基于 Matrix Pencil 的 OFDM 信号的 TOA/ AOA 定位

陈 奎¹,黄为勇¹,田传耕²

(1. 徐州工程学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221000; 2. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要:为提高估计精度,提出一种基于低复杂度的矩阵束方法(MPM)的 OFDM 信号超分辨率 TOA/AOA 二维 定位方法。首先,对信道频率响应(CFR)采用 MPM 方法进行时延估计,得出首径(FAP)时延,即 OFDM 信号的 TOA 估计;然后,对天线接收信号的频域阵列信号使用同样的算法进行 AOA/DOA 估计;最后,联合 TOA、AOA 估计结果在二维平面内确定目标的位置。由于载波间的相关性和相干多径的影响,使 AOA 估计的 RMSE 偏差 比 TOA 估计大,所以对 TOA 估计过程中的各径幅值,设置权值对非首径的幅值进行抑制,减少对后续首径 AOA 估计的影响。利用 OFDM 信号进行仿真,其结果表明,非首径幅值抑制方法能明显提高 AOA 估计精度和无偏 性,使整体定位误差明显改善,满足单基站或接入点室内定位的需要。

关键词:矩阵束;到达时间;到达角度;无线定位;OFDM

中图分类号: TN911.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)02-0534-03 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.059

Matrix Pencil joint TOA/AOA positioning algorithm for OFDM

CHEN Kui¹, HUANG Wei-yong¹, TIAN Chuan-geng²

(1. Dept. of Information & Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou Jiangsu 221000, China; 2. School of Information & Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract: For improving the prediction accuracy of the TOA and AOA parameter, this paper proposed a low complexity Matrix Pencil algorithm for OFDM signal's super-resolution TOA/AOA two-dimensional positioning. First, the first-path delay, that was, it obtained the OFDM signal's TOA estimation through using MPM method to channel frequency response parameters. Then, it also gained the AOA/DOA estimation by using the same MPM method to parameters received by antenna array in frequency domain. Finally, the location within 2-D plane could be acquired by joining the TOA estimation RMSE was much bigger than TOA's. So, it added the different weights to each path's amplitude in order to strengthen the FAP amplitude and decrease the other paths' amplitude, to lower the impact on the follow AOA estimation process. Simulations presented here employ the OFDM signal to illustrate the efficiency of the proposed algorithms. The results show that restrain to non-FAP amplitude can improve RMSE performance and unbiasedness of the AOA estimation, also, can improve the whole positioning process' accuracy significantly.

Key words: Matrix Pencil; time of arrivals(TOA); angel of arrivals(AOA); Wireless positioning; OFDM

来波的到达时间(TOA)和到达角度(AOA)是无线定位过 程中主要的定位估计量。利用直达路径的TOA和AOA估计 可确定移动台相对于基站的位置。无线定位的性能依赖于 TOA和AOA估计的精度、鲁棒性、可靠性、估计速度。OFDM 天线阵列接收系统利用天线的空间域特性,性能优于传统的 OFDM系统,并已在IEEE 802.16标准中得以使用^[1,2]。通常 OFDM多天线接收结构可以分成两类,即PRE-FFT和POST-FFT,后者是最大信噪比意义上的最优方法^[1-3]。

Matrix Pencil 相比于其他超分辨率算法(如 MUSIC 算法), 有很多优于它们的特点^[4,5]。Matrix Pencil 不需要计算信号的 协方差矩阵,直接处理信号采样不需要数据样本独立。另外, Matrix Pencil 计算开销较小,只需一次快拍数据就可以估计 TOA/TOA。相关运算的结果对 Matrix Pencil 的效率和性能的 影响不大,这又是一个优点^[4,5]。OFDM 系统定位、超分辨率算 法和 Matrix Pencil 算法在很多文献被提出并在无线定位中应用。Humphrey 等人将 MUSIC 超分辨率算法应用于室内定位; Labib 等人将超分辨率 Matrix Pencil 方法应用到 2G/3G/4G 系统的时延定位研究;Quyen 将超分辨率算法应用到 OFDM 系统的无线定位^[6-9]。

1 Matrix Pencil TOA/DOA 估计算法

1.1 Matrix Pencil 算法^[8]

м

考虑下面的一个长度为 N 的指数数据序列:

$$y_n = \sum_{m=1}^{m} \alpha_m z_m^{(n-1)} + w_n \quad z_m = \exp(b_m + j x_m)$$
(1)

其中: $n = 1, 2, \dots, N; w_n$ 为噪声; $\alpha_m \in M$ 个信号中第 m 个信号 的复增益。需要使用 Matrix Pencil 估计的参数就是 z_m (m = 1,

收稿日期: 2012-07-03; 修回日期: 2012-08-13

作者简介:陈奎(1971-),男,江苏徐州人,江苏省计算机学会嵌入式分会会员,讲师,博士,主要研究方向为无线定位系统、无线传感器网络 (KUIRS@163.com);黄为勇(1963-),男,副教授,博士,主要研究方向为多传感器信息融合、无线传感器网络;田传耕(1981-),男,博士,主要研究 方向为通信与信息系统、嵌入式系统及应用. 2,…,M)。Matrix Pencil 算法首先选择一个参数 L,即窗口长 度。由式(1)定义矩阵如下:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{L+1} & y_L & \cdots & y_2 & y_1 \\ y_{L+2} & y_{L+1} & \cdots & y_3 & y_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ y_N & y_{N-1} & \cdots & y_{N-L+1} & y_{N-L} \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)}$$
(2)

用 MATLAB 语言定义两个矩阵 Y_1 和 Y_2 如下: $Y_1 = Y(:,$ 1:*L*)和 $Y_2 = Y(:,2;L+1)$,使用一个标量 λ 定义两个矩阵的 矩阵束 $Y_1 - \lambda Y_2$ 。这两个矩阵在没有噪声的情况下可以写成: (3)

$$Y_1 = Z_1 A Z_2 \tag{3}$$
$$Y_2 = Z_1 A Z_0 Z_2 \tag{4}$$

$$| \underline{x} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{z}_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_{1} & z_{2} & \cdots & z_{M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{1}^{(N-L-1)} & z_{2}^{(N-L-1)} & \cdots & z_{2}^{(N-L-1)} \end{bmatrix}_{(N-L) \times M} \\
 | \underline{z}_{2} = \begin{bmatrix} 1 & z_{1} & \cdots & z_{1}^{L-1} \\ 1 & z_{2} & \cdots & z_{2}^{L-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & z_{M} & \cdots & z_{M}^{L-1} \end{bmatrix}_{M \times L} \\
 | \underline{z}_{0} = \operatorname{diag} \{z_{1}, z_{2}, \cdots, z_{M}\}, \mathbf{A} = \operatorname{diag} \{a_{1}, a_{2}, \cdots, a_{M}\}$$

在实际的有噪声的环境下,使用下面的计算方法:通常使 用总体最小方差矩阵束(total least squares matrix pencil, TLSMP)的方法。该方法首先进行矩阵奇异分解^[8,9]。

$$Y = U \Sigma V^{\rm H}$$
(5)

$$U' = U(:, 1: M_s) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{V}' = \boldsymbol{V}(:,1:M_s) \tag{7}$$

其中:M. 是信号源的个数。

$$U'\Sigma'V'^{\mathrm{T}}$$
(8)

$$Y'_1 = Y'(:, 2:L+1)$$
 (9)

$$Y'_2 = Y'(:,1:L)$$
 (10)

1.2 OFDM 信号

OFDM 发射信号为

$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi kn/N}$$
(11)

其中: d_k 为用户数据。考虑 OFDM 的训练符号的长度为 P,数 据符号周期为T,用于信道估计。若 OFDM 信号循环前缀的长 度大于信道脉冲响应,信道在一个符号周期内保持不变,即信 道是慢衰落的。那么,信道的脉冲响应为

$$h(\tau) = \sum_{m=1}^{M} a_m \delta(\tau - \tau_m)$$

考虑均匀线性天线阵(uniform linear array, ULA)包含 M个 独立的全向天线,天线间距 d,信道的多径数 L,,如图 1 所示。





图1表示每个天线单元接收 OFDM 信号包含四条路径。 天线阵列接收信号的矩阵形式为[10,11]

L.

$$\mathbf{y}[n] = \sum_{l=1}^{p} \alpha_{l} \cdot \mathbf{a}(\theta_{l}) s[n - \tau_{l}] + \mathbf{w}[n]$$
(12)

其中: α_l 为路径的复增益; L_a 为信道路径个数; τ_l 为路径时延;

 $a(\theta_1)$ 为天线阵列的导向向量(steering vector)或空间响应 (spatial response); θ_i 为平面波第 l 个路径的到达角度(AOA); W[n]为高斯白噪声向量。

2 TOA/AOA 联合估计

2.1 到达时间 TOA 估计

对式(10)作 DFT 变换并离散化,信道频率响应 CFR 表示为

$$H(j2\pi k\Delta f) = \sum_{m=1}^{M} a_m z_m^k$$
(13)

考虑 OFDM 的训练符号的长度为 P,数据符号周期为 T, 用于信道估计。假设循环前缀的长度大于信道脉冲响应时,信 道在一个 OFDM 周期内保持不变,即认为信道是慢衰落的。 离散化的信道频率响应 CFR 可以表示为 $H(j2\pi k\Delta f)$ = $\sum_{m=1}^{M} a_m Z_m^k \circ \ddagger p : z_m = e^{-j2\pi\Delta f r_m}, \Delta f = \frac{1}{PT} \circ \dot{z} \wedge f = \dot{f}$ 含 M 个频率成分的和。因此可以使用超分辨率 Matrix Pencil 估计 z_m ,一旦 z_m 估计出来后,各路径时延TOA的值为

$$\tau_m = \Im \left\{ \ln \left(z_m \right) \right\} / (2\pi/P) \tag{14}$$

其中: \Im 是取虛部,那么就是信号的 TOA 估计 TOA = τ_0 。

2.2 DOA/AOA 估计

考虑均匀线性天线阵(uniform linear array, ULA), 包含 N 个独立的全向天线,天线间距d,信道的多径数M,如图1所 示。图1表示每个天线单元接收 OFDM 信号包含四条路径。 每个天线单元的导向向量(steering vector)为

$$a_{n}(\varphi_{m}) = \exp(j\theta_{m}(n-1))$$

$$n = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M$$
(15)

其中:
$$\theta_m = 2\pi \frac{\Delta f}{c} d \cos \varphi_m, \varphi_m$$
是第 *M* 个人射信号的角度。采

样时刻,第N个天线的接收信号为

$$y_n = \sum_{m=1}^{M} a_m z_m^{(n-1)}$$
(16)

其中: $z_m = e^{j\theta_m}$ 。估计各径的入射角度为

$$\varphi_m = \cos^{-1} \left\{ \frac{\Im(\ln(z_m))}{2\pi\Delta f d/c} \right\}$$
(17)

其中:各径到达角度 DOA 与 OFDM 各载波频率和波长有关,需 要在 OFDM 所有载波上进行聚焦或只取部分载波估计角度, 然后再平均。

2.3 改进 DOA/AOA 估计

对于定位来说,直达路径的 DOA/AOA 才是至关重要的。 但是,多径的影响以及 OFDM 载波间的相关性使得 DOA/AOA 估计产生很大的偏差。利用 TOA 估计获得的各路径幅值和时 延信息在 DOA 估计之前对数据预处理,以便增强直达路径的 信噪比,抑制其他路径。设权值为处理后的第 m 个天线接收 信号为

$$x_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} w_l^*(n) y_m(n)$$
(18)

式中省略了载波编号,是信道频率响应长度,它与 OFDM 的 FFT 长度相同。将式(16)带入式(18),得到

$$x_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{L_p} \sum_{n=1}^{N} w_l^*(n) \mathbf{A}_n(n) w_n(n) \mathbf{a}_n(\theta_l)$$
(19)

从式(19)中抽取第 l 个路径元素,有

$$\begin{aligned} x_{lm} &= \pmb{a}_n(\theta_l) \times \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} |w_l(n)|^2 \times \pmb{A}_n(n)\right] + \pmb{I} + \pmb{W} \end{aligned} \tag{20} \end{aligned}$$
OFDM 的信道估计可以减少式(20)中的多径间干扰。设

第 *l* 路径 TOA 时延为:若只保留直达路径的幅值,设置权值为 式(21)。实际应用时,在一个区间内,可以使用中心在均值位 置的窗函数代替式(21)中的简单设置。

$$w_m(l) = H_m(j2\pi l\Delta f) = \begin{cases} 1 & l = \frac{\tau_l}{2\pi l\Delta f} & l = 1, 2, 3, \dots, N \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$
(21)

2.4 联合 TOA/AOA

联合 TOA/AOA 定位只需一个基站就可以对移动台定位。 首先从移动台发出 OFDM 的训练序列(符号)到基站用于信道 估计;然后对估计的信道频率响应 CFR 应用 Matrix Pencil 算法 估计各径的时延。同时,基站采用天线阵列信道估计使用系统 的本地序列,最终的时延估计对各个天线单元取平均。首径时 延认为是 DLOS 的 TOA。注意,首径不一定是最强路径,需要 采用阈值的方法确定。然后使用 2.2 节估计首径的 DOA/ AOA。设基站和移动台的位置分别为(*x_{BS}*,*y_{BS}*)、(*x*,*y*),它们 满足

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{BS} \\ y_{BS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \times \cos (\text{DOA}) \\ R \times \sin (\text{DOA}) \end{bmatrix}$$
(22)

其中:R=TOA×c。联合TOA/AOA方法的最大好处是只需一个基站就可以对移动台定位,适合室内定位,因为室内往往只有一个接入点。

3 仿真结果分析

天线间隔取 2.4 GHz 载波的半波长。矩阵束常数在 TOA 估计时取 $L = \lceil N/2 \rceil$, AOA 估计时取 $L = \lceil M/2 \rceil$,这样可以最大 限度减少噪声的影响。仿真设定各路径的行程为 200、215 和 245 m, 对应到达时间和系统仿真参数、信道状况如表 1 所示。 表1 位真参数设置

	NY9 MAL	
符号	-	昜

参数		符号	参数值
天线单元数		М	8~10
OFDM 载	波数	N	256
采样周	期	Ts	50 ns
OFDM 추	带宽	В	20 MHz
调制方	式	-	QAM
天线间隔		d∕lambda	0.5
矩阵束常	常数	L	[N/2][M/2]
路径	时延/ns	入射角度/°	归一化幅值
1	666.67	16.0	1
2	716.67	25.0	0.33
3	816.67	34.0	0.167

在各种信噪比下运行1000次后,表2是本文基于 Matrix Pencil 的联合 TOA 和 DOA 的均方根误差。DOA 测距的 RMSE(root mean square error)误差值是首径 DOA 角度 RMSE 误差和首径路 经长度结合计算出来的。TOA 过程使用的信道响应是由 LS 信 道估计方法获得的。

表 2 TOA_DOA 估计均方误差

SNR/dB -	TOA 测距 RMSE/m			DOA WE DASE /
	第1径	第2径	第3经	DOA 测距 KMSE/ m
0	0.12063	0.42532	0.68869	4.869793
5	0.067637	0.21819	0.31398	3.602597
10	0.038742	0.10736	0.17121	5.435724
15	0.020335	0.060752	0.091928	2.185996
20	0.011539	0.033417	0.047701	1.571988
25	0.0068557	0.019079	0.0291	1.125434
30	0.0036885	0.01058	0.016313	1.087775

注:天线为10;快拍为6;仿真次数为1000。

表 2 中显示,随着信噪比的增加,各路径的 TOA 测距

RMSE 误差显著下降,首径 DOA 测距的 RMSE 误差也有所下降,但相对于 TOA 测距要缓慢得多。由于天线数量受限的原因 角度估计的精度不如时间估计的精度高。另外,多径信号的相 关性也会降低 AOA 估计的精度。对于 TOA 测距,200 m 的距离 只有 0.120 63 m 的误差,满足大多数室内环境下的定位要求。

图 2 显示了三条路经在 10 条天线和 SNR = 10 dB 情况下 的 TOA 测距估计 HIST 分布。估计的均值和待测距离参数一 致,是无偏估计。由于各径的幅值不同,TOA 估计的 RMSE 也 不同。路经1 由于是直达路经,幅值最大,因此 *E* 误差最小,在 ±0.1 m 范围内,是可以接受的。幅值最小的路经3,误差也在 ±0.5 m 以内。

当首径的幅值为 0.333, 角度为 25°时, 由 TOA 估计到首 径后,采用波束成形(beamforming)修正首径的信噪比, 抑制其 他两径,结果如图 3 所示。从图中可以看出, 首径的 25°的入 射角的估计已经相当精确, 其他两径信噪比因为被抑制, 所以 DOA 估计值弥散, 无法分辨。

图 4 显示了 10 条天线在 SNR = 30 dB 情况下三条路径 DOA 估计的 HIST 图。虽然信噪比很高,直达路经的 DOA 估 计勉强接受,但其均值出现估计偏移,其他路经则出现偏差和 弥散。因此需要采取措施加以抑制和修正。从表 2 中也可以 看出,联合 TOA/DOA 定位的误差来源主要是 DOA 估计误差 造成的。虽然增加天线数量可以大幅提高 DOA 估计的无偏性 和精度,但增加天线数量受限于设备的成本和体积。



均方误差(RMSE)进行评估。每次运行设置不同的噪声和 信道多径。设置 LOS 时,将路径 1 和 2 的归一化幅值对调。图 3 和 5 中,对 DOA 估计的均方误差进行评估,运行 100 次得到误 差曲线。测试距离为 60 m, SNR = 10 dB,8 天线的 DOA 误差为 0.25°,对应的误差距离为 0.26 m,结合 TOA 的 0.5 ns、0.15 m 误差,两者结合的二维误差为 0.30 m。



4 结束语

在单基站或单接入点系统中,可以利用 TOA/AOA 联合定位的方法获取移动台相对于基站的位置。由于(下转第540页)

MUSIC 算法的计算效率最高,但同时应当注意到,MUSIC 算法 的 DOA 估计性能远远低于基于稀疏表示的方法。l₁-SVD 和 Mixed l_{2.0}计算效率低于 JSL₀-SVD,这是因为求解 l₁ 约束的稀 疏表示问题的二阶 cone 规划算法的效率较低;同时 Mixed l_{2.0} 在整个空间内寻找稀疏解,当信号维数较高时,计算效率较低。 表1 计算效率的比较

Number of Succession		time	e/s	
Number of Snapshots	JSL0-SVD	Mixed $l_{2,0}$	l_1 -SVD	MUSIC
75	0.047	0.172	3.484	~
100	0.062	0.218	4.058	~
150	0.078	0.406	4.453	0.028
200	0.094	0.703	6.086	0.028

4 结束语

本文从稀疏分解的角度提出了一种信号 DOA 估计的方法。通过将整个感兴趣的空间分为若干个潜在的到达角,建立 一个过完备字典,从而将信号 DOA 的估计问题转换为稀疏表 示问题。通过将多个快拍的接收数据组成一个 MMV 矩阵,然 后采用联合稀疏约束的优化方法求解。

参考文献:

- CAPON J. High-resolution frequency wave-number spectrum analysis
 [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8):1408-1418.
- [2] GLENTIS G O. A fast algorithm for Apes and Capon spectrum estimation[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56 (9):4207-4220.
- [3] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 1986, 34(3):276-280.
- [4] KRIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research; the parametric approach [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4):67-94.
- [5] CHEN J, HUO X. Theoretical results on sparse representations of multiple-measurement vectors[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006,54(12):4634-4643.

(上接第536页)载波间的相关性和相干多径的影响,非首径对 首径 AOA 的估计有很大的负面影响,因此利用 TOA 估计阶段 获得的首径和其他路径的幅值,采用阈值抑制的方法降低非首 径幅值。矩阵束方法相对于其他超分辨率方法,无须相关处理 简单、高效。利用这一优点对 OFDM 信号顺序地进行 TOA 和 AOA 估计,完成只有一个基站情况下的定位。

参考文献:

- [1] http://www.wimaxforum.org[EB/OL].
- [2] MINN H, MUNOZ D. Pilot designs for channel estimation of MIMO OFDM systems with frequency-dependent IQ imbalances. [J]. IEEE Trans on Communications, 2010,58(8):2252-2264.
- [3] NARASIMHAN B, NARAYANAN S, MINN H, et al. Reduced complexity baseband compensation of joint Tx/Rx IQ imbalance in mobile MIMO-OFDM [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010,9(5):1720-1728.
- [4] HUMPHREY D, HEDLEY M. Super-resolution time of arrival for indoor localization [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2008:3286-3290.
- [5] DAI L, WANG Z, WANG J, et al. Positioning with OFDM signals for the next-generation GNSS[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2010, 56(2):374-379.
- [6] OLSSON M. Contributions to delay gain and offset estimation [D]. Linkoping:Linkoping University,2008.

- [6] GORODNITSKY I F, RAO B D. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: a re-weighted minimum norm algorithm
 [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(3):600-616.
- [7] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 5 (2): 489-509.
- [8] DONOHO D L. Compressive sensing [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [9] FUCHS J J. On the application of the global matched filter to DOA estimation with uniform circular arrays [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(4):702-709.
- [10] COTTER S F, RAO B D, ENGAN K. Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(7):2477-2488.
- [11] MALIOUTOV D, CETIN M, WILLSKY A. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(8):3010-3022.
- [12] HYDER M M, MAHATA K. Direction of arrival estimation using a mixed l_{2,0} norm approximation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2010, 58(9):4646-4655.
- [13] MOHIMANI H, BABAIE-ZADEH M, JUTTEN C. A fast approach for over-complete sparse decomposition based on smoothed norm [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 57(1):289-301.
- [14] HYDER M M, MAHATA K. An improved smoothed approximation algorithm for sparse representation [J]. IEEE Trans on Signal Processing,2010,58(4):2194-2205.
- [15] Di CLAUDIO E, PARISI R. WAVES: weighted average of signal subspaces for robust wideband direction finding[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(10):2179-2190.
- [16] TOMASI C. Estimating Gaussian mixture density with EM-a tutorial [EB/OL]. (2011). http://www.cs.duke.edu/~tomasi/.
- [17] ZAYYANI H, BABAIE-ZADEH M, JUTTEN C. Source estimation in noisy sparse component analysis [C]//Proc of the 15th International Conference on Digital Signal Processing. 2007:219-222.
- [7] D'AMICO A A, MORELLI M, SANGUINETTI L. DOA estimation in the uplink of multicarrier CDMA systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008; Article No. 36.
- [8] ZHANG Xiao-fei, FENG B, XU D. Blind joint symbol detection and DOA estimation for OFDM system with antenna array [J]. Wireless Personal Communications, 2008, 46(3):371-383.
- [9] LABIB M A, ELKAMCHOUCHI H M. Location determination for 2G/ 3G/4G using time delay matrix pencil (TDMP) method [C]//Proc of PIERS Proceedings. 2008;246-253.
- [10] FARROKHI H. Performance of root-MUSIC on TOA estimation for an indoor spread spectrum ranging system [C]//Proc of the 12th WSEAS International Conference on COMM. 2008.
- [11] KANG Chun-yu, ZHANG Xin-hua, HAN Dong. A kind of method for direction of arrival estimation based on blind source separation [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10):1324-1326.
- [12] ZHAO G, WANG D, FATTOUCHE M. Time sum of arrival based BLUE for mobile target positioning[J]. Advanced Science Letters, 2011,4(1):165-167.
- [13] WANG D, FATTOUCHE M. OFDM transmission for time based range estimation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(6):571-574.
- [14] GUVENC I, CHONG C C, WATANABE F, et al. NLOS identification and weighted least-squares localization for UWB systems using multipath channel statistics [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal, 2008; Article No. 36.