

文章编号:1004-9037(2014)06-1036-05

基于 TOA-DOA 联合估计的无线定位新方法

杨小凤 陈铁军 刘 峰

(玉林师范学院电子与通信工程学院,玉林,537000)

摘要:针对典型高精度的波达时间-波达方向(Time of arrival-direction of arrival, TOA-DOA)联合估计算法-多重信号分类算法运算量巨大的问题,提出了有效降低其复杂度的新方法并将其应用于无线定位。该方法首先通过分离接收信号矢量来分别估计 TOA 和 DOA,以降低信号自相关矩阵的维数,从而降低对其进行特征值分解运算的复杂度,再利用离散傅立叶变换简化空间谱运算,同时采用多个空间谱相加的方法提高估计精度,从而利用一个基站就可以准确快速定位目标。运算量分析证明了新方法的复杂度较低,更易于在实时硬件系统上实现;Matlab 仿真实验证明,新方法的估计精度与 JADE-MUSIC 相当,具有良好的定位性能。

关键词:无线定位;波达时间;波达方向

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

Novel Wireless Positioning Method Based on Joint TOA-DOA Estimation

Yang Xiaofeng, Chen Tiejun, Liu Feng

(School of Electronics and Communications Engineering, Yulin Normal University, Yulin, 537000, China)

Abstract: A novel wireless positioning method is proposed based on joint Time of arrival-direction of arrival (TOA-DOA) estimation to substantially reduce the computational burden of typical high accuracy algorithm—Joint angle and delay estimation multiple signal classification (JADE-MUSIC). This method first separates the processed signal vector to estimate TOA and DOA to reduce the size of the signal covariance matrix. Thus the eigenvalue decomposition complexity is reduced. It applies DFT to simplify the pseudo-spectrum computation and utilizes pseudo-spectrum summation to enhance estimation accuracy. Target positioning can be realized fast and accurately via only one base station. Theoretical analysis shows that this method is of much lower complexity, Matlab simulation results prove that this method achieves high estimation accuracy and good positioning capability.

Key words: wireless positioning; time of arrival; direction of arrival

引 言

无线通信网络提供的定位业务广泛应用于物流监控、交通导航、车队跟踪调度、资源管理、网络规划、公安侦查等领域^[1-2]。近年来,基于波达时间-波达方向(Time of arrival-direction of arrival, TOA-DOA)联合估计的无线定位算法受到了国内外研究学者的广泛关注^[3-4]。这类算法具有如下优点^[5]:比 TOA 估计或 DOA 估计算法具有更高的精度;实现定位仅需一个基站,比 TOA 估计(至少

需要 3 个基站)和 DOA 估计(至少需要 2 个基站)要少,因此大大降低了系统复杂度。其中最著名的高精度算法有:信号到达角度和时间联合估计-多重信号分类算法(Joint angle and delay estimation-multiple signal classification, JADE-MUSIC)^[6],信号到达角度和时间联合估计-旋转不变子空间算法(Joint angle and delay estimation-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, JADE-ESPRIT)^[7]等。虽然 MUSIC 类算法比 ESPRIT 类算法的复杂度低^[8],但是由于 MUSIC 类算法要进行数据自相关矩阵的特征值

分解和空间谱谱峰搜索,运算量仍然十分巨大^[9]。

本文提出了一种高精度低复杂度的基于 TOA-DOA 联合估计的定位算法,采用两种方法降低复杂度:首先,分离接收信号矢量来分别提取 TOA/DOA 估计值,以降低信号自相关矩阵的维数,从而降低对其进行特征值分解运算的复杂度;然后,用离散傅里叶变换(Discrete fourier transform, DFT)算法进行空间谱运算,使得空间谱运算更易于在实时硬件系统上实现;同时采用多个空间谱相加的方法提高估计精度。Matlab 仿真实验证明,本文提出的新算法在保持高精度的同时大大降低了复杂度,具有良好的定位性能。

1 数据模型

本文中的定位系统由一个待定位目标和一个带有阵元数为 M 的均匀线阵的基站组成,阵元间距 $d = \frac{\lambda}{2}$, λ 为波长。由待定位目标发出的窄带远场信号经 L 条多径传播后被均匀线阵接收。

设信道冲激响应^[7]为

$$\mathbf{h}(t) = \sum_{l=1}^L a_l \boldsymbol{\beta}(\theta_l) \delta(t - \tau_l) \quad (1)$$

式中: a_l, θ_l, τ_l 分别为各路径的衰减幅度,信号到达方向和时延。

$$\boldsymbol{\beta}(\theta_l) = [1, e^{-j\frac{2\pi d \sin\theta_l}{\lambda}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d \sin\theta_l}{\lambda}}]^T \quad (2)$$

设待定位目标处于静止或慢移动状态,且观测时间小于信道相干时间,则信道可视作静态信道,即 a_l, θ_l, τ_l 在观测时间内认为是不变的。

将 $\mathbf{h}(t)$ 在频域上以 $\Delta f = \frac{B}{N}$ (B 为信号带宽) 的采样速率进行采样得到

$$\mathbf{H} = [\boldsymbol{\beta}(\theta_1), \dots, \boldsymbol{\beta}(\theta_L)] \begin{bmatrix} a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & a_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g(\tau_1) \\ \dots \\ g(\tau_L) \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{A} \mathbf{G}^T(\boldsymbol{\tau}) \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{g}(\tau_l) = [1, e^{-j2\pi\Delta f \tau_l}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\Delta f \tau_l}] \quad (4)$$

令 $\text{vec}(\cdot)$ 运算将矩阵的每一行转置并叠放在上一行的转置之下,则

$$\text{vec}(\mathbf{H}) = (\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\theta}) \diamond \mathbf{G}(\boldsymbol{\tau})) \text{diag}(\mathbf{A}) = \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\tau}) \boldsymbol{\alpha} \quad (5)$$

式中: \diamond 为 Khatri-Rao 乘积运算, $\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\tau})$ 的每一列 $\boldsymbol{\varphi}(\theta_l, \tau_l)$ 称为空-时矢量,包含了各路径的到达方向和时延信息。

首先利用训练序列 \mathbf{S} 估计信道冲激响应^[7]

$$(6)$$

$$\mathbf{H}_{\text{est}} = \mathbf{R}\mathbf{S}^+ = \mathbf{H} + \mathbf{W}\mathbf{S}^+ \quad (7)$$

式中: \mathbf{R} 为接收信号, \mathbf{W} 为均值零方差 σ^2 的加性高斯白噪声, \mathbf{H}_{est} 为信道冲激响应估计值, $(\cdot)^+$ 为求伪逆矩阵运算。

对式(7)两边进行 $\text{vec}(\cdot)$ 运算得到

$$\mathbf{X}_{MN \times 1} = \boldsymbol{\varphi}_{MN \times L} \boldsymbol{\alpha}_{L \times 1} + \mathbf{V}_{MN \times 1} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{X}_{MN \times 1} = \text{vec}(\mathbf{H}_{\text{est}}) = [x_1(1), \dots, x_1(N), x_2(1), \dots, x_M(N)]^T$$

$\mathbf{V}_{MN \times 1} = \text{vec}(\mathbf{W}\mathbf{S}^+)$, 其形式与 $\mathbf{X}_{MN \times 1}$ 类似。然后利用下文算法对 \mathbf{X} 和 $\boldsymbol{\varphi}$ 进行处理,估计 TOA 和 DOA。

2 JADE-MUSIC 算法

\mathbf{X} 的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] \quad (9)$$

对 \mathbf{R}_X 进行特征值分解,由 $MN-L$ 个最小特征值对应的噪声特征矢量 \mathbf{E}_i 和空-时矢量 $\boldsymbol{\varphi}(\theta, \tau)$ 正交,该特性使得如下定义的空间谱产生峰值

$$\mathbf{P}(\theta, \tau) = \frac{1}{\sum_{MN-L+1}^{MN} |\boldsymbol{\varphi}^H(\theta, \tau) \mathbf{E}_i|^2} \quad (10)$$

对上述空间谱进行二维谱峰搜索,与 L 个峰值对应的 (θ_l, τ_l) 即为 L 条路径的到达方向与时延;与 $\tau_1 = \min \tau_l$ 对应的 (θ_1, τ_1) 即为视距信号的 DOA 和 TOA,从而可计算出待定位目标的位置

$$(\hat{x}, \hat{y}) = (c\tau_1 \sin\theta_1, c\tau_1 \cos\theta_1) \quad (11)$$

式中: c 为光速。

JADE-MUSIC 算法是典型的高精度 TOA-DOA 联合估计算法,但是由于要进行信号自相关矩阵的特征值分解和二维谱峰搜索,使得运算量十分巨大。

3 新算法

3.1 算法复杂度降低的方法 1

由于 JADE-MUSIC 算法的复杂度主要来源于对 \mathbf{X} 求自相关矩阵 \mathbf{R}_X 并对 \mathbf{R}_X 进行特征值分解,这种算法的复杂度依赖于 \mathbf{R}_X 的维数,如果 \mathbf{R}_X 的维数为 s ,那么算法的复杂度为 $O(s^3)$ ^[10]。如果能减小 \mathbf{X} 也即 \mathbf{R}_X 的维数,必然能大大降低复杂度。本文设计将 \mathbf{X} 分解成 N 个 $M \times 1$ 的矢量 $\mathbf{X}_{\text{DOA}(n)}$ 来估计 DOA 和 M 个 $N \times 1$ 的矢量 $\mathbf{X}_{\text{TOA}(m)}$ 来估计 TOA

$$\mathbf{X}_{\text{DOA}(n)} = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_{\text{TOA}(m)} = [x_1(m), x_2(m), \dots, x_N(m)]^T \quad (13)$$

式中: $1 \leq n \leq N, 1 \leq m \leq M$ 。通过将 \mathbf{X} 分解成 $\mathbf{X}_{\text{DOA}(n)}$ 和 $\mathbf{X}_{\text{TOA}(m)}$, 从而将维数为 MN 的 \mathbf{R}_X 分解成维数为 M 的 $\mathbf{R}_{X,\text{DOA}}$ 和维数为 N 的 $\mathbf{R}_{X,\text{TOA}}$, 将噪声特征矢量 \mathbf{E}_i 对应分解为 $\mathbf{E}_{i,\text{DOA}}$ 和 $\mathbf{E}_{i,\text{TOA}}$ 来分别构造 DOA 谱(式(14))和 TOA 谱(式(16)), 也就使得算法复杂度由 $O(M^3 N^3)$ 大大降低为 $O(NM^3 + MN^3)$ 。

$$P_{\text{DOA}(n)}(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{M-L} |\boldsymbol{\varphi}^H(\theta) \mathbf{E}_{i,\text{DOA}(n)}|^2} \quad (14)$$

其中

$$\boldsymbol{\varphi}(\theta) = [1, e^{-j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}}, \dots, e^{-j2\pi \frac{(M-1)d \sin \theta}{\lambda}}]^T \quad (15)$$

$$P_{\text{TOA}(m)}(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N-L} |\boldsymbol{\varphi}^H(\tau) \mathbf{E}_{i,\text{TOA}(m)}|^2} \quad (16)$$

其中

$$\boldsymbol{\varphi}(\tau) = [1, e^{-j2\pi \Delta f \tau}, \dots, e^{-j2\pi (N-1) \Delta f \tau}]^T \quad (17)$$

3.2 算法复杂度降低的方法 2

JADE-MUSIC 算法的复杂度的另一个主要来源是二维空间谱谱峰搜索。本文方法 1 提出将接收信号矢量分离分别构造 DOA 谱和 TOA 谱。为了进一步降低谱峰搜索运算的复杂度, 本文提出利用 DFT 运算和 DOA 谱及 TOA 谱在结构上的相似性, 将 DOA 谱运算和 TOA 谱运算转化为易于实现的 DFT 运算。

已知对序列 $y(u)$ 进行 Q 点 DFT 运算结果为

$$Y(v) = \sum_{u=0}^{Q-1} y(u) e^{-j2\pi \frac{uv}{Q}} \quad (18)$$

对照式(14,16,18)可以发现, 三者均为指数项乘法的求和形式, 所以只需令式(14,18), 式(16,18)的指数项分别相等, 就可以将式(14,16)分别改写成 DFT 运算的形式

$$P'_{\text{DOA}(n)}(v) = \sum_{i=1}^{M-L} |\text{DFT}(\mathbf{E}_{i,\text{DOA}(n)})|^2 \quad (19)$$

$$P'_{\text{TOA}(m)}(v') = \sum_{i=1}^{N-L} |\text{DFT}(\mathbf{E}_{i,\text{TOA}(m)})|^2 \quad (20)$$

其中

$$e^{-j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}} = e^{-j2\pi \frac{v}{Q}} \quad (21)$$

$$e^{-j2\pi \Delta f \tau} = e^{-j2\pi \frac{v'}{Q}} \quad (22)$$

由此可得

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{2v}{Q} \right) \quad (23)$$

$$\tau = \frac{v'}{Q \cdot \Delta f} \quad (24)$$

从式(19,20)分别求出式子最小值对应的 v 和 v' 代入式(23,24), 即可求出视距信号的 DOA 和 TOA。式(19,20)中的 DFT 运算可采用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)算法如时间抽选(Decimation in time, DIT)基 2FFT 算法来进一步减少运算量。

下面比较 JADE-MUSIC 算法和用本文方法 2 进行谱运算的复杂度。以算法中使用的实数乘法运算的个数(Number of multiplications, NOM)作为谱运算复杂度的度量, 每次复数乘法运算相当于 4 次实数乘法运算。JADE-MUSIC 算法在 $\theta \in [-90^\circ : 1 : 90^\circ], \tau \in [0 : 1 : \tau_{\max}]$ 区间进行二维空间谱(式(10))运算产生的 NOM 为

$$\text{NOM}_{\text{JADE}} = 4(MN + 1)(MN - L) \times 180\tau_{\max} \quad (25)$$

设路径数 $L=4$, 当 $\tau_{\max}=1\ 200\ \text{ns}, M=6, N=50$, 则 $\text{NOM}_{\text{JADE}}=7.697\ 9 \times 10^{10}$ 。

Q 点 DFT (DIT) 算法产生的 NOM 为 $\frac{Q}{2} \log_2 Q^{[11]}$, 所以采用 Q 点 DFT (DIT) 算法进行 DOA 谱(式(19))和 TOA 谱(式(20))运算产生的 NOM 分别为

$$\text{NOM}_{\text{DOA}} = 4 \left(\frac{Q}{2} \log_2 Q + 1 \right) (M - L) \quad (26)$$

$$\text{NOM}_{\text{TOA}} = 4 \left(\frac{Q}{2} \log_2 Q + 1 \right) (N - L) \quad (27)$$

当 $Q=1\ 024$, 其他条件相同的情况下 $\text{NOM}_{\text{DOA}} + \text{NOM}_{\text{TOA}} = 7.702\ 0 \times 10^6$, 仅为 JADE-MUSIC 二维空间谱运算的 0.01%。

3.3 精度提高的方法

本文降低算法复杂度的方法 1 提出将 \mathbf{X} 分解成 N 个 $M \times 1$ 的矢量 $\mathbf{X}_{\text{DOA}(n)}$ 来估计 DOA 和 M 个 $N \times 1$ 的矢量 $\mathbf{X}_{\text{TOA}(m)}$ 来估计 TOA, 造成数据样本数目减少, 从而对估计精度产生一定影响。本文提出分别将 N 个 DOA 谱相加, 将 M 个 TOA 谱相加, 如式(28,29)所示, 可以使得谱峰更为尖锐, 从而提高估计精度。

$$\text{PDOA}(v) = \sum_{n=1}^N P'_{\text{DOA}(n)}(v) \quad (28)$$

$$\text{PTOA}(v') = \sum_{m=1}^M P'_{\text{TOA}(m)}(v') \quad (29)$$

3.1 节和 3.2 节中的复杂度分析已考虑使用谱相加提高精度的方法产生的运算量。

4 仿真实验

为了验证本文提出的基于 TOA-DOA 联合估计的无线定位算法的估计性能,本文给出 Matlab 仿真实验结果及分析。仿真实验采用第 1 节所述数据模型,设信道为 ITU pedestrian-A 模型^[12](行人慢移动静态信道模型),则路径数 $L=4$,设各路径的时延 $\tau_l=[333,443,633,1\ 043]$,各路径的到达方向 $\theta_l=[-70^\circ,-20^\circ,30^\circ,80^\circ]$,阵元数 $M=6$,在不同的信噪比下分别进行 100 次独立实验,得到 TOA 估计和 DOA 估计的均方根误差曲线如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出,本文算法在大大降低复杂度的情况下得到的 TOA 和 DOA 估计精度均比相同信噪比条件下 JADE-MUSIC 的估计精度略低,但相差不大。两种算法的 TOA 估计的均方根误差均为 10^{-1} ns 级别;信噪比 5 dB 以上时,两种算法的 DOA 估计的均方根误差的差别不超过 0.5° 。以微量的估计精度为代价换取复杂度的大大降低使得算法更易于实现,也提高了算法的实时性。

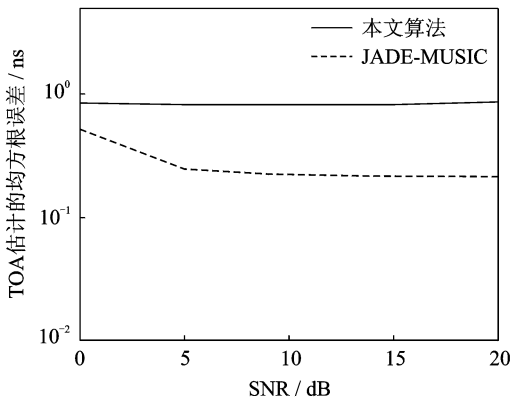


图 1 TOA 估计精度比较

Fig. 1 Comparison of TOA estimation accuracy

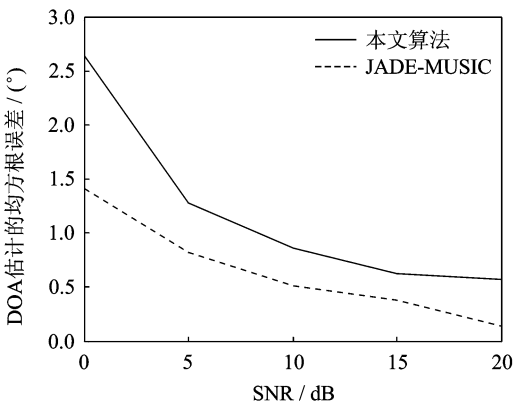


图 2 DOA 估计精度比较

Fig. 2 Comparison of DOA estimation accuracy

利用视距信号的 TOA 和 DOA 估计值代入式 (11) 可计算出待定位目标的位置。设基站和待定位目标分别位于坐标平面 $(0\text{ m}, 0\text{ m})$ 和 $(-94\text{ m}, 34\text{ m})$ 处(根据视距信号的 TOA 和 DOA 选定), 利用 JADE-MUSIC 和本文算法分别在不同的信噪比下进行定位实验, 得到两种算法的定位误差曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 定位误差曲线和 DOA 估计的均方根误差曲线类似, 验证了基于 TOA-DOA 联合估计的无线定位性能主要取决于 DOA 估计精度^[13]。相同 SNR 下本文算法的定位误差比 JADE-MUSIC 略大, 但相差不大; 信噪比 10 dB 以上时, 本文算法的定位误差达到 1.5 m 以下, 定位效果良好。以微量的定位精度为代价换取复杂度的大大降低是有价值的, 它使得算法更易于在实时硬件系统上实现。

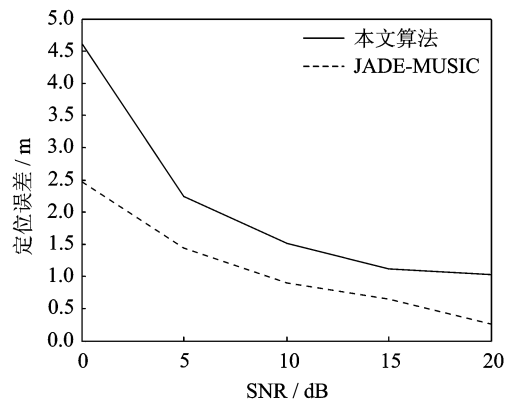


图 3 定位精度比较

Fig. 3 Comparison of positioning accuracy

5 结束语

本文在分析了 JADE-MUSIC 算法的复杂度的基础上提出了一种高精度低复杂度的基于 TOA-DOA 联合估计的定位算法, 采用两种方法降低复杂度: 首先, 分离接收信号矢量来分别提取 TOA/DOA 估计值, 以降低信号自相关矩阵的维数, 从而降低对其进行特征值分解运算的复杂度; 然后, 用离散傅里叶变换算法进行空间谱运算, 使得空间谱运算更易于实现; 同时采用多个空间谱相加的方法提高估计精度。Matlab 仿真实验证明, 本文提出的新算法在保持高精度的同时大大降低了复杂度, 具有良好的定位性能。

参考文献:

[1] 姚素芬, 朱诚, 张鹏. 物流监控中的蜂窝无线定位[J].

- 数据采集与处理,2009,24(S1):269-271.
- Yao Sufen, Zhu Cheng, Zhang Peng. Cellular wireless location method in logistics transport[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(S1):269-271.
- [2] Mayorga C, Della Rose F. Cooperative positioning techniques for mobile localization in 4G cellular networks[C]//IEEE International Conference on Pervasive Services. Istanbul, Turkey: IEEE Press, 2007: 39-44.
- [3] Lagunas E, Najar M, Navarro M. UWB joint TOA and DOA estimation[C]//IEEE International Conference on UWB. Vancouver, Canada: IEEE Press, 2009:839-843.
- [4] Irahauten Z, Nikookar H, Klepper M. A joint TOA/DOA technique for 2D/3D UWB localization in indoor multipath environment [C]//IEEE International Conference on Communications. Ottawa, Canada: IEEE Press, 2012:4499-4503.
- [5] Li W, Yao W, Duffett-Smith P. Comparative study of joint TOA/DOA estimation techniques for mobile positioning applications[C]//IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2009:1-5.
- [6] Vanderveen M, Papadias C, Paulraj A. Joint angle and delay estimation (JADE) for multipath signals arriving at an antenna array[J]. IEEE Communications Letters, 1997,1(1):12-14.
- [7] Vanderveen M, Veen A, Paulraj A. Estimation of multipath parameters in wireless communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(3):682-690.
- [8] Kim M, Ichige K, Arai H. Implementation of FPGA based fast DOA estimator using unitary MUSIC algorithm[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, Orlando, FL, USA: IEEE, 2003:213-217.
- [9] 李涛,李国林,廖辉荣.多重信号分类的快速自适应算法[J].数据采集与处理,2010,25(S1):6-9.
- Li Tao, Li Guolin, Liao Huirong. Fast adaptive algorithm for MUSIC[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010,25(S1):6-9.
- [10] 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 Fucheng, Wang Shuxun, Sun Xiaoying. 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.
- [11] 余成波,陶红艳,杨菁,等.数字信号处理及 MATLAB 实现(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2008:126-137.
- Yu Chengbo, Tao Hongyan, Yang Jing, et al. Digital signal processing and MATLAB implementation (2nd Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008:126-137.
- [12] International Telecommunication Union, Rec. ITU-R M.1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000[S]. Geneva, Suisse: Final Draft, 1997:27-28.
- [13] Tong H, Seyed Z. A novel wireless local positioning system via a merger of DS-CDMA and beamforming: probability-of-detection performance analysis under array perturbations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007,56(3):1307-1320.
- 作者简介:**杨小凤(1984-),女,讲师,研究方向:无线定位算法、阵列信号处理等,E-mail:yy2822205@163.com;陈铁军(1966-),男,教授,研究方向:无线网络、嵌入式系统等;刘峰(1969-),男,高级工程师,研究方向:通信理论、集成电路等。