

文章编号: 1671-251X(2009)06-0024-05

# 井下频域超分辨率 TOA 定位算法\*

陈奎, 徐钊

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 文章在分析3种无线定位方法的基础上, 指出TOA定位方法提供的定位精度较高, 在井下使用具有一定的可行性, 并针对TOA定位方法的时间分辨率有限、不能满足井下应用要求的问题, 提出了一种基于子空间分解和MUSIC算法的频域超分辨率TOA定位算法, 最后采用该算法分别对收发天线间有、无障碍物阻隔这2种情况进行了仿真。结果表明, 频域超分辨率TOA定位算法在低信噪比的情况下也可以提高时间分辨率, 达到较高的定位精度, 比较适用于井下人员无线定位。

**关键词:** 矿井; 人员定位; TOA; 超分辨率; 频域; 时延估计; 子空间分解; MUSIC算法

**中图分类号:** TD655.3; TP92      **文献标识码:** A

Frequency-domain Super-resolution TOA Position Algorithm of Underground

CHEN Kui, XU Zhao

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou, 221008, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing three kinds of wireless position methods, the paper indicated the TOA position method could provide higher position precision, which had certain feasibility used in underground. And aiming at the problems that TOA position method had limited time resolution and could not meet with the demands used in underground, it proposed a frequency-domain super-resolution TOA position algorithm based on subspace decomposition and MUSIC algorithm. At last it used the algorithm to simulate the two typical conditions of OLOS and LOS between sending antenna and receiving antenna. The result showed that the frequency-domain super-resolution TOA position algorithm can improve time resolution and achieve higher position precision under the condition of low SNR, which is suitable for underground personnel position.

**Key words:** mine, personnel position, TOA, super-resolution, frequency-domain, time delay estimation, subspace decomposition, MUSIC algorithm

## 0 引言

近年来, 随着地面移动通信及其业务的快速发展, 地面无线定位技术受到了越来越多的关注, 各种无线定位的解决方案和实现算法也很多。移动定位业务作为3G的一个基本功能被纳入了3G规范之中, 无线定位技术已成为一个研究热点。相比之下,

由于煤矿井下无线传播环境恶劣、复杂, 井下无线定位发展迟缓。对于井下人员定位, 最早的是采用IC卡、手纹识别技术和红外线编码技术, 这些技术只能实现简单的人员考勤, 无法很好地解决对多个移动的物体和人员进行快速识别和跟踪定位的问题。目前, 国内外各矿井广泛采用的矿井人员跟踪定位系统均采用RFID技术和基于Intranet的Web技术开发设计, 以无线采集、有线传输的方式对井下人员实行定位, 这种方法只能将人员定位在基站附近的一个区域范围内。现有的地面无线定位技术既可以提供较好的响应速度, 又可以覆盖较广的范围, 实现无缝的、精确的定位。因此, 用现有的地面无线定位技术对井下人员进行精确定位是一个研究方向<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2009-05-11

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50534050)

作者简介: 陈奎(1971-), 男, 中国矿业大学信电学院在读博士研究生, 研究方向为无线网络和宽带通信技术。E-mail: kuir@126.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 1 无线定位方法比较

目前,基于电磁波的无线定位的方法主要有以下3种<sup>[2~4]</sup>:

(1) 基于接收场强的 RSS (received signal strength) 定位方法。无线信号传播存在以下规律: 在发射功率一定的情况下, 收发双方距离越近, 接收方测得的信号强度越强, 收发双方距离越远, 接收到的信号强度越弱。RSS 定位方法就是通过已知的信道衰落模型由移动台测量几个基站的场强(或功率), 利用这些场强信息和基站天线位置及其参数对移动台定位, 一般通过 3 个基站就可以确定移动台的位置。但井下巷道是一个多径效应严重的电磁波传播环境, 场强值随距离变化存在强烈的起伏变化, 衰减规律复杂, 得到一个准确反映信道特性的衰落模型很难。另外, 只有在采用全向天线时, 等场强曲线才近似呈同心圆状, 因此, 只利用 RSS 信息实现井下人员定位是很困难的, 且定位精度不高。考虑到 RSS 定位方法对硬件要求低的特点, 该定位方法可以和其它定位方法进行融合, 以提高定位精度。

(2) 基于到达角度的 AOA(angle of arrival) 定位方法。AOA 定位方法是接收机通过天线阵列测出电磁波的入射角度, 生成从基站到移动台的方向线, 即测位线。2 个基站可得到 2 条轨迹直线, 考虑到基站位于移动台的同一侧且与 2 个移动台不在同一条直线上, 2 条轨迹直线不会出现重叠, 所以其唯一的交点 X 就是移动台的位置, 如图 1 所示。AOA 定位方法在自由空间是一种十分有效的方法, 但要准确测量电磁波的入射角度, 需要配置智能天线, 导致设备结构复杂, 不适合井下使用。同时, 巷道的多径效应和几何形态也会严重影响方向判断的准确性。

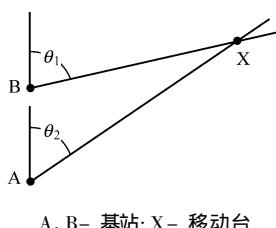


图 1 AOA 定位方法示意图

(3) 基于到达时间的 TOA (time of arrival) 定位方法。TOA 定位方法主要测量信号在基站和移动台之间的单程或双程传播时间。单程测量要求接收基站或移动台间的时钟严格同步; 双程测量则不需要移动台和基站间的时间同步, 是测量时间常用

的方法。若电磁波从移动台到基站的传播时间为  $t$ , 电磁波传播速度为  $c$ , 则移动台位于以基站位置为圆心、半径  $R_t = t \times c$  的圆上。那么 3 个定位圆就可以确定移动台的二维位置坐标, 即 3 个圆的交点坐标, 如图 2 所示。TOA 定位方法对基站的时间测量精度要求非常高, 1  $\mu$ s 的时间误差意味着单位圆半径近 300 m 的误差, 那么 3 个定位圆就不可能如图 2 所示交于一点了。

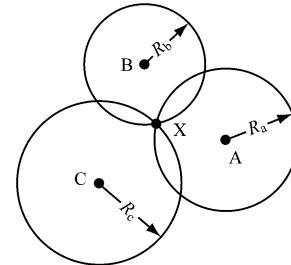


图 2 TOA 定位示意图

由于 AOA 定位方法需要天线阵列且设备复杂, 因此, 不适合井下使用。RSS 定位方法对距离  $d$  的无偏估计  $\hat{d}$  的克劳美下界(CRLB)由式(1)给出:

$$\hat{d} \geq [\ln(10\alpha_h)/(10npd)]^2 \quad (1)$$

式中:  $\alpha_h$  为零均值高斯随机变量的标准差, 代表信道的对数阴影效果;  $np$  为路径损耗因子;  $d$  为 2 个节点间的距离。

由式(1)可看出, 定位偏差只与信道参数和两点间的距离有关, 与带宽无关, 即带宽并不能带来定位精度的改善。在某些情况下, 移动台和基站之间的距离很近, 可以单独采用 RSS 定位方法。一般来说, RSS 定位方法需要和其它方法联合使用或在衰落较轻的环境下才能达到良好的定位效果。

TOA 定位方法的 CRLB 满足式(2):

$$\sqrt{\text{Var}(\hat{\tau})} \geq \frac{c}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{SNR\beta}} \quad (2)$$

式中:  $\hat{\tau}$  为 TOA 估计;  $SNR$  为信噪比;  $\beta$  为有效带宽, 其定义为

$$\beta \triangleq \left( \int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $S(f)$  为发射信号的傅立叶 FDT 变换。

与 RSS 定位方法不同, TOA 定位方法可以通过提高信噪比  $SNR$  或有效带宽  $\beta$  来改善定位精度。由于宽带信号或 UWB 信号本身带宽相当大, 所以 TOA 定位方法非常适合它们使用, 理想情况下, 其提供的定位精度较高。

但 TOA 定位方法一般通过时域相关滤波, 即探测相关峰的方法来获得时延估计, 这类方法的时间分辨率有限, 不能满足井下应用的要求。因此, 本文提出一种基于频域超分辨率的 TOA 定位算法, 并在复杂信道环境下对该算法进行仿真。结果表明, 频域超分辨率 TOA 定位算法可以提高时间分辨率和定位精度。

## 2 频域超分辨率 TOA 定位算法

频域 TOA 定位算法是根据信道频域响应的采样序列, 利用 IFT (逆傅立叶变换) 算法获得信道的脉冲响应, 从脉冲响应波形得到 DLOS (direct line of sight) 的到达时刻, 进而实现测距与定位功能。IFT 算法的时间分辨率为测量带宽的倒数, 即  $1/BW$ 。为了得到足够高的时间分辨率, 其带宽需要足够宽, 而 IFT 算法的测量带宽是不能无限增加的。为此, LOT、LITVAJ 等人将时域超分辨率谱估计算法引入频域, 提出了频域超分辨率 TOA 估计算法。本文借鉴这一思想并针对井下环境和信道特点, 将频域超分辨率 TOA 估计算法应用到井下人员无线定位中。

### 2.1 算法原理

实际的无线传播环境存在严重的多径效应<sup>[5]</sup>, 井下巷道更是一个多径现象十分严重的电磁波传播环境。从发射天线发出的每一个发射脉冲会发生反射、散射、绕射等现象, 可沿多条不同路径到达接收端, 接收端接收到对应的 1 组脉冲序列如图 3 所示, 表现为发射脉冲的一种 FIR 低通滤波效应。

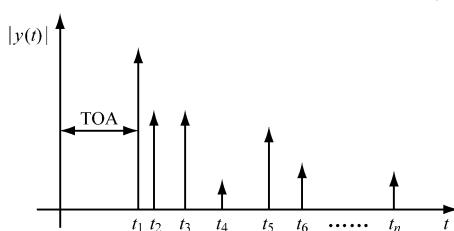


图 3 不同路径脉冲时延示意图

建模多径信道的脉冲响应如式(4)所示:

$$h(\tau) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k \delta(\tau - \tau_k) \quad (4)$$

式中:  $L_p$  为路径的条数;  $\alpha_k = |\alpha_k| e^{j\phi_k}$  为第  $k$  条路径的复值衰落;  $\tau_k$ 、 $\phi_k$  分别为第  $k$  条路径的时延和相位。

其傅立叶变换为

$$H(f) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi f \tau_k} \quad (5)$$

如果将式(5)中的  $f$  视为时间轴上的量,  $\tau_k$  视为频率轴上的量, 那么  $H(f)$  可视为一个多频率成分的时域信号, 由各个频率分量  $\tau_k$  ( $k = 0, 1, \dots, L_p$ ) 叠加而成。此时, 可以利用时域超分辨率谱估计算法进行  $\tau_k$ 、 $\alpha_k$  的估计, 估计得出的  $\tau_0$  就是 DLOS 传播的时延估计。

### 2.2 子空间分解<sup>[6~7, 10]</sup>

子空间分解是时域超分辨率谱估计算法中最有效的方法之一, 其主导思想就是根据采样序列自相关矩阵的奇异值分解(SVD)法, 将其特征空间划分为互补正交的信号子空间、噪声子空间, 然后利用子空间的正交性获得频谱估计的结果, 最终得到到达时延的估计, 理论上具有无限小的频率分辨率。下面将这一思想应用到频域时延估计(TDE)中。

在  $[f_0, f_0 + BW]$  范围内等间隔取  $L$  个频率点, 获得的频率响应记为  $x(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, L-1$ , 则:

$$x(i) = H(i) + e(i) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau_k} + e(i) \quad (6)$$

式中:  $e(i)$  为均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。

式(6)可以写成矩阵的形式, 即:

$$X = H + E = Sa + E \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} X &= [x(0) \quad x(1) \quad \dots \quad x(L-1)]^T \\ H &= [H(0) \quad H(1) \quad \dots \quad H(L-1)]^T \\ S &= [s(\tau_0) \quad s(\tau_1) \quad \dots \quad s(\tau_{L_p-1})] \\ s(\tau_k) &= [1 \quad e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f_{L_p-1} \tau_k}]^T \\ a &= [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L_p-1}]^T \\ E &= [e(0) \quad e(1) \quad \dots \quad e(L-1)]^T \end{aligned}$$

计算得到自相关矩阵  $R_{xx}$  为

$$R_{xx} = E[XX^H] = SPS^H + \sigma^2 I \quad (8)$$

式中:  $P = \text{diag}\{\alpha_0^2, \dots, \alpha_{L_p-1}^2\}$ , 为对角矩阵;

$I$  为单位矩阵。

由于式(4)中的传输时延  $\tau_k$  预先假设为互不相同, 所以矩阵  $S$  是列满秩的, 即  $S$  的列向量是线性独立的。如果假设幅值  $\alpha_k$  为常数、相位在  $[0, 2\pi]$  间均匀分布, 则方差矩阵  $P$  是非奇异矩阵。可见  $R_{xx}$  是对称矩阵。对  $R_{xx}$  进行奇异值分解:

$$R_{xx} = U \Sigma V^H \quad (9)$$

式中:  $\Sigma = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L\}$ , 且  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \geq \lambda_{L+1} = \lambda_{L+2} = \dots = \lambda_L = \sigma^2$ 。

则有如下对应关系: 前  $L_p$  个较大特征值对应

的左右奇异矢量分别记为  $U_1 = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{L_p}]$  和  $V_1 = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{L_p}]$ , 它们对应信号子空间  $S_{\text{signal}}$ ; 后  $L - L_p$  个较小特征值对应的奇异矢量分别记为  $U_2 = [u_{L_p+1} \ u_{L_p+2} \ \dots \ u_L]$  和  $V_2 = [v_{L_p+1} \ v_{L_p+2} \ \dots \ v_L]$ , 它们对应噪声子空间  $S_{\text{noise}}$ , 即特征空间可分解为  $U = [U_1 \ U_2]$ ,  $V = [V_1 \ V_2]$ , 而且子空间  $U_1$ 、 $V_1$  与  $S$  是等价的, 分别对应  $S_{\text{signal}}$  的 3 组不同的基;  $U_2$ 、 $V_2$  也是等价的, 分别对应  $S_{\text{noise}}$  的 2 组不同的基。

### 2.3 基于子空间正交性的 MUSIC 算法

根据噪声子空间  $S_{\text{noise}}$  与信号子空间  $S_{\text{signal}}$  的正交性, 求解  $\tau_k$  的方法有多种, 本文采用的是 MUSIC 算法<sup>[6, 10]</sup>。即  $\forall u_i \in U_2$  (或  $\forall v_i \in V_2$ ), 有  $S^H u_i = 0$ , 故:

$$\sum_{i=L_p+1}^L S^H u_i = 0 \quad (10)$$

所以  $\tau_k$  必须满足:

$$S^H U_2 U_2^H S = \|U_2^H S\|^2 = 0 \quad (11)$$

由此得到:

$$f_{\text{music}}(\tau_k) = \max \left( \frac{1}{\|U_2^H S\|^2} \right) \quad (12)$$

若  $\tau_k$  满足式(10)、式(11), 则  $\tau_k$  必定位于  $f_{\text{music}}$  的峰值点上, 所以只需要在  $\tau_k$  轴上搜索, 找出  $f_{\text{music}}(\tau_k)$  各峰值处所对应的  $\tau_k$  作为各条路径的到达时刻估计, 第一个峰值所对应的时刻就是 DLOS 的到达时刻, 从这个意义上说该算法具有任意的分辨率。这就是频域超分辨率 TOA 估计算法<sup>[11]</sup>。

### 2.4 频域超分辨率 TOA 定位算法的实际应用

频域超分辨率 TOA 定位算法流程如图 4 所示。接收信号  $r(t)$  首先进行信道频率冲击响应估计, 得出信道频率响应 (channel frequency response, CFR)  $\hat{H}(f)$ <sup>[12]</sup>; 然后利用超分辨率算法将 CFR 转换成由式(12) 定义的时域伪谱 (pseudospectrum); 最后, 对伪谱进行峰值检测, 伪谱首个峰值对应的时间坐标就是 DLOS 的到达时间  $\tau_0$ 。



图 4 频域超分辨率 TOA 定位算法流程图

实际应用中, 通过采样信道频率响应  $\hat{H}(f)$  计算相关矩阵  $\hat{R}_{xx}$ 。可以采用以下 2 种方法计算  $\hat{R}_{xx}$ <sup>[8]</sup>: 式(13)中使用  $P$  次快闪数据的平均值; 如果只有 1 次长度为  $N$  的快闪数据, 可以将其分成  $M$  个

长度为  $L$  的连续数据段, 通过式(14)得出  $\hat{R}_{xx}$ 。

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} [\mathbf{x}(k) \mathbf{x}(k)^H] \quad (13)$$

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} [\mathbf{x}(k) \mathbf{x}(k)^H] \quad (14)$$

式中:  $M = N - L + 1$ ;  $\mathbf{x}(k) = [x(k), x(k+1), \dots, x(k+L-1)]^T$ 。

本文仿真使用第二种方法。另外, 为了减少噪声的影响, 可以使用 2 次快闪数据  $x_1(k)$  和  $x_2(k)$  的互相关代替自相关:

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} [x_1(k) x_2(k)^H] \quad (15)$$

### 3 仿真结果与分析

仿真中, 设定测试距离为 50 m, 因此, 首径到达的时间为 166.7 ns, 即  $\tau_0 = 166.7$  ns。900 MHz 是井下移动通信的最佳工作频率, 本文仿真 800~1 000 MHz 范围内的频域特性, 频域取样间隔为 1 MHz, 测量带宽为 40 MHz,  $SNR = 10$  dB。仿真路径为 4 条, 各路径到达时间分别为 166 ns、180 ns、200 ns、220 ns。归一化幅值设定时考虑有、无障碍物的情况。

(1) 收发天线间不存在障碍物阻隔 (line of sight, LOS) 时, DLOS 到达波的幅值最大, 跟踪的 4 条路径的归一化幅值分别设定为 [1, 0.67, 0.33, 0.20], 仿真结果如图 5 所示, 时域伪谱  $f_{\text{music}}(\tau_0)$  在各路径时延  $\tau_k$  处出现尖锐的峰值, 其中首个峰值对应的时间坐标就是真实时延, 约 166 ns。

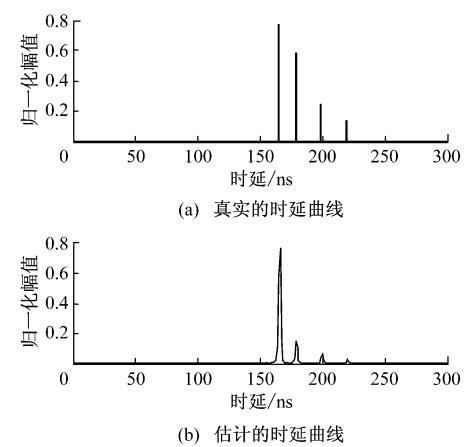


图 5 无障碍物情况下 DLOS 的时延估计曲线

(2) 由于井下环境复杂, 收发天线间经常出现障碍物阻隔 (obstructed line of sight, OLOS) 的现象, 因此, 穿透障碍物会带来幅值的衰减, 只有少量

的DLOS能到达接收天线(本文没有考虑非视距传播NLOS情况)。此时, DLOS路径不再具有最大幅值。为了反映这种情况, 跟踪的4条路径的归一化幅值分别设定为[0.3, 1, 0.33, 0.20], 仿真结果如图6所示, 在 $f_{\text{music}}(\tau_k)$ 曲线上同样出现尖锐峰值对应着各路径的时延, 其中首条路径的时延约为166 ns。

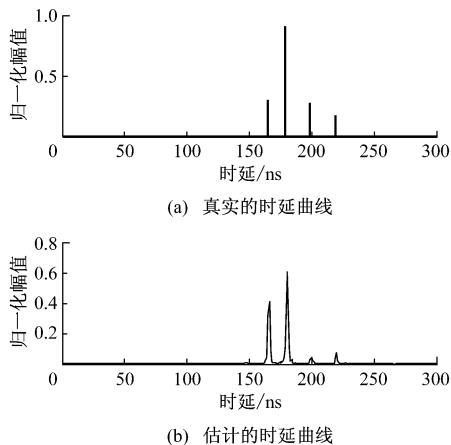


图6 有障碍物情况下 DLOS 的时延估计曲线

针对上述LOS和OLOS两种情况, 在各种信噪比下仿真1 000次后平均, 得出时延估计的均方误差MSE曲线如图7所示。

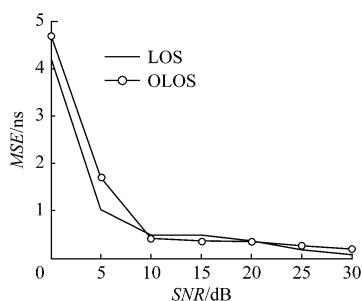


图7 LOS和OLOS情况下频率超分辨率TOA定位算法估计的均方误差MSE曲线

从图7可以看出, 在 $SNR=10$  dB时,  $MSE$ 仅为0.5 ns, 对应测距误差为15 cm。因此, 频域超分辨率TOA定位算法在低信噪比情况下同样可以实现很高的时延估计精度和测距精度。在OLOS的情况下, 也能准确估计DLOS的到达时刻, 充分体现了超分辨率的特性。

#### 4 结语

近年来, 地面和室内环境下的精确定位技术取得了很大的进展, 由于井下巷道的特殊环境, 使得井下精确定位问题比地面或室内要复杂得多。本文介绍的频域超分辨率TOA定位算法就是针对巷道特

点, 实现井下人员精确定位的一种新的测距定位方法。仿真结果证明了该算法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 刘平, 李国民. 一种用于井下人员定位的TOA定位算法研究[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3).
- [2] NDOH, M, DELISLE G Y. Underground Mine Wireless Propagation Modeling[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, 2004, Los Angeles.
- [3] SAYED A H, TARIGHAT A, KHAJEH NOURI N. Network-based Wireless Location: Challenges Faced in Developing Techniques for Accurate Wireless Location Information [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 24~40.
- [4] SUN Guorlin, CHEN Jie, GUO Wei, et al. Signal Processing Techniques in Network-aided Positioning: A Survey State of the art Positioning Designs [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 12~23.
- [5] RAPPAPORT T S. Wireless Communications: Principles and Practice [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [6] GEZICI S, TIAN Zhi, GIANNAKIS G B. Localization via UWB wideband Radios: A Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70~84.
- [7] GU VENC I, SAHINOGLU Z, ORLIK P V. TOA Estimation for IR UWB Systems with Different Transceiver Types [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 54(4): 1876~1886.
- [8] LI Xirong, PAHLAVAN K. Super resolution TOA Estimation with Diversity for Indoor Geolocation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1).
- [9] 董梅, 杨曾, 张健, 等. 基于信号强度的无线局域网定位技术[J]. 计算机应用, 2004, 12(12): 49~52.
- [10] GEZICI S. A Survey on Wireless Position Estimation [J]. Springer Wireless Personal Communications, 2008, 44(3): 263~282.
- [11] 李晶, 裴亮. 基于信道频域模型及OFDM技术的超分辨率时延估计算法[J]. 传感技术学报, 2006(3): 733~736.
- [12] 孙继平, 李继生, 雷淑英. 煤矿井下无线通信传输信号最佳频率选择[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3).