

基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法

丁锐 钱志鸿 王雪

(吉林大学通信工程学院 长春 130025)

摘要: 对于 UWB 定位系统而言, 利用时间参数估计信号源的位置需要多个参考节点, 这样增加了系统的开销。如果参考节点既能估计目标源的时间参数又能估计角度参数, 理论上一个参考节点就可以确定目标源的位置。该文提出一种 UWB 系统 TOA(到达时间)和 DOA(到达角度)参数联合估计的定位方法, 该方法使用矩阵束算法估计出时间参数和角度参数, 进而得到目标的相对坐标。该方法通过单个接收机就可以确定目标的位置, 减少了定位系统负担。仿真实验证实了该方法估计时延和角度精度较高, 而且定位精度能够达到厘米级, 是一种简单可行的 UWB 系统定位方法。

关键词: 超宽带; 定位; 到达时间; 到达角度

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0313-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00140

UWB Positioning System Based on Joint TOA and DOA Estimation

Ding Rui Qian Zhi-hong Wang Xue

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: For UWB positioning system based on time delay estimation, there must be multiple reference nodes which increase the cost of system. If the reference source node can estimate the Time Of Arrival (TOA) and Direction Of Arrival (DOA) together, the location of the target can be obtained with only one reference node. In this paper, a UWB positioning system based on joint TOA and DOA estimation is proposed. The algorithm of estimation is based on Matrix Pencil (MP), and then relative coordinates of the target can be obtained. The advantage of the approach with one receiver is low cost for system. Through simulations, it is proved that the accuracy of delay and angle estimation is good, and positioning accuracy can achieve centimeter-level. It is available and practical method of UWB positioning systems which is proposed in this paper.

Key words: UWB; positioning; TOA; DOA

1 引言

随着无线通信技术的发展, 新兴的无线网络技术, 例如 WiFi, WiMax, ZigBee, UWB 技术在办公室、家庭、工厂等领域得到了广泛应用。而 UWB 无线定位技术具有功耗低、抗干扰性能强、安全性高、系统复杂度低、能提供精确定位精度的优点, 已经成为未来无线定位技术中备受关注的焦点^[1,2]。

根据估计参数的不同, 通常无线测距技术可以分为: 接收信号强度(RSS), 信号到达方向(DOA), 信号到达时间(TOA)3 种方法。由于 UWB 系统采用持续时间为纳秒级的脉冲作为传输信号, 所以相比较而言时间分辨率较高, 基于 TOA 的测距定位方法也就成了 UWB 定位系统最常用的方法, 其关键问题就是精确估计出 UWB 信号经直达路径传播的时间延迟。在以往的文献当中, 最大似然检测方

法^[3], MUSIC^[4,5], 子空间方法^[6], 基于传感器网络的时延估计^[7]等估计方法都可以用来估计系统的时延。

但是, 对于定位系统而言, 利用时间参数估计信号源的位置需要多个参考节点, 这样增加了系统的开销。如果参考节点既能估计目标源的时间参数又能估计角度参数, 理论上一个参考节点就可以确定目标源的位置。文献[8,9]中, 提出了一种联合 TOA 和 DOA 的估计方法, 并应用在 IR-UWB 系统中, 但是该方法需要估计信号的相关矩阵, 相对复杂; 文献[10]中提出了基于时间域平滑的 TOA 和 AOA 的估计方法, 但是该方法需要额外的时间域平滑处理, 在增加了分辨率的同时也加大了系统的复杂度。

因此, 本文提出了基于 MP 算法的 TOA 和 DOA 联合估计方法, 用一台带有两根天线的接收机同时估计时间参数和角度参数, 用时间参数确定距离, 用角度参数确定方向, 从而确定信号源 2 维

2009-02-02 收到, 2009-10-22 改回

教育部科技重点项目(106059)资助课题

通信作者: 丁锐 dr.gzh@163.com

的坐标。矩阵束时延估计算法^[11-13]不像传统的 MUSIC 方法需要对接收信号的协方差阵进行特征值分解,它直接对输入信号进行处理,因此它除了具有超分辨特性的同时,还具有计算量小,计算速度快的优势。所以本文提出的定位方法是一种简单有效的方法。

2 系统模型

考虑一个均匀线阵模型,如图1所示。

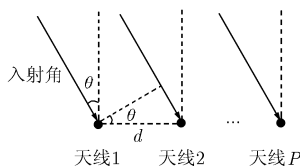


图1 DOA 天线阵列示意图

假设信号源与天线阵足够远,即信源与阵列的距离远大于阵元的间距,则信号入射到天线阵列的时候可以认为到达每根天线的信号都是平行的。令 $\tau_{\text{toa}i}$ 表示到达第 i 根天线的 TOA 估计值, $\Delta\tau_{\text{tdoa}i}$ 是相邻两个天线接收信号的到达时间差, $i=1, \dots, P-1$, P 表示天线数, θ 代表 DOA 的角度, $c=3 \times 10^8$ m/s 代表电磁波传播速度。所以

$$\Delta\tau_{\text{tdoa}i} = \tau_{\text{toa}i+1} - \tau_{\text{toa}i} = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (1)$$

从式(1)可以得到

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\tau_{\text{tdoa}i}c}{d}\right) \quad (2)$$

求 DOA 就要求出到达两根天线的信号的时延差,求时延差一般有两种:一种是求两个天线的信号到达时间 TOA 之差来获得;另一种,采用相关技术,将两根天线的信号直接进行互相关运算以获的时延差。但是对于超宽带信号来讲,相关的方法分辨率较低,所以本文中采用前一种方法来获得时延差,而且这种方法,当两根天线接收的信号,由多径引起的误差有相同的反射体而据有相关性时,这种方法将提高估计精度。

本文中的定位系统由一个带有两根天线的接收机和一个发射机(定位目标)组成,接收机的原理如图2所示。

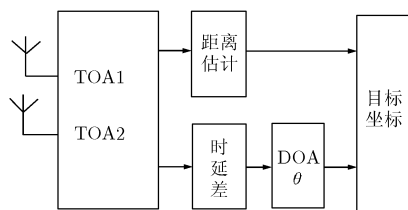


图2 接收机示意图

接收机通过测量信号源的信号到达时间,从而得到时延差,进而根据式(2)估计出到达角度,在根据到达时间计算出的信源与接收机的直线距离,就可以确定信源的2维相对坐标。

如图3所示,建立坐标系,接收机位于原点处。

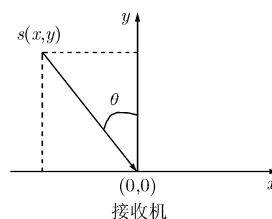


图3 定位示意图

所以,信源的坐标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= \sin(\theta)c \frac{\tau_{\text{toa}1} + \tau_{\text{toa}2}}{2} \\ y &= \cos(\theta)c \frac{\tau_{\text{toa}1} + \tau_{\text{toa}2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 算法描述

假设采用 BPSK-TH(二进制相移键控跳时)UWB 信号模型,令 N_f 代表帧的数, T_f 代表帧的持续时间, $T_s=N_fT_f$ 代表一个符号的持续时间;由于二进制传输, $d(m) \in \{\pm 1\}$, 表示第 u 个用户的第 m 个符号,每帧包含 N_c 个 chip, 每 chip 持续时间 T_c , 则每帧的持续时间为 $T_f=N_fT_f+T_g$, 其中 T_g 是两个接受符号之间的处理时延的保护时间, $c_u(m)$ 是第 u 个用户的跳时码, E_u 代表第 u 个用户的信号强度, 则第 u 个用户的波形可表示为

$$s_u(t) = E_u \sum_{m=0}^{\infty} d(k)p(t - kT_f - c_u(m)T_c) \quad (4)$$

其中

$$p(t) = (1 - 4\pi t^2 / T_p^2) \exp\left[-\frac{2\pi t^2}{T_p^2}\right] \quad (5)$$

T_p 是脉冲的成形因子。

根据 S-V(Saleh-Valenzuela)模型^[14], 第 k 簇的信道冲击响应表达式为

$$h(t) = \sum_{l=1}^L a_l e^{j\phi_l} \delta(t - \tau_l^{(k)}) \quad (6)$$

其中 L 是第 k 簇中包含的总多径数, a_l 是第 k 个簇中第 l 路径的幅度,服从瑞利(rayleigh)分布。 $\tau_l^{(k)}$ 是第 k 簇中第 l 条路径的时延。相位 ϕ_l 服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布。令 $\alpha_l = a_l e^{j\phi_l}$ 代表整个的衰减幅度。相对于幅度衰减,簇之间的各多径的时延可以认为是不变的,即 UWB 信道可视为准静态信道,所以认为 $\tau_l^{(k)} = \tau_l$, 于是第 k 簇的信道冲击响应表示为

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - \tau_l) \quad (7)$$

考虑单一用户, 令 $s(t) = s_u(t)$, 接收机天线接收到的 UWB 信号表示为

$$y(t) = s(t) * h(t) + w(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l s(t - \tau_l) + w(t) \quad (8)$$

将接收到的信号进行傅里叶变换, 则接收信号的频域表达式是

$$Y(f) = S(f)H(f) + W(f) = S(f) \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{-j2\pi f \tau_l} + W(f) \quad (9)$$

其中 $Y(f)$, $S(f)$, $W(f)$ 和 $H(f)$ 分别是 $y(t)$, $s(t)$, $w(t)$ 和 $h(t)$ 的傅里叶变换。

根据式(9), 把带宽 B 均匀的分成 N 段, 频域采样 $\Delta f = B/N$, 为了避免符号间的干扰 $1/\Delta f \geq 2\tau_{\max}$, τ_{\max} 是信道的最大时延, $N > L$, $n=0, \dots, N-1$ 则在接收端得到的数据表示为

$$Y(n) = S(n) \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{-j2\pi n \Delta f \tau_l} + W(n) \quad (10)$$

由式(10)可得

$$\hat{H}(n) = \frac{Y(n)}{S(n)} = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{-j2\pi n \Delta f \tau_l} + V(n) \quad (11)$$

其中 $V(n) = W(n)/S(n)$ 。

令 $z_l = e^{-j2\pi \Delta f \tau_l}$, 有

$$\hat{H}(n) = \sum_{l=1}^L \alpha_l z_l^n + V(n) \quad (12)$$

只要能够估计出 z_l , 就能够得到 τ_l 。把 $\hat{H}(n)$ 写成如下形式:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \hat{H}(0) & \dots & \hat{H}(L) \\ \hat{H}(1) & \dots & \hat{H}(L+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{H}(N-L-1) & \dots & \hat{H}(N-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过 \mathbf{X} 得到两个 $(N-L) \times L$ 的矩阵 \mathbf{X}_1 和 \mathbf{X}_2

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} \hat{H}(0) & \dots & \hat{H}(L-1) \\ \hat{H}(1) & \dots & \hat{H}(L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{H}(N-L-1) & \dots & \hat{H}(N-2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} \hat{H}(1) & \dots & \hat{H}(L) \\ \hat{H}(2) & \dots & \hat{H}(L+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{H}(N-L) & \dots & \hat{H}(N-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

将以上两个矩阵写成:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{A} \mathbf{Z}_2 \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{A} \mathbf{Z}_0 \mathbf{Z}_2 \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_L \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{(N-L-1)} & \dots & z_L^{(N-L-1)} \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (18)$$

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \dots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \dots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_L & \dots & z_L^{L-1} \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (19)$$

$$\mathbf{Z}_0 = \text{diag}[z_1 \ z_2 \ \dots \ z_L] \quad (20)$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_L] \quad (21)$$

考虑矩阵束:

$$\mathbf{X}_2 - \lambda \mathbf{X}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{A} [\mathbf{Z}_0 - \lambda \mathbf{I}] \mathbf{Z}_2 \quad (22)$$

z_l 就是矩阵对 $[\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2]$ 的广义特征值。再根据 $z_l = e^{-j2\pi \Delta f \tau_l}$, 可以求出 τ_l , 即到达天线信号的多径时延。假设接收机与发射机之间没有遮挡, 即视距传播环境(LOS), 则第 1 条到达天线的多径时延 τ_1 就是信号的 TOA。每根天线分别估计出 $\tau_{1i} (i=1, \dots, P-1)$, P 表示天线数, 令 $\tau_{\text{toai}} = \tau_{1i}$, 根据式(1)和式(2)计算出 θ , 这样就得到了信号的 TOA 和 DOA 参数。

4 仿真实验

利用 Matlab2008a 对上述算法进行仿真。UWB 信号的脉冲宽度为 1 ns, $T_c = 2$ ns, $T_f = 10$ ns, 频域采样 $\Delta f = 2$ GHz, $E_u = 1$ 。

4.1 TOA 和 DOA 联合估计的结果

接收机有两根天线, 两根天线的间距为 10 cm。假设只估计前 4 条到达每根天线的多径时延, 则 $L=4$, 但是只取第一到达路径的时延作为 TOA 参数; 信源与接收机的距离为 15 m, 以满足平行入射的条件; 信噪比为 $\text{SNR}=5$ dB; 分 5 种情况进行估计, 即入射角 θ 为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 75° 五种情况, 估计第 1 根天线的 TOA, 第 2 根天线的 TOA 和 DOA, 得到的估计结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 基于矩阵束算法的 TOA 和 DOA 估计结果是很准确, 时间的误差在 10^{-3} ns 级别, 而角度在 0.1° 左右。

表 2 是入射角度为 30° , 信噪比不同时, 本文 TOA 和 DOA 联合估计算法得到的结果。

表1 TOA 和 DOA 联合估计的结果
(SNR=5 dB, 时间: ns, 角度: °)

τ_{toa1}	τ_{toa2}	θ
50.002	49.914	15.1640
49.999	49.837	29.9324
50.000	49.765	44.9530
49.998	49.9713	59.815
49.999	49.676	74.7697

表2 不同信噪比下的估计结果
(时间: ns, 角度: °)

SNR	τ_{toa1}	τ_{toa2}	θ
-10	50.001	49.830	29.7963
-5	49.999	49.835	30.1114
0	49.998	49.834	29.7709
5	50.001	49.834	30.0147
10	50.001	49.832	30.1000

从表2中,可以看到,信噪比在-10 dB到10 dB之间,本文算法均能较为精确地估计出TOA和DOA参数。但是,误差和信噪比的关系并不能够明显的从表2得到。因此,在不同信噪比下,分别对信号源进行1000次的估计,得到的TOA和DOA均方根误差(RMSE)如表3所示。

表3 TOA 和 DOA 的 RMSE 与 SNR 的关系
(SNR: dB, 时间: 10^{-3} ns, 角度: °, 估计1000次)

SNR	-10	-5	0	5	10
时间 RMSE	2.3184	1.8663	1.6267	1.4553	1.1209
角度 RMSE	0.2147	0.1792	0.1532	0.1358	0.1052

表3中可以清楚的看到,TOA和DOA的RMSE性能随着信噪比的提升而减小,这就意味着信噪比越高,本文的联合估计方法效果越好。

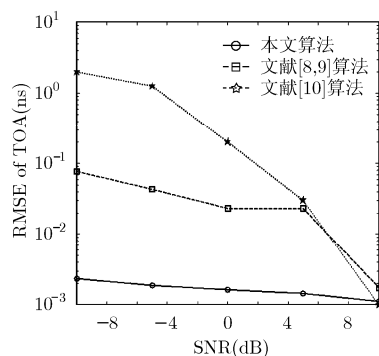


图4 到达时间 RMSE 比较

图4和图5是本文所提算法和文献[8-10]所提算法的时间估计和角度估计的均方根误差(RMSE)曲线比较。从图中可以看出,本文算法估计出的TOA和DOA的误差均小于文献[8-10]所提算法的误差,说明本文提出的联合估计方法效果较好。证明了MP算法具有很高的时延估计精度和角度估计精度。

4.2 基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法仿真

假设在一个 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的平面上,接收机摆放在其中一个边的中间,其坐标为(25, 0),随机生成5个目标点,注意这5个目标点与接收机的直线距离应大于10 m,以满足信号平行入射的条件。估计的结果如图6所示。

从图6(a)中可以看出,估计出的位置与实际位置基本是重合的,这说明本文提出的方法能够较为准确的估计出信源的位置。从图6(b)可以看出他们的区别,这说明估计的误差在厘米级。

图7是本文所提算法和文献[8-10]所提算法对目标位置估计的均方根误差曲线比较。从图中可以看出,本文提出的定位方法的误差均小于文献[8-10]所提算法的误差,说明本文提出的定位方法效果较好。这主要原因在于,本文算法的TOA和DOA的估计精度要优于文献[8-10]所提算法的估计精度。

以上几个仿真实验证实了本文提出的方法的有效性和可行性。

5 总结

本文提出了一种的基于TOA和DOA联合估计的UWB信源定位方法。该方法的主要优点在于,仅使用一个接收机就可以估计发射机的位置,节约了系统的开销。而且本文提出了基于MP算法的TOA和DOA的联合估计方法,继承了MP算法的优点:不需构造协方差阵,计算量少,速度快,能降低接收机的运算开销。而且通过高精度的时延估

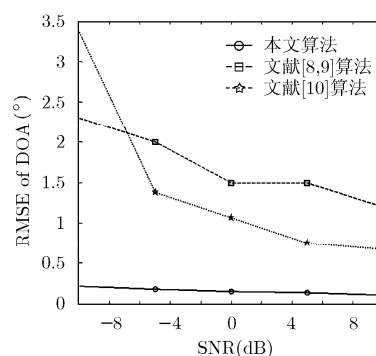


图5 到达角度 RMSE 比较

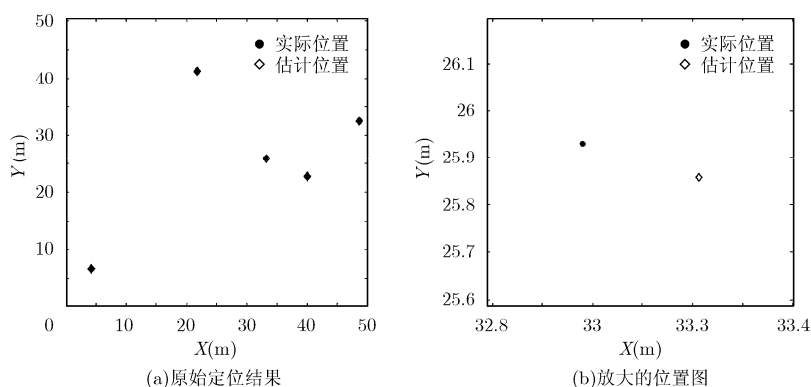


图6 随机产生5个点的定位图

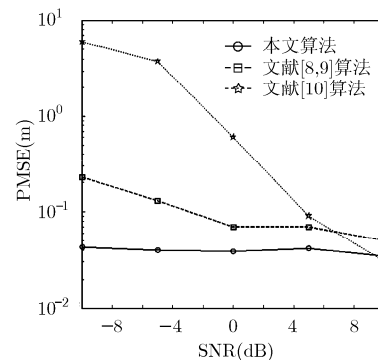


图7 定位误差比较

计来计算角度, 避开了宽带源 DOA 估计阵列孔径过大和频率偏移的问题。通过实验仿真可以看到, 这种方法的估计精度高, 能够准确的估计出目标位置, 是一种简单有效的适用于 UWB 系统的定位方法。但本文方法是在信源和接收机足够远的情况下, 即是天线间距要远小于信源和接收机之间的距离, 对于近距离位置估计(如 5 m 内)不再成立, 因此有一定的局限性, 还需要不断的改进。

参考文献

- [1] Gezici S. A survey on wireless position estimation[J]. *Springer Wireless Personal Communications*, 2008, 44(3): 263-282.
- [2] Sayed A H, Tarighat A, and Khajehnouri N. Network-based Wireless Location[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 24-40.
- [3] Win M Z and Scholtz R A. Characterization of Ultra-wide bandwidth wireless indoor channels: A communication theoretic view[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(9): 1613-1627.
- [4] Jiang Hong, Cao Fucheng, and Ding Rui. Propagator method-based TOA estimation for UWB indoor environment in the presence of correlated fading amplitudes[C]. *International Conference on Circuits and Systems for Communications 2008. ICCSC 2008. Shanghai China, 26-28 May 2008*: 535-538.
- [5] Wann Chin-der and Hsu Sheng-hsiung. Estimation and analysis of signal arrival time for UWB systems[C]. *IEEE 2004 VTC, Los Angeles, September 26-29 2004, Vol.5*: 3560-3564.
- [6] 曹福成, 王树勋, 孙晓颖. 基于子空间的 DS-UWB 系统高分辨率低复杂度时延估计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2008, 38(2): 471-475.
Cao Fu-cheng, Wang Shu-xun, and Sun Xiao-ying. High resolution and low complexity subspace based delay estimation for DS-UWB system[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(2): 471-475.
- [7] 张华, 宋正勋, 石云, 李娜, 张福威. 基于超宽带的 TOA 定位技术研究[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2008, 26(1): 106-110.
- [8] Zhang Hua, Song Zheng-xun, Shi Yun, Li Na, and Zhang Fu-wei. Research of TOA ranging technology based on UWB[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2008, 26(1): 106-110.
- [9] Navarro M and Najar M. Joint estimation of TOA and DOA in IR-UWB[C]. *SPAWC 07. IEEE 8th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Marina Congress Center, Helsinki, Finland, June 17-20, 2007*: 1-5.
- [10] Navarro M and Najar M. TOA and DOA estimation for positioning and tracking in IR-UWB[C]. *ICUWB 2007. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Singapore, 24-26 Sept. 2007*: 574-579.
- [11] Iwakiri N and Kobayashi T. Joint ToA and AoA estimation of UWB signal using time domain smoothing[C]. *ISWPC 2007. 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, San Juan, Puerto Rico, 5-7 Feb. 2007*: 120-125.
- [12] Dharamdial N, Adve R S, and Farha R. Multipath delay estimation using matrix pencil[C]. *Wireless Communications and Networks 2003, Vol.1*: 632-635.
- [13] Hua Y and Sarkar T K. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, 38(5): 814-824.
- [14] Bayat K and Adve R S. Joint TOA/DOA wireless position location using matrix pencil[C]. *Vehicular technology conference, Los Angeles, September 26-29 2004, Vol.5*: 3535-3539.
- [15] Saleh A A M and Valenzuela R A. A statistical model for indoor multipath propagation[J]. *IEEE Journal on selected Areas in Communications*, 1987, 5(2): 128-137.

丁锐: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为超宽带(UWB)无线定位。

钱志鸿: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为近程无线网络通信技术, 包括以 Bluetooth(蓝牙)和 ZigBee 为代表的 Ad-hoc(自组织网络)技术、WLAN(无线局域网)技术、RFID(射频识别)技术、UWB(超宽带)通信技术和 WSN(无线传感器网络)技术等。

王雪: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为基于 MB-OFDM 的超宽带系统同步、定时与频偏估计。