式:

$$\mathbf{G}_0(\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{s0}) = -\mathbf{F}_0 + \mathbf{N} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathbf{G}_0 = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_{s0} = \begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_0 = \begin{bmatrix} f_1(x_{s0}, y_{s0}) \\ f_2(x_{s0}, y_{s0}) \\ f_3(x_{s0}, y_{s0}) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}。$$

对该线性方程使用最小二乘估计可得式(12):

$$\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{s0} = -(\mathbf{G}_0^T \mathbf{G}_0)^{-1} \mathbf{G}_0^T \mathbf{F}_0 \quad (12)$$

初值修正得式(13):

$$\mathbf{X}_{s1} = \mathbf{X}_{s0} - (\mathbf{G}_0^T \mathbf{G}_0)^{-1} \mathbf{G}_0^T \mathbf{F}_0 \quad (13)$$

高斯牛顿迭代可得式(14):

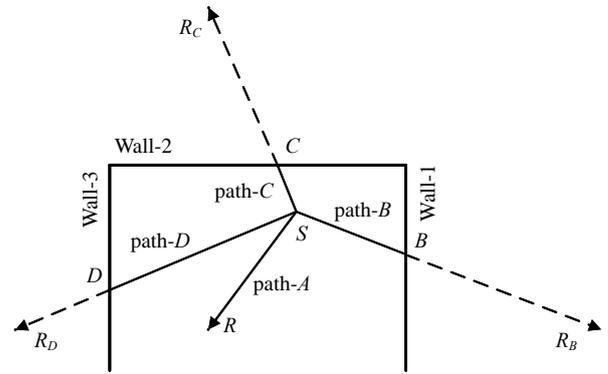


Fig.2 Indoor scene

图 2 室内场景

$$\mathbf{X}_{s(k+1)} = \mathbf{X}_{s(k)} - (\mathbf{G}_k^T \mathbf{G}_k)^{-1} \mathbf{G}_k^T \mathbf{F}_k \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (14)$$

式中：
$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} g_{11}^{(k)} & g_{12}^{(k)} \\ g_{21}^{(k)} & g_{22}^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ g_{n1}^{(k)} & g_{n2}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad g_{i1}^k = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_s} \right|_{(x_{sk}, y_{sk})}; \quad g_{i2}^k = \left. \frac{\partial f_i}{\partial y_s} \right|_{(x_{sk}, y_{sk})} .$$

3 克拉美罗下界分析(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)

定位将式 (10) 写成矩阵形式： $\mathbf{F}(\mathbf{X}_s) = \mathbf{D} + \mathbf{N}$ ，其中 $\mathbf{F}(\mathbf{X}_s) = [F_1(\mathbf{X}_s), F_2(\mathbf{X}_s), F_3(\mathbf{X}_s)]^T$ ， $\mathbf{D} = [c\Delta\tau_1, c\Delta\tau_2, c\Delta\tau_3]^T$ ， $F_i(\mathbf{X}_s) = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_0 - x_s)^2 + (y_0 - y_s)^2}$ ， $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$ 。

未知参量可表示为：

$$\boldsymbol{\varphi} = [x_s, y_s]^T \quad (15)$$

定义 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}$ 为未知参数 $\boldsymbol{\varphi}$ 的无偏估计量，则均方误差可为：

$$E\{(\hat{\boldsymbol{\varphi}} - \boldsymbol{\varphi})(\hat{\boldsymbol{\varphi}} - \boldsymbol{\varphi})^T\} \geq \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\varphi}) \quad (16)$$

式中 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\varphi})$ 是关于 $\boldsymbol{\varphi}$ 的 Fisher 信息矩阵(Fisher Information Matrix, FIM)，可表示为：

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{xx} & \mathbf{J}_{xy} \\ \mathbf{J}_{yx} & \mathbf{J}_{yy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中：
$$J_{ij} = \frac{2}{\sigma^2} \times \frac{\partial \mathbf{F}^H}{\partial \boldsymbol{\varphi}_i} \times \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\varphi}_j}; \quad \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = [g_{11}, g_{21}, g_{31}]^T; \quad \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = [g_{12}, g_{22}, g_{32}]^T .$$

4 仿真分析

为了评估所提算法的性能，在图 3 的室内环境下进行仿真实验。图 3 中 S 代表辐射源， R 代表接收机，辐射源发出的信号按照所示 4 条路径到达接收机，相关参数由表 1 给出。

为评价算法性能，采用均方根误差(Root Mean Squared Error,

RMSE)作为评价标准，其定义为： $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_s)^2}$ 。

RMSE 为估计的辐射源位置的均方根误差； \mathbf{X}_i 为第 i 次独立仿真实验中辐射源位置估计值； \mathbf{X}_s 为辐射源位置真实值。

仿真 1 多径数目对 RMSE 的影响

由前文分析可知，求解辐射源坐标需要利用多径中包含的辐射源信息。为了研究不同的多径数目对本文算法性能的影响，在图 3 室内环境下进行仿真实验。在不同的量测误差下进行蒙特卡洛仿真实验，实验次数设为 $N=5\ 000$ 。图 4 给出了不同多径数目下算法性能随距离量测误差的变化，可以看出多径数目对算法的影响较小。

仿真 2 辐射源位置初值对算法性能的影响

由前文分析可知，利用牛顿高斯迭代法求解时需要先给定辐射源位置一个初值。为了研究辐射源位置初值对算法性能的影响，在图 5 环境下进行蒙特卡洛仿真实验，实验次数设为 $N=5\ 000$ ，辐射源位置初值随机生成。图 5 给出了不同辐

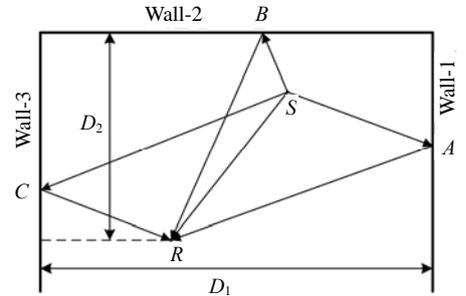


Fig.3 Simulation environment

图 3 仿真环境

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
parameter	numerical value
wall length D_1 /m	30
wall length D_2 /m	20
receiver coordinates (x_0, y_0)	(12, 0)
radiation source coordinates true value (x_s, y_s)	(16, 12)

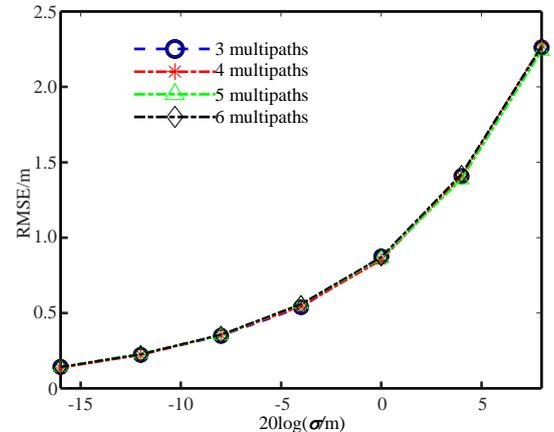


Fig.4 Influence of the number of multipaths on the performance of the algorithm

图 4 多径数目对算法性能的影响

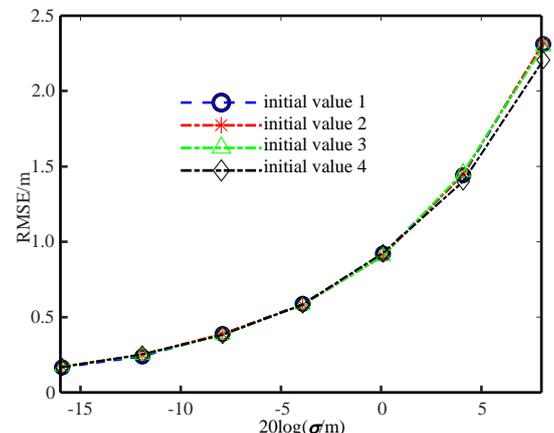


Fig.5 Influence of the initial value of the radiation source on the performance of the algorithm

图 5 辐射源位置初值对算法性能的影响

射源位置初值下算法性能随距离量测误差的变化,可以看出辐射源位置初值对算法性能几乎无影响。

仿真 3 本文算法性能评估

将本文提出的 Gauss-Newton 迭代法与加权最小二乘法 (WLS)^[19]以及 CHAN 算法进行对比,在图 5 环境下进行蒙特卡洛仿真实验,实验次数设为 $N=5\ 000$ 。图 6 给出了本文算法、WLS 算法和 CHAN 算法的对比结果,可以看出本文算法和 CHAN 算法性能接近,相较于 WLS 算法性能有所提升,并且基本接近或达到 CRLB。

5 结论

本文针对室内环境中存在的多径效应问题,将常规定位方法中需要抑制的多径信号视为有用信号。在室内布局已知的情况下,考虑反射路径和折射路径,建立虚拟接收机,提出了一种单站辐射源定位方法,根据一次反射路径建立了求解辐射源坐标的超定方程组,并提出了基于高斯牛顿迭代的辐射源位置估计方法。该方法仅需一个接收站即可对辐射源定位,不需要考虑多站定位中存在的时间同步问题,在室内应用中可行性高。仿真结果进一步表明,本文所提方法具有受多径数目、辐射源位置初值影响小等优点,且算法在求解超定方程组的近似中考虑了系数误差,使得精确度较加权最小二乘法更优,定位误差更小。

参考文献:

- [1] 鲁勇,吕绍和,王晓东,等. 基于 WiFi 信号的人体行为感知技术研究综述[J]. 计算机学报, 2019,42(2):3-23. (LU Yong, LYU Shaohe,WANG Xiaodong,et al. Research review of human behavior perception technology based on WiFi signal[J]. Chinese Journal of Computers, 2019,42(2):3-23.)
- [2] 庄旭昇,汪玲,高瑾,等. 一种基于 WiFi 信号的运动目标无源雷达成像方法[J]. 雷达学报, 2014,3(6):694-701. (ZHUANG Xusheng,WANG Ling,GAO Jin,et al. Passive radar imaging of moving targets using WiFi signals[J]. Journal of Radars, 2014,3(6):694-701.)
- [3] 邵启红,龚子平,张勋,等. 多调频广播外辐射源雷达目标探测实验研究[J]. 电子与信息学报, 2016,38(5):256-260. (SHAO Qihong,GONG Ziping,ZHANG Xun,et al. Experimental study on target detection for multi-FM broadcasting based passive radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016,38(5):1256-1260.)
- [4] AL-SAMAHI S S A,HO K C,ISLAM N E. Robust ToA-based localization in a mixed LOS/NLOS environment using hybrid mapping technique[C]// European Signal Processing Conference. A Coruna,Spain:[s.n.], 2019:1-5.
- [5] LIM H,SIN C S. Multi-source localization using linear DOA sensor network[C]// International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Prague,The Czech Republic:[s.n.], 2018:759-761.
- [6] LIM H,LIM K,JOO I,et al. Experimental performance of signal source localization based on distributed DOA measurements[C]// International Technical Conference on Circuits/Systems,Computers and Communications. JeJu,Korea (South):[s.n.], 2019:1-3.
- [7] WANG Q,DUAN Z,LI X R. Emission source localization and sensor registration using RSS measurements[C]// International Conference on Information Fusion. Xi'an,China:[s.n.], 2017:1-8.
- [8] 熊杰,陈俊,宁静,等. 移动辐射源 AOA-TDOA-FDOA 联合定位闭合解算法[J]. 电子科技大学学报, 2020,49(2):219-227. (XIONG Jie,CHEN Jun,NING Jing,et al. Closed-form AOA-TDOA-FDOA solution for moving source location[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020,49(2):219-227.)
- [9] QU Xiaomei,XIE Lihua,TAN Wenrong. Iterative constrained weighted least squares source localization using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017,65(15):3990-4003.
- [10] ZHU Guohui,WANG Yang. An approximately efficient estimator for moving source localization using multiple-time TDOA measurements[C]// IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing,China:IEEE, 2018:934-938.
- [11] ZHAO Y,LI Z,HAO B,et al. Bias reduced method for TDOA and AOA localization in the presence of sensor errors[C]// IEEE International Conference on Communications. Paris:IEEE, 2017:1-6.

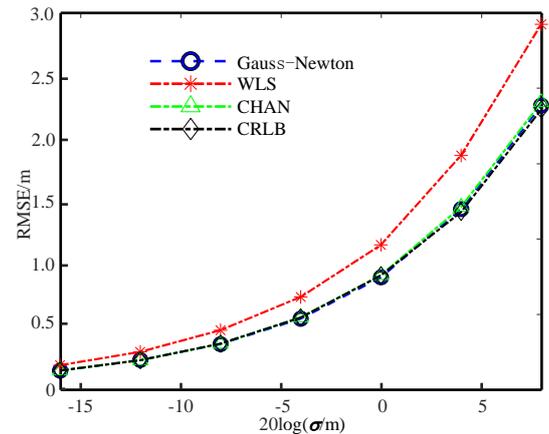


Fig.6 Performance comparison of three algorithms
图 6 三种算法性能对比

- [12] YIN J,WAN Q,YANG S,et al. A simple and accurate TDOA-AOA localization method using two stations[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016,23(1):144-148..
- [13] 卢志刚,李有明,贾向红,等. 非视距环境下基于 RSS-TOA 的定位算法[J]. 电信科学, 2019,35(9):107-113. (LU Zhigang,LI Youming,JIA Xianghong,et al. RSS-TOA based localization algorithm in non-line-of-sight environment[J]. Telecommunications Science, 2019,35(9):107-113.)
- [14] ROMAIN Giacometti,ALEXANDRE Baussard,DANIEL Jahan,et al. Localization of radar emitters from a single sensor using multipath and TDOA-AOA measurements in a naval context[C]// European Signal Processing Conference. Budapest:[s.n.], 2016:692-696.
- [15] WANG G,CHEN H,LI Y,et al. NLOS error mitigation for TOA-based localization via convex relaxation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014,13(8):4119-4131.
- [16] 巴斌,郑娜娥,胡捍英,等. OFDM 系统中基于 PM 的时延估计算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(3):355-360. (BA Bin,ZHENG Na'e,HU Hanying,et al. PM-based time delay estimation algorithm in OFDM system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(3):355-360.)
- [17] CHEE Kiat Seow,SOON Yim Tan. Non-Line-of-Sight localization in multipath environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008,7(5):647-660.
- [18] MARANÒ S,GIFFORD W M,WYMEERSCH H,et al. NLOS identification and mitigation for localization based on UWB experimental data[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010,28(7):1026-1035.
- [19] RAN Qiu,FENG Renjian,YU Ning,et al. A weighted least squares source localization algorithm using TDOA measurements in wireless sensor networks[C]// International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing:[s.n.], 2016:10-13.

作者简介：

饶云华(1972-),男,重庆市人,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为新体制雷达、雷达系统设计、无线通信网等,email:ryh@whu.edu.cn.

朱华梁(1998-),男,南昌市人,在读硕士研究生,研究方向为无源雷达、室内定位.

易建新(1989-),男,湖南省娄底市人,特聘研究员,硕士生导师,研究方向为无源雷达与雷达信号处理等.

柯亨玉(1957-),男,湖北省阳新县人,教授,博士生导师,研究方向为电磁场理论、高频雷达海洋遥感技术.

潘登(1988-),男,湖北省鄂州市人,在读硕士研究生,研究方向为无源雷达、室内定位.

万显荣(1975-),男,湖北省天门市人,教授,博士生导师,研究方向为无源雷达、超视距雷达与雷达信号处理等.

龚子平(1977-),男,湖北省十堰市人,讲师,研究方向为电波传播与无线电海洋遥感等.