

基于用户信号的多径信号分组的 DOA 估计¹

俄广西 龚耀寰

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 在移动通信中,多径信号的分组一直是研究的重点.本文提出一种多径环境下的宿主用户和多径信号的分组和 DOA 估计算法.该算法不需要采用扩频技术确定多径信号的归属问题,因此不但可以应用于 CDMA 系统,而且可以应用于 GSM 系统.

关键词: DOA, 阵列, 多径, 空间特征

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1371-05

DOA Estimation Based on Multipath Signal Grouping of User Signal

E Guang-xi Gong Yao-huan

(Dept of E&E, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract In mobile communication systems, the work upon grouping multipath signal is very important always. An algorithm is proposed which firstly separates user signals and multipath signals in system, then estimates DOA of them. Because this algorithm does not need spread spectrum to identify multipath signals, it not only can be adopted in CDMA system, but also can be applied to GSM system.

Key words DOA, Array, Multipath, Spatial signature

1 引言

在移动通信系统中, SDMA(Spatial Division Multiple Access) 技术受到了越来越多的关注, 在 TDD(Time Division Duplex) 系统中, 从上行链路估计得到的移动终端的空间特征可以直接应用于下行链路的自适应波束形成. 但是在 FDD(Frequency Division Duplex) 系统中, 由于上、下链路的工作频率不同, 从上行链路估计得到的移动终端的空间特征就不能应用于下行链路的自适应波束形成. 此时, 用户终端的 DOA(Direction of Arrival) 就成了联系上、下行链路的唯一纽带. 在移动通信环境中, 尤其是在城区, 由于建筑物众多, 用户终端和基站之间存在多径干扰信号. 目前有很多算法可以解相关, 从而估计多径信号的 DOA^[1,2]. 比如高阶算法, 空间平滑算法^[3,4]等. 但是当用户信号不止一个时, 这些算法虽然可以解出每个入射信号的 DOA, 但是不能解决多径信号的归属问题, 即如何识别哪条多径是由哪个用户产生的. 在 CDMA(Code Division Multiple Access) 系统中, 可以利用扩频码对信号进行相关运算, 来解决多径信号的归属问题, 然后采用 RAKE^[5] 接收机充分利用多径信号. 但是由于存在多址干扰, 这种算法的性能会下降, 当多址干扰严重时, 甚至会失效. 在 GSM(Global System for Mobile telecommunications) 系统中, 抑制多径干扰的问题更加突出, 因为 GSM 系统中没有采用扩频技术, 解相关比较困难, 抑制多径干扰就很困难. 在雷达信号处理中, 也需要抑制多径干扰. 在自适应多波束 DBF(Digital BeamFormer) 中, 同样需要把多个用户信号和多径干扰信号区分

¹ 2003-07-07 收到, 2003-12-15 改回

863 计划项目 (2002AA123032) 及国防科技重点实验室基金项目 (51434060103DZ0217) 资助课题

开, 然后再把主瓣指向期望用户, 在多径信号方向置零。所有这一切的基础是宿主用户信号与多径信号的分离和识别。

本文提出一种算法, 在分析阵列输出信号的协方差矩阵的特征矢量和方向矢量之间关系的基础上, 首先对到达信号进行分组, 把每个用户及其多径信号划分为一组。然后再采用空间平滑算法解出同一组内的用户信号和多径信号的 DOA。此算法由于不需要扩频技术, 因此可以很好地应用于 GSM 系统。

2 数学模型

假设系统中有 K 个用户, 第 k 个用户发射的信号为 $s_k(t)$ 。这 K 个信号均为零均值分布的二阶平稳信号, 而且为窄带信号, 不同用户发射的信号互相独立。假定在移动通信环境中, 第 k 个用户信号存在 P_k 条多径, 第 i 条多径的幅度因子为 β_{ki} , 该条多径的入射角为 θ_{ki} , 对应入射角 θ_{ki} 的方向矢量为 $\mathbf{a}(\theta_{ki})$ 。系统采用 M 个阵元的等间距线阵 ($K < M$), 相邻阵元的间距为 d 。

第 k 个用户的空间特征为 \mathbf{a}_k ,

$$\mathbf{a}_k = \sum_{i=1}^{P_k} \beta_{ki} \mathbf{a}(\theta_{ki}), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

$$\mathbf{a}(\theta_{ki}) = \left[1 \quad e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{ki})} \quad \dots \quad e^{-j2\pi \frac{(M-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{ki})} \right], \quad i = 1, 2, \dots, P_k \quad (2)$$

式 (2) 中, λ 为入射信号的波长, 则阵列的输出信号为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_k s_k(t) + n(t) \quad (3)$$

式 (3) 中, $n(t)$ 为高斯白噪声。

定义 1

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2 \quad \dots \quad \mathbf{a}_K] \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \dots \quad s_K(t)]^T \quad (5)$$

则阵列的输出信号可以写为如下形式:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S} + n(t) \quad (6)$$

阵列输出信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H] = [\mathbf{a}_1 \quad \dots \quad \mathbf{a}_K] E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H] \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^H \\ \vdots \\ \mathbf{a}_K^H \end{bmatrix} + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

式 (7) 中, $\sigma_n^2 \mathbf{I} = E[n(t)n(t)^H]$, \mathbf{I} 为单位矩阵。

因为这 K 个信号相互独立, 则有

$$E[s_i(t)s_j(t)] = \begin{cases} s_{ii}, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

则

$$\mathbf{R}_{xx} = [\mathbf{a}_1 \cdots \mathbf{a}_K] \begin{bmatrix} s_{11} & & \\ & \ddots & \\ & & s_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^H \\ \vdots \\ \mathbf{a}_K^H \end{bmatrix} + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (9)$$

因为有 K 个用户及其多径组, 则 \mathbf{R}_{xx} 存在 K 个大特征值. 假定 $\lambda_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 是 \mathbf{R}_{xx} 的第 k 个大特征值, 对应的特征矢量为 $\mathbf{e}_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 则

$$\mathbf{R}_{xx} \mathbf{e}_k = \lambda_k \mathbf{e}_k \quad (10)$$

$$\left[\sum_{i=1}^K s_{ii} \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \right] \mathbf{e}_k = \lambda_k \mathbf{e}_k \quad (11)$$

$$\left[\sum_{i=1}^K s_{ii} \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^H \right] \mathbf{e}_k = (\lambda_k - \sigma_n^2) \mathbf{e}_k \quad (12)$$

整理上式得

$$\sum_{i=1}^K (s_{ii} \mathbf{a}_i^H \mathbf{e}_k) \mathbf{a}_i = (\lambda_k - \sigma_n^2) \mathbf{e}_k \quad (13)$$

由上式可以看出

$$\mathbf{e}_k = \sum_{i=1}^K \left[\frac{s_{ii}}{\lambda_k - \sigma_n^2} \mathbf{a}_i^H \mathbf{e}_k \right] \mathbf{a}_i \quad (14)$$

定义 2

$$h_{kl} = [s_{ll} / (\lambda_k - \sigma_n^2)] \mathbf{a}_l^H \mathbf{e}_k, \quad k, l = 1, 2, \dots, K \quad (15)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{K1} & \cdots & h_{KK} \end{bmatrix} \quad (16)$$

则有

$$[\mathbf{e}_1 \cdots \mathbf{e}_K] = [\mathbf{a}_1 \cdots \mathbf{a}_K] \mathbf{H}^T \quad (17)$$

由上式我们可以得出一个结论: \mathbf{R}_{xx} 的特征矢量是方向矢量的线形组合.

对于每一个特征矢量 \mathbf{e}_k , 从式 (15) 不难看出, 总有一个比较大的系数 h_{kl} , 使得方向矢量 \mathbf{a}_l 在特征矢量 \mathbf{e}_k 中起主要作用, 即

$$\mathbf{e}_k \approx h_{kl} \mathbf{a}_l \quad (18)$$

3 不同用户信号及其多径信号的分组

由式 (9) 不难看出, 对阵列输出信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_{xx} 进行特征分解, 大特征值的数目与系统中的用户信号的个数相等, 据此可以确定系统中的用户数目.

对第 $k (k = 1, 2, \dots, K)$ 个特征矢量 \mathbf{e}_k , 我们定义:

$$\mathbf{R}_{ee}(k) = \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^H \quad (19)$$

把式 (1), (18) 代入式 (19), 得

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{ee}(k) &= (\mathbf{h}_{kl}\mathbf{a}_l)(\mathbf{h}_{kl}\mathbf{a}_l)^H \approx \left[\mathbf{h}_{kl} \sum_{m=1}^{P_l} \beta_{lm} \mathbf{a}(\theta_{lm}) \right] \left[\mathbf{h}_{kl} \sum_{m=1}^{P_l} \beta_{lm} \mathbf{a}(\theta_{lm}) \right]^H \\ &\approx \left[\sum_{m=1}^{P_l} h_{kl} \beta_{lm} \mathbf{a}(\theta_{lm}) \right] \left[\sum_{m=1}^{P_l} h_{kl} \beta_{lm} \mathbf{a}(\theta_{lm}) \right]^H \end{aligned} \quad (20)$$

记

$$\mathbf{A}_l = [a(\theta_{l1}) \cdots a(\theta_{lP_l})] \quad (21)$$

则式 (20) 可以改写为

$$\mathbf{R}_{ee}(k) \approx \mathbf{A}_l \begin{bmatrix} |h_{kl}|^2 \beta_{l1} \beta_{l1}^* & \cdots & |h_{kl}|^2 \beta_{l1} \beta_{lP_l}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ |h_{kl}|^2 \beta_{lP_l} \beta_{l1}^* & \cdots & |h_{kl}|^2 \beta_{lP_l} \beta_{lP_l}^* \end{bmatrix} \mathbf{A}_l^H \quad (22)$$

根据式 (22), 我们构造 P_l 个相关信号 $\{b_{l1} \cdots b_{lP_l}\}$, 对应的入射角为 $\{\theta_{l1} \cdots \theta_{lP_l}\}$, 使得

$$\mathbf{E} \left[\begin{bmatrix} b_{l1} \\ \vdots \\ b_{lP_l} \end{bmatrix} [b_{l1}^H \cdots b_{lP_l}^H] \right] = \begin{bmatrix} |h_{kl}|^2 \beta_{l1} \beta_{l1}^* & \cdots & |h_{kl}|^2 \beta_{l1} \beta_{lP_l}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ |h_{kl}|^2 \beta_{lP_l} \beta_{l1}^* & \cdots & |h_{kl}|^2 \beta_{lP_l} \beta_{lP_l}^* \end{bmatrix} \quad (23)$$

很明显, 式 (22) 中的 $\mathbf{R}_{ee}(k)$ 即为阵列天线对 P_l 个虚拟入射信号 $\{b_{l1} \cdots b_{lP_l}\}$ 的响应信号的协方差矩阵。采用相关信号的 DOA 估计方法, 比如空间平滑算法, 或者高阶算法, 就可以解出 $\{\theta_{l1} \cdots \theta_{lP_l}\}$, 亦即第 k 个用户信号及其多径信号的入射角。

同理, 我们可以对其它用户的空间特征构造一个协方差矩阵, 然后用去相关方法得到该用户及其多径信号的入射角。

4 算法描述

综上所述, 本文所提出的算法可以叙述如下: 首先利用特征分解方法对阵列输出信号的协方差矩阵进行特征分解, 根据大特征值的个数确定系统中宿主用户信号的数目, 然后用特征矢量来近似用户的空间特征矢量, 使用该特征矢量构造相应的协方差矩阵, 最后利用空间平滑方法解出每个用户及其多径信号的 DOA。多径信号经过衰减后, 包络的幅度值小于宿主信号, 对应的谱峰也比宿主信号对应的谱峰低, 由此可以把宿主信号和相应的多径信号分离开来。

5 仿真

为了验证本文所提出的算法, 我们做了计算机仿真。采用 8 元等间距线阵, 相邻阵元的间距等于入射信号的半波长。系统中存在两个用户, 每个用户包含一条多径。用户 1 及其多径的入射方向为 $\{-50^\circ - 30^\circ\}$, 用户信号的信噪比为 10 dB, 衰减因子为 $\{10.3 + 0.4j\}$; 用户 2 及其多径的入射方向为 $\{10^\circ 40^\circ\}$, 用户信号的信噪比为 15 dB, 衰减因子为 $\{10.7 + 0.6j\}$ 。用户 1 与用户 2 不相关。采用本文所提出的算法得到的两个用户信号及其多径的估计如图 1 和图 2 所示。图 1 中两个谱峰对应的角度为 $\{-50^\circ - 10^\circ\}$, 幅度较大的谱峰对应的角度为用户 1 发射信号的 DOA; 图 2 中两个谱峰对应的角度为 $\{+20^\circ + 50^\circ\}$, 幅度较大的谱峰对应的角度为用户 2 发射信号的 DOA。

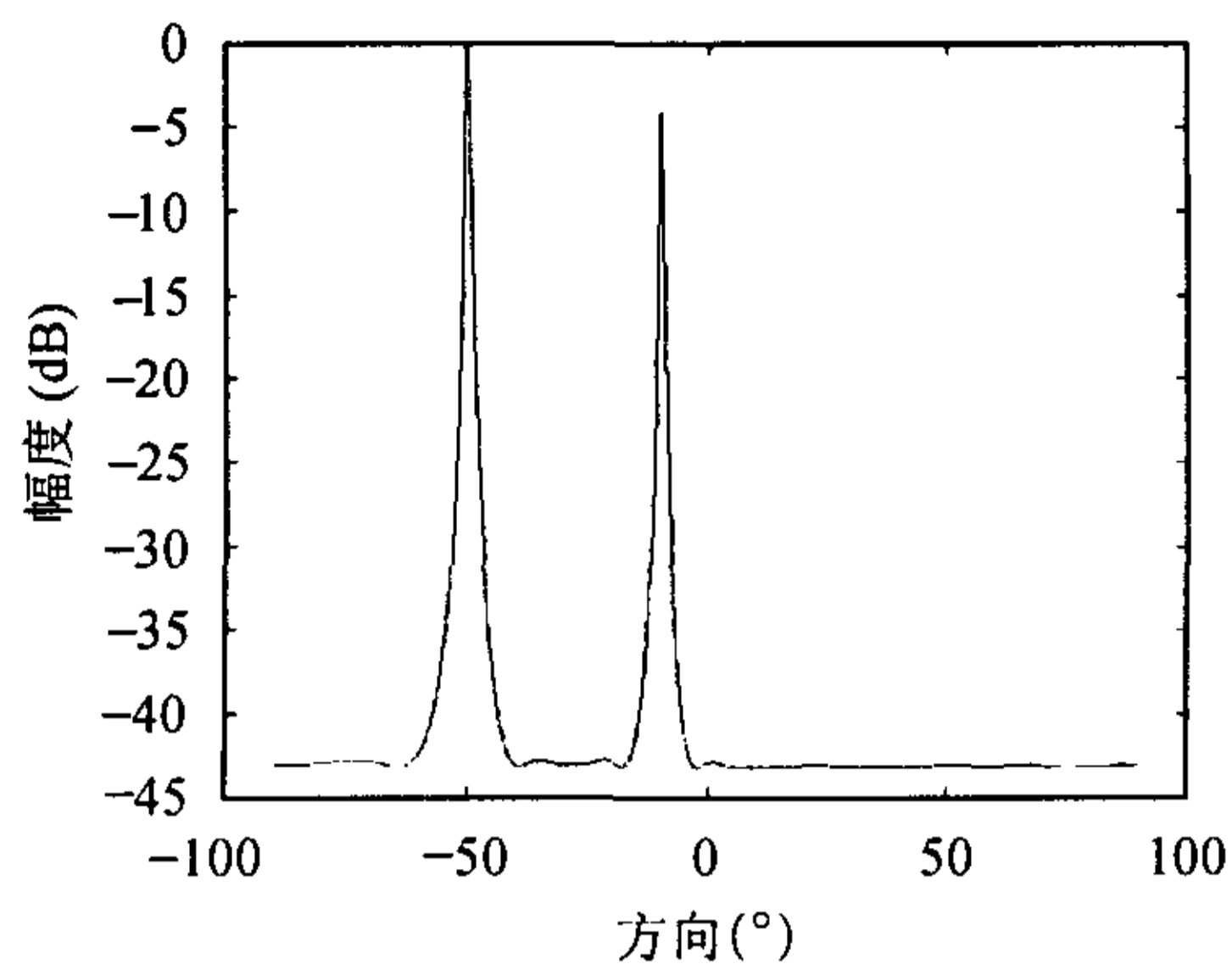


图1 用户1及其多径信号的 DOA

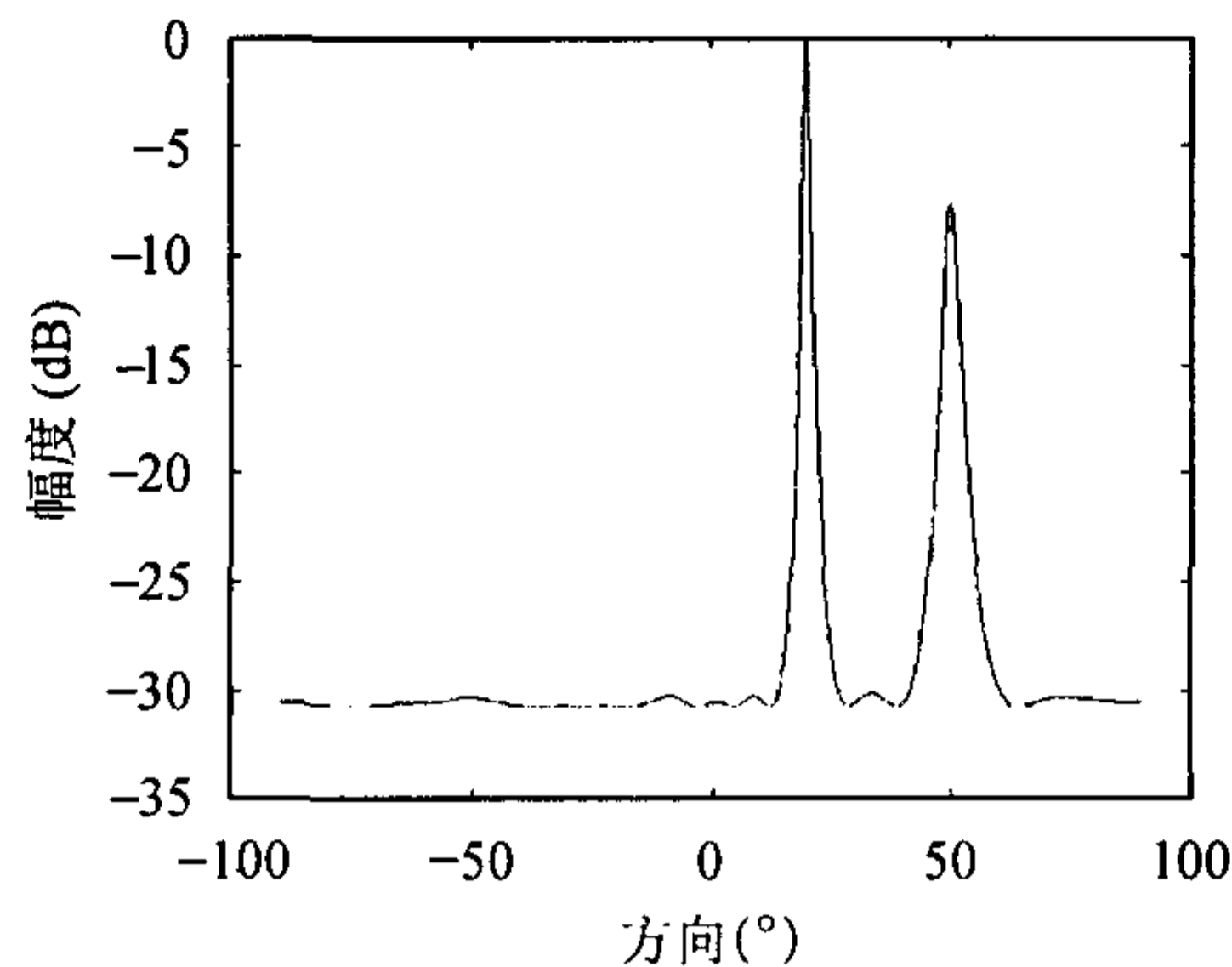


图2 用户2及其多径信号的 DOA

6 结论

本文提出一种多径环境下的宿主用户和多径信号的分组和估计算法, 该算法不需要采用扩频技术确定多径信号的归属问题, 因此不但可以应用于 CDMA 系统, 而且可以应用于 GSM 系统。仿真结果表明了本算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Cadzow J A, *et al.*. Resolution of coherent signals using a linear array. Proc. IEEE ICASSP'87, Arizona State University, Tempe, Arizona, April 1987: 1599-1600.
- [2] Cozzens J H, *et al.*. Enumeration of fully correlated signals by modified rank sequences. Proc. IEEE ICASSP'87, Glasgow, UK, April 1989: 2274-2277.
- [3] Astrom K, Heyden A. Stochastic analysis of scale-space smoothing. Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, Aug. 25-29, 1996, Vol.2: 305-309.
- [4] Tie-Jun Shan, Wax M, Kailath T. On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals. *IEEE Trans., Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, 33(4): 806-811.
- [5] Fock G, Baltersee J, Schulz-Rittich P, Meyr H. Channel tracking for RAKE receivers in closely spaced multipath environments. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(12): 2420-2431.

俄广西: 男, 1972 生, 博士生, 主要研究方向为自适应阵列信号处理。

龚耀寰: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应信号处理、智能天线、高速并行信号处理。