

## 基于单基站天线阵列的超宽带定位 AOA 估计方法

张浩<sup>①②</sup> 刘兴<sup>\*①</sup> Gulliver T A<sup>②</sup> 崔学荣<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

<sup>②</sup>(维多利亚大学电子与计算机工程学院 维多利亚 V8W 3P6)

**摘要:** 该文提出一种基于单基站六角单极定向天线阵列的到达角(Angle Of Arrival, AOA)估计方法,用于超宽带(UWB)室内精确定位。该文设计的 AOA 估计方法是通过测量各天线接收脉冲幅度信息,结合加入了动态参数的天线阵列的波束方向图,从而获得 AOA,避免了传统多基站定位系统中采用测量脉冲到达时间差的方法带来的部署困难以及精度不足问题。仿真结果显示,使用该文提出的 AOA 估计方法,估计误差小于 1°的概率可达到 96%,在 IEEE802.15.4a CM3 信道下,当定位距离为 10 m 时,定位误差小于 15 cm 的概率可达 80%。因此,基于该文单基站 AOA 估计方法的 UWB 定位系统部署简单,并且可提供精确的定位精度,是一种有效的定位方法。

**关键词:** 超宽带定位;单基站;天线阵列;脉冲幅度

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-2024-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01639

## AOA Estimation for UWB Positioning Using a Mono-station Antenna Array

Zhang Hao<sup>①②</sup> Liu Xing<sup>①</sup> Gulliver T A<sup>②</sup> Cui Xue-rong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Department of Electrical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

<sup>②</sup>(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, Victoria V8W 3P6, Canada)

**Abstract:** An Angle Of Arrival (AOA) estimation method for Ultra WideBand (UWB) positioning based on a mono-station Hexagonal monopole antenna array is proposed. The AOA information is obtained from the received pulse amplitudes combined with the antenna array beam pattern including dynamic parameters, rather than the time difference of pulses arrival. Performance results are presented in this paper. It shows that an AOA estimation error of less than 1 degree can be achieved with a probability of 96%. Over a location distance of 10 m via IEEE 802.15.4a CM3 channel, the proposed AOA estimation algorithm results in an error of less than 15 cm with a probability of 80%. This UWB system can be simply deployed. It also provides high accuracy, so it is an effective positioning solution.

**Key words:** Ultra WideBand (UWB) positioning; Mono-station; Antenna array; Pulse amplitude

### 1 引言

未来无线定位技术的趋势是室内定位与室外定位相结合,实现无缝的、精确的定位<sup>[1]</sup>。现有的网络技术还不能完全满足这个要求,而超宽带(UWB)技术不需要载波,直接发送、传输和接收纳秒级、亚纳秒级极窄脉冲信号进行信息传送或者目标探测等。该技术由于具备低功耗、抗多径效果好、低截获、隐蔽性好、系统复杂度低及定位精度高等传统定位技术无法比拟的优势,在众多无线定位技术中脱颖而出,成为未来无线定位技术的热点<sup>[2]</sup>。

现有的 UWB 定位系统绝大多数是基于多参考基站的<sup>[3]</sup>,各定位参考基站需要精确的时间同步,需要时间电缆的物理连接,如此极大地增加定位系统的安装难度,限制了系统的工作距离。文献[4,5]均提出了单基站的 UWB TOA/AOA 联合定位方法,来克服由多个参考基站带来的安装部署困难,系统仅使用一个定位基站来测量定位标签的距离与角度<sup>[6]</sup>。距离的测量同 TDOA 方式相同,通过测量定位标签的反射信号的 TOA 获得<sup>[7,8]</sup>。而 AOA 的测量则通过测量定位标签发射脉冲到达两个天线的到达时间差来获得<sup>[9]</sup>,由于是单基站方案,两个天线将不会距离太远,因此脉冲的到达时间差将非常小,所以测得 AOA 的精度将非常差,相应的定位精度也相当差,同时对于时钟的精度要求极高。

2012-12-18 收到, 2013-03-15 改回

国家自然科学基金-青年科学基金(60902005)资助课题

\*通信作者: 刘兴 liuxing3901@163.com

为解决如上问题与局限, 本文提出一种基于圆形天线阵列技术的单参考基站 AOA 估计方法, 通过测量参考基站天线阵列接收到的脉冲信号幅度, 结合各天线的波束方向图来精确计算信号的到达角度, 代替传统的脉冲到达时间差, 克服多基站系统在安装部署方面的局限及现有单基站 AOA 估计机制在定位精度上的不足。

## 2 单基站 AOA 估计方法

### 2.1 天线阵列配置

参考基站采用多个单极定向天线排列成圆形, 波束方向图部分重叠, 覆盖  $360^\circ$ 。天线对之间分离角度较大时, 角度测量的精度就会降低, 但覆盖  $360^\circ$  所用的天线数量就会减少<sup>[10]</sup>, 成本降低, 反之, 角度测量精度提高, 成本增加, 天线阵列尺寸增大。综合考虑成本和精度因素, 本文选择使用6个天线来覆盖  $360^\circ$ 。

假设 6 个定向天线的波束方向图均为高斯型的, 且半波束宽度为  $90^\circ$ , 则六角单极定向天线理想方向图如图 1 所示。

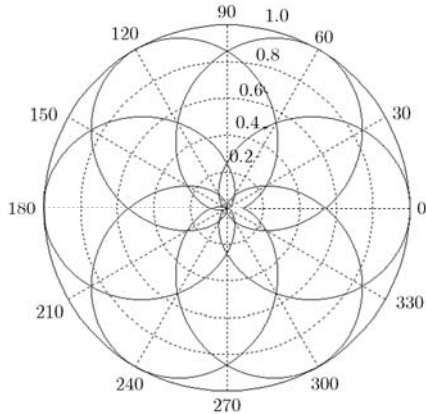


图1 六角单极定向天线阵列极坐标波束方向图

### 2.2 基于信号幅度的 AOA 估计方法

目前测量 AOA 的主要手段依然是通过测量脉冲信号到达两个不同天线的时延差计算实现的, 由于天线之间的距离不会非常大, 因此测得 AOA 的精度和相应的定位精度将较差, 同时还对时钟精度要求非常高。为解决该问题, 我们计划采用脉冲幅度测量来取代脉冲到达时间差测量, 从而实现单基站高精度定位系统。

图2(a)给出了本文使用的天线阵列中6个高斯型定向天线的归一化方向图, 可以看出, 来自任何一个方向的信号, 总会在两个相邻的天线上接收到最大强度。对于图中来自  $\alpha$  方向定位标签所发射的 UWB 脉冲, 落在天线0与天线1的覆盖范围之内, 其

至天线0与天线1的距离  $d_0, d_1$ , 假设该脉冲的幅度为  $A$ , 天线0和天线1的方向增益分别为  $f_0(\alpha), f_1(\alpha)$ , 则天线0与天线1 所接收到的脉冲幅度  $A_0, A_1$  为

$$A_0 = \frac{A f_0(\alpha)}{\sqrt{PL(d_0^2)}}, \quad A_1 = \frac{A f_1(\alpha)}{\sqrt{PL(d_1^2)}} \quad (1)$$

其中  $PL$  为 UWB 脉冲信号强度的自由空间传输损耗, 是距离的函数<sup>[11]</sup>。

$$PL(\text{dB}) = 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

其中  $d$  为基站与定位标签之间的距离,  $\lambda$  为光波波长。

因此, 如果测量到天线 0 与天线 1 接收到的 UWB 定位脉冲的脉冲幅度, 我们则可以准确反演出脉冲到达的角度(AOA)。在实际应用中, 由于基站天线与标签的距离应远大于天线的间隔, 可以认为  $d_0 \approx d_1$ 。则达到天线阵列处的信号幅度可以表示为

$$A_r = \frac{A}{\sqrt{PL(d_0^2)}} = \frac{A}{\sqrt{PL(d_1^2)}}$$

天线0和天线1接收到的信号幅度差为  $A_1 - A_0 = A_r f_1(\alpha) - A_r f_0(\alpha)$ , 接收信号幅度和为  $A_1 + A_0 = A_r f_1(\alpha) + A_r f_0(\alpha)$ 。

考虑到消除接收信号幅度差对信号强度的依赖, 定义归一化的天线0和天线1接收到的信号幅度差为

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= \frac{A_1 - A_0}{A_1 + A_0} = \frac{A_r f_1(\alpha) - A_r f_0(\alpha)}{A_r f_1(\alpha) + A_r f_0(\alpha)} \\ &= \frac{f_1(\alpha) - f_0(\alpha)}{f_1(\alpha) + f_0(\alpha)} \end{aligned} \quad (2)$$

对于不同的脉冲信号到达角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 其绝对差值为  $\Delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2|$ , 对应  $f(\alpha)$  的差值为  $\Delta f = f(\alpha_1) - f(\alpha_2)$ 。如图 2(a)所示,  $f(\alpha)$  随到达角的变化较缓慢, 较小的  $\Delta f(\alpha)$  就会带来较大的角度误差。因此分别给两天线增益引入一个随两天线增益差值变化的动态参数, 加大  $f(\alpha)$  的取值范围, 同样的  $\Delta f(\alpha)$  就会带来较小的角度误差。定义动态参数为

$$\left. \begin{aligned} p_{\max} &= \frac{A_r + |A_1 - A_0|}{A_r} \\ p_{\min} &= \frac{A_r - |A_1 - A_0|}{A_r} \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

将其引入  $f(\alpha)$ , 修正为

$$f'(\alpha) = \begin{cases} \frac{p_{\min} A_1 - p_{\max} A_0}{A_1 + A_0}, & 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ \frac{p_{\max} A_1 - p_{\min} A_0}{A_1 + A_0}, & 30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \end{cases} \quad (3b)$$

在假设  $d_0 \approx d_1$  的情况下, 动态参数和  $f(\alpha)$  可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{\max} &= 1 + |f_1(\alpha) - f_0(\alpha)| \\ p_{\min} &= 1 - |f_1(\alpha) - f_0(\alpha)| \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \frac{p_{\min} f_1(\alpha) - p_{\max} f_0(\alpha)}{f_1(\alpha) + f_0(\alpha)}, & 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ \frac{p_{\max} f_1(\alpha) - p_{\min} f_0(\alpha)}{f_1(\alpha) + f_0(\alpha)}, & 30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \end{cases} \quad (4b)$$

由于天线的波束方向图是已知的，因此在实际应用中，我们可通过测量经验值，获得  $f(\alpha)$  的查找表，从而通过测量脉冲到达时的信号幅度来获得其到达角度。

图 2(b)给出了理想的天线 0 和天线 1 之间的  $f(\alpha)$ ,  $f'(\alpha)$  曲线和 matlab 二次拟合  $f'(\alpha)$  曲线，拟合误差为  $3.68 \times 10^{-8}$ ，可以忽略。

### 2.3 AOA 估计误差

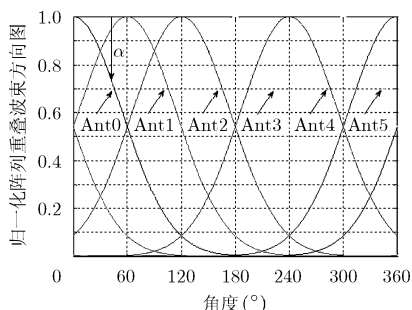
由于实际测量计算  $f'(\alpha)$  时并不是直接用天线增益，而是使用引入了测量误差之后的信号的真实幅度，因此实际系统中 AOA 估计对信号强度存在依赖。示波器的测量误差有一个范围，一般认为峰峰值在 10% 之内是正常的<sup>[12]</sup>。因此，仿真时天线 0 和天线 1 接收到的信号幅度  $A_1$  和  $A_0$  可以表示为

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A_r f_1(\alpha) + N_1 \\ A_0 &= A_r f_0(\alpha) + N_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

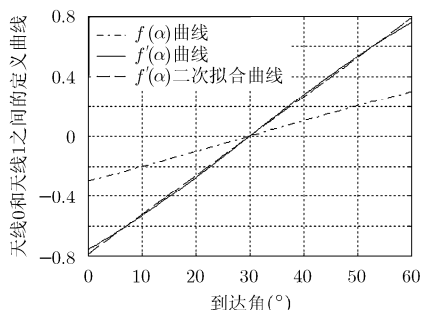
其中  $N_1$  和  $N_0$  为零均值的高斯随机变量型测量误差。

使用 MATLAB 仿真，假设到达天线阵列的信号强度  $A_r$  的取值范围为 1~10 V，步长为 1 V； $N_1$  和  $N_0$  的方差取值范围为信号强度  $A_r$  的 1%~10%，步长为  $1\% \cdot A_r$ 。AOA 估计误差定义为由式(5)、式(3a)和式(3b)计算的  $f'(\alpha)$  值与图 2(b)中的  $f'(\alpha)$  理想值之间的差。

信号强度和测量误差对基于  $f(\alpha)$  和  $f'(\alpha)$  的 AOA 估计方法精度的影响分别如图 3(a<sub>1</sub>)和 3(a<sub>2</sub>)所示，可以看出，基于  $f(\alpha)$  的 AOA 估计误差在 2° 以内，而基于  $f'(\alpha)$  的 AOA 估计误差则小于 1.5°。图 3(b)给出了 AOA 估计误差的累积分布图。修正之后的 AOA 估计误差在 1° 之内的概率为 95.95%，1.5° 之内的概率为 99.5%，优于基于  $f(\alpha)$  的 AOA 估计方法。而文献[4]采用传统的测量脉冲到达时间差的方法，使用阵元数量为 2 的直线阵列估计 AOA，误差高达 10°；文献[13]在此基础上，引进时域平滑方法改善 AOA 估计精度，估计误差最小可以达到 3°。因此，本文提出的基于圆形天线阵列中各天线接收到的脉冲幅度信息来估计 AOA 的方法，较传统的基于脉冲到达时间差的 AOA 估计方法估计误差小，可以实现高精度定位。

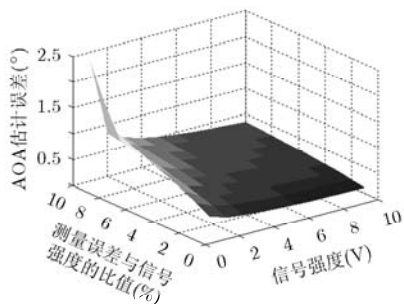


(a) 天线阵列归一化波束方向图

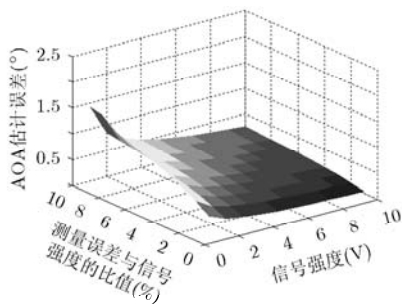


(b) 理想的  $f(\alpha)$ ,  $f'(\alpha)$  曲线和 Matlab 二次拟合  $f'(\alpha)$  曲线

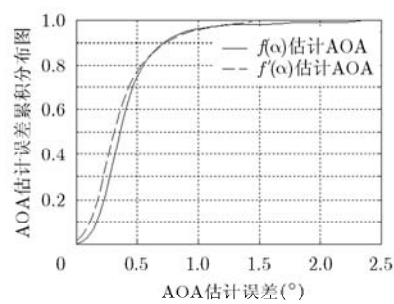
图2 天线阵列波束方向增益及天线0, 天线1之间的定义曲线



(a<sub>1</sub>) 信号强度和测量误差对  $f(\alpha)$  估计 AOA 精度的影响



(a<sub>2</sub>) 信号强度和测量误差对  $f'(\alpha)$  估计 AOA 精度的影响



(b) AOA 估计误差累积分布图

图3 AOA 估计性能分析图

### 3 定位性能分析

#### 3.1 系统模型和定位算法

使用文献[14]提出的单基站定位算法,对本文提出的基于圆形天线阵列的 AOA 估计方法进行定位性能分析,这种单基站定位算法利用天线估计定位标签所发射的 UWB 信号到达基站的时间和角度,使用 TOA 和 AOA 联合参数来估计定位标签的 2 维位置。如图 4 所示,基站 BS 的坐标为 $(x_1, y_1)$ ,待确定的标签 MS 坐标为 $(x, y)$ ,假设 MS 发射的 UWB 信号到达 BS 的传播时延为 $\tau$ ,定位标签所发射的 UWB 信号来波方向为 $\alpha$ ,则定位标签 MS 的位置为

$$\begin{cases} x = x_1 + (c \times \tau) \times \cos \alpha \\ y = y_1 + (c \times \tau) \times \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

其中 $c$ 是光速。

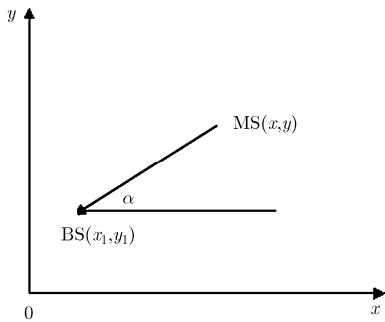


图4 系统模型

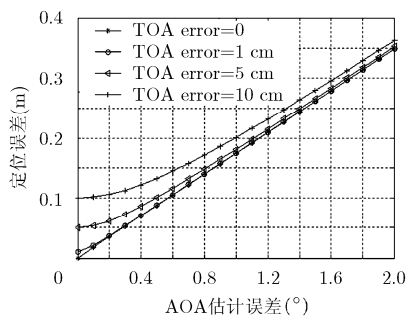


图5 AOA, TOA 估计误差对定位精度的影响

信道覆盖的范围是 $3 \sim 28 \text{ m}$ <sup>[15]</sup>,因此,使用本文提出的 AOA 估计方法可实现室内精确定位。

#### 4 结束语

本文提出了一种新型的基于圆形天线阵列的 AOA 估计方法。这种方法通过测量单参考基站天线阵列接收到的脉冲信号幅度,结合各天线的波束方向图来精确计算信号的到达角度,估计精度可达 $1^\circ$ 。将此方法用于单基站 AOA/TOA 联合 UWB 定位系统,定位精度在 $15 \text{ cm}$ 之内的概率可达 $80\%$ 。

#### 3.2 仿真结果

在理论分析时,BS 的位置是确定的,不存在误差,因此 TOA 和 AOA 的估计误差是定位误差的主要来源。在 IEEE802.15.4a 提供的信道模型 CM3 室内办公环境<sup>[15]</sup>下,假设定位标签与基站之间的真实距离为 $10 \text{ m}$ ,利用最大概率 TOA 估计方法对室内信道测距进行仿真研究<sup>[16]</sup>,则 TOA 估计误差可控制在 $10 \text{ cm}$ 之内。分别取测距误差为 $0, 1 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}$ ,分析 AOA 和 TOA 估计误差对定位精度的影响。

从图 5 可以看出 AOA 估计误差比 TOA 估计误差对定位精度有更大的影响,较小的角度误差就会带来很大的定位误差,尤其是在 TOA 估计较精确的时候这种影响更明显,图中曲线“ $\ominus$ ”是 TOA 估计精度为 $1 \text{ cm}$ 时, $1^\circ$ 的角度误差会带来约 $15 \text{ cm}$ 的定位误差,增大了数量级。

图 6 是根据 2.3 节 AOA 估计误差的概率累积分布图绘制的 TOA 误差分别取 $0, 1 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}$ 时定位误差的概率累积分布图,可以看出当 TOA 估计误差为 $0, 1 \text{ cm}, 5 \text{ cm}$ 时,基于天线阵列的单基站定位误差小于 $15 \text{ cm}$ 的概率为 $95\%$ 左右,而当 TOA 估计误差为 $10 \text{ cm}$ 时,基于天线阵列的单基站定位误差小于 $15 \text{ cm}$ 的概率也能达到 $85\%$ 以上,与现有多基站 UWB 定位系统性能相当,但大大减少了系统成本,降低了部署难度。IEEE802.15.4a UWB

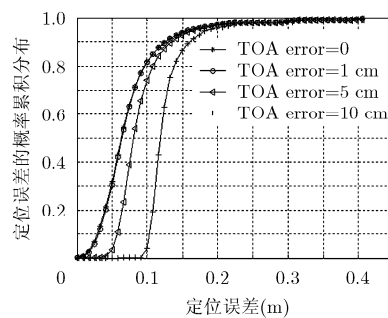


图6 定位误差的概率累积分布图

本文提出的单基站 AOA 估计方法屏蔽了以往参考基站之间高精度同步的要求,显著降低了对系统时钟精度的要求,以及安装部署的难度,扩大了系统的工作范围,同时并不牺牲定位精度。

#### 参考文献

- [1] 李渝,李青. 常见无线通信定位技术研究[J]. 无线通信技术, 2012, (1): 8-12,16.  
Li Yu and Li Qing. The research of common wireless location technology of communication[J]. *Wireless Communication*

- Technology*, 2012, (1): 8-12,16.
- [2] 肖竹, 王勇超, 田斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 133-141.  
Xiao Zhu, Wang Yong-chao, Tian Bin, *et al.*. Development and prospect of ultra-wideband localization research and application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(1): 133-141.
- [3] Wann C D, Yeh Y J, and Hsueh C S. Hybrid TDOA/AOA indoor positioning and tracking[C]. IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, Melbourne, 2006: 1058-1062.
- [4] Eva L, Montse N, and Monica N. UWB joint TOA and DOA estimation[C]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Vancouver, 2009: 839-843.
- [5] 丁锐, 钱志鸿, 王雪. 基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 313-317.  
Ding Rui, Qian Zhi-hong, and Wang Xue. UWB positioning system based on joint TOA and DOA estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 313-317.
- [6] Tan A E C, Chia M Y W, and Karumudi R. Angle accuracy of antenna noise corrupted ultra-wideband[C]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Singapore, 2007: 586-589.
- [7] Saeed R A, Khatun S, Ali B M, *et al.*. Performance of ultra-wideband time-of-arrival estimation enhanced with synchronization scheme[J]. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 2006, 4(1): 78-84.
- [8] 姜向远, 张焕水, 王伟, 等. IR-UWB 能量检测接收机中基于门限的 TOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1361-1366.  
Jiang Xiang-yuan, Zhang Huan-shui, Wang Wei, *et al.*. Threshold-based TOA estimation in IR-UWB energy detection receiver[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1361-1366.
- [9] 林华芳, 徐明远, 徐晟. 均匀直线阵的波达方向估计[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2003, 25(4): 317-320.  
Lin Hua-fang, Xu Ming-yuan, and Xu Sheng. The estimate of direction of arrival for ULA[J]. *Journal of Yunnan University (Science and Technology)*, 2003, 25(4): 317-320.
- [10] Sun X B, Ma Y G, Xu J, *et al.*. A high accuracy mono-station UWB positioning system[C]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Germany, 2008: 201-204.
- [11] 蒙静. 基于 IR-UWB 无线室内定位的机理研究[D]. [博士论文], 哈尔滨工业大学, 2010.  
Meng Jing. Research on IR-UWB propagation mechanism for wireless indoor positioning system[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2010.
- [12] Wagner L. Agilent announces oscilloscopes with advanced displays[J]. *Electronic Device Failure Analysis*, 2012, 14(2): 42-44.
- [13] Naohiko I and Takehiko K. Joint TOA and AOA estimation of UWB signal using time domain smoothing[C]. The 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Piscataway, 2007: 120-125.
- [14] Taponecco L, D'Amico A A, and Mengali U. Joint TOA and AOA estimation for UWB localization applications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(7): 2207-2217.
- [15] IEEE P802.15-04-0662-00-004a. IEEE 802.15.4a channel model—final report[S]. 2006.
- [16] Cui X R, Zhang H, Zhang L, *et al.*. A novel wireless location algorithm based on high probability measurements[C]. International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, Zibo, 2010: 612-615.
- 张 浩: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为超宽带无线通信、卫星导航。
- 刘 兴: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为超宽带定位技术。