

利用单基站对三维运动目标定位与跟踪¹

田孝华 * ** 廖桂生 * 王洪洋 *

*(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

** (空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

摘要: 该文提出了一种利用单个 CDMA 基站发射的导频序列对三维运动目标进行定位与跟踪的方法。首先,利用直达干扰信号与目标反射信号的多普勒频移的不同及伪随机序列自相关函数的特点抑制直达分量,估计相对时延;其次,用与 Chan(1994)类似的方法初步估计目标位置;最后,根据目标在短时间内的运动可近似为匀速直线运动的特点来改善定位精度,并实现测速。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 导频序列, 波达时间差, 定位

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1364-07

Locating and Tracking of 3-D Moving Targets Using Single Base Station

Tian Xiao-hua * ** Liao Gui-sheng * Wang Hong-yang *

*(Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

** (The Telecommunication Eng. Institute, Air Force Eng. Univ., Xi'an 710077, China)

Abstract A method of position locating and tracking using pilot sequence transmitted by the single CDMA Base Stations(BS) for 3-D moving targets is presented in this paper. First, based on the fact that the interfering component is different from the signal reflected by the moving target in the Doppler shift and the property of the auto-correlation function of PN sequence, the interfering component is filtered and the Time Difference Of Arrival(TDOA) is estimated. Then, position location is obtained using the method similar to Chan(1994). Finally, considering the fact that the motion of target is linear with constant speed vector in short duration, the accuracy of position location is improved and the velocity of target is estimated. Its effectiveness is verified by the simulation results.

Key words Pilot sequence, Time Difference Of Arrival(TDOA), Position Location(PL)

1 引言

利用民用设备(如广播台,电视台)发射的信号对三维运动目标定位,由于不需要专用的发射设备发射信号,这样既大大降低了系统成本,又能使被侦察的可能性降低到最低限度,因而引起了广泛关注,并取得了一些进展。近几年来,随着 CDMA 移动通信网在我国城镇的建立,利用该网络对三维运动目标进行定位成为了可能。本文针对只有单基站的中小城市怎样利用一个基站发射的信号对三维运动目标定位进行了研究。

目前使用的 CDMA 系统是基于 IS-95 标准的 800MHz 蜂窝系统和基于 J-STD-008 标准的 1900 MHz 个人通信业务(PCS)系统^[1,2]。它们均采用频分双工(FDD)的工作方式,基站使用的是略向下倾的扇区化天线,每个扇区 120°。对于半径为几公里的宏蜂窝系统,发射功率最大达到了 50 W。从基站到用户的前向链路(亦称下行链路)中有一个为用户对同步信道、寻呼信道

¹ 2002-12-22 收到, 2004-03-22 改回

国家自然科学基金(No.60172028)和武器装备预研基金(No.51407030101DZ0120)资助课题

及业务信道进行相干解调提供参考的导频信道，其发射功率占基站发射功率的 15~25%，且不受功率控制的影响。它发射的是一个未经调制的、对于特定基站具有唯一偏移量的 M 序列（由长度为 $2^{15}-1$ 的 m 序列在连续 14 个零之后插入 1 个零形成），码片速率为 1.2288 Mchip/s。本文一方面利用该导频序列的自相关特性检测信号，估计定位参数；另一方面利用基站对该序列的连续发射，实现对定位目标的跟踪与测速，改善定位精度。

利用单基站发射的导频信号定位存在以下几个问题。第一，对于三维目标的定位，至少需要三条以上的位置线，而单基站单接收机只能提供一条位置线。第二，尽管基站发射的信号中导频信号是最强的，但由于基站天线方向图的下倾，经几千米~几十千米外运动目标反射回来的信号将是非常微弱的。更为严重的是接收机接收的信号除目标反射的信号外，还有来自基站的直达信号和地面反射的信号，它们的功率远远大于目标反射信号的功率，怎样从强干扰中检测弱信号，实现定位参数的估计将是另一个难点。第三，在估计定位参数的基础上怎样实现定位及跟踪。针对第一个问题，本文在考虑成本及参数估计精度的基础上提出了采用如图 1 所示的分布天线系统对目标进行定位（即将所有分布在不同位置的天线接收的信号传送到定位中心进行处理）。对于后两个问题下面进行详细讨论。

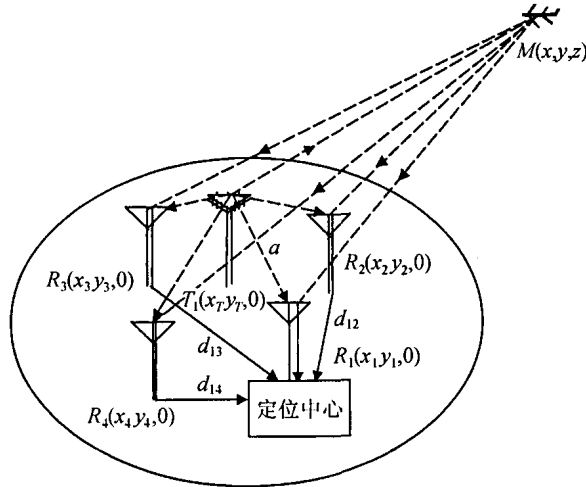


图 1 单基站定位示意图 ($d = d_{MT}$, $r_i = d_{M,R}$, $i = 1 \sim 4$)

2 直达分量的抑制与定位参数的估计

2.1 直达分量的抑制

分布天线接收的信号包括干扰信号、目标反射信号和噪声，其中目标反射信号为多普勒频移不为零的弱信号，由基站直达信号及地面反射信号组成的干扰信号为多普勒频移为零的强信号。定位中心的天线高度保证能接收到基站的直达信号，这样可省去接收机与基站的时间同步。设基站发射的导频序列为 $c(t)$ ，定位中心以收到基站的直达信号时间为基准（通过广义相关或延迟锁相环得到该基准），第 i 个分布天线收到的信号传送到定位中心经混频、滤波及码片速率采样后为

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{K_i} a_{i,j} c(t - \tau_{i,j}) + a_i c(t - \tau_i) e^{j2\pi f_{d_i}(t - \tau_i)} + n_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 $a_{i,j}$, $\tau_{i,j}$ 分别为第 i 个分布天线接收的第 j 条多径干扰分量的幅度和相对于定位中心收到的直达分量的时延, $\tau_{1,1} = 0$; a_i, τ_i, f_{di} 分别为第 i 个分布天线接收运动目标反射信号的幅度、时延及多普勒频移; N 为分布天线数; K_i 为第 i 个分布天线接收的干扰分量数。

为了准确估计定位参数, 必须先消除信号中的干扰分量, 为此需要估计干扰分量的时延及幅度。考虑接收信号中干扰分量的多普勒频移为零, 而目标反射信号多普勒频移不为零以及导频序列自相关函数的特点, 本文对每个分布天线接收信号均采用以下方法消除干扰分量 [3]。

(1) 将第 i 个分布天线的采样数据序列 $\mathbf{x}_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(T)]$ 与由基站导频序列经过循环延迟并截取前 T 个数据构成的列矢量 $\mathbf{c}(\tau)$ 进行相关, 以估计干扰分量的时延。 T 为采样数据的长度, 得到峰值对应的时延 $\tau_{i,j}$, $j = 1, 2, \dots, K_i$ 。

$$R_i(\tau) = \mathbf{x}_i \mathbf{c}(\tau) \quad (2)$$

(2) 采用以下代价函数估计对应时延的干扰分量的幅度 [4]:

$$f_i(\mathbf{a}_i) = \min_{\mathbf{a}_i} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{a}_i^H \mathbf{C}\|^2 \quad (3)$$

式中 $\mathbf{a}_i = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,K_i})^H$, $\mathbf{C} = (\mathbf{c}(\tau_{i,1}), \mathbf{c}(\tau_{i,2}), \dots, \mathbf{c}(\tau_{i,K_i}))^H$, $\mathbf{c}(\tau_{i,j})$ 为基站导频序列循环延迟 $\tau_{i,j}$ 码片, 截取前 T 个数据构成的列矢量:

$$\mathbf{a}_i = (\mathbf{C}_i \mathbf{C}_i^H)^{-1} \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i^H \quad (4)$$

(3) 依据估计的干扰分量的时延、幅度, 从采样数据中滤除干扰, 得到数据 \mathbf{y}_i :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{a}_i \mathbf{C} \quad (5)$$

2.2 定位参数估计

经干扰对消后的数据 \mathbf{y}_i 由运动目标的反射信号、残余干扰信号及噪声组成, 本文采用测波达时间差 (TDOA) 方法对运动目标定位 [4,5]。因此, 要估计的定位参数为每个分布天线接收的目标反射信号传送到定位中心的时间相对于定位中心的天线接收基站直达信号的延迟时间, 即式 (1) 中的 τ_i , $i = 1, \dots, N$ 。

对目标反射的弱信号增强的传统方法是对信号进行相干积累。由于导频序列是一个确定的伪随机序列, 对采样的 T 个数据进行相关运算, 实际上可等效为对信号的 T 次积累, 并利用相关函数的特点来估计定位参数 τ_i 。即对由导频序列 \mathbf{c} 经过循环延迟后截取的前 T 个数据构成的新序列 $\mathbf{c}(\tau)$ 与数据矢量 \mathbf{y}_i 在时-频平面进行相关运算来估计定位参数:

$$f_i(\tau, f_d) = \sum_{t=1}^T \mathbf{y}_i(t) \mathbf{c}(t - \tau) e^{-j2\pi f_d(t - \tau)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$f_i(\tau, f_d)$ 的峰值在时间域投影对应坐标 τ_i 即为要估计的定位参数。

这里需要说明的是: 虽然理论上通过对式 (6) 峰值搜索可同时得到多普勒频移, 进而估计运动目标的速度。但考虑到 CDMA 基站工作频率, 码片速率以及运动目标的最大速度和运算量, 采样数据的长度相对于多普勒频率的周期来说是可比拟的。这样由于采样数据的持续时间很短, 用式 (6) 进行二维搜索时, 峰值在频域上投影的主瓣将非常宽而使得多普勒频移估计的准确性下降, 而在时域上投影由于导频序列自相关函数的特点可准确估计时延。虽然不能准确估计多普勒频移, 但可利用峰值在频域上投影的主瓣很宽的特点减小对式 (6) 的运算量。即在进行二维搜索时, 频域维可以取较大的步长, 仿真结果证明了其有效性。另外, 上面讨论是以码片的速率对接收信号采样的, 由于 1 个码片对应电波传播约 244 m, 这对定位精度的影响是相当大的, 为了提高定位精度, 一般以 4 倍或更高的速率对信号进行采样。

3 三维运动目标定位与跟踪

3.1 目标定位算法

根据图 1 估计的定位参数 τ_i 可表示为

$$\tau_i = (d + r_i + d_{1i} - a)/c + (e_{m,i} - e_{m,0}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中 $d_{11} = 0$, $e_{m,0}$ 为直达分量到达时间的估计误差, $e_{m,i}$ 为目标反射信号到达时间的估计误差。它们均是通过峰值搜索得到的, 服从均值为零、均方差为 δ_m 的均匀分布, 误差间相互独立。当基站与分布天线位置给定, 则 d_{1i} , a 确定, c 为光速, d , r_i 为

$$d = \sqrt{(x - x_T)^2 + (y - y_T)^2 + (z - z_T)^2} \quad (8)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (9)$$

式 (7) 为非线性方程, 文献 [6,7] 提出了两种解非线性 TDOA 定位方程的代表方法。本文采用与文献 [6] 类似方法求解上面非线性方程。将 d , r_i 代入式 (7), 并考虑 $z_T, z_i = 0$ 及 $2r_i^0 \gg c(e_{m,i} - e_{m,0})$, r_i^0 为目标到第 i 个分布天线的真实距离, 有

$$\begin{aligned} & (c\tau_i - d_{1i} + a)^2 - k_i + k_T - 2((x_T - x_i)x + (y_T - y_i)y + (c\tau_i - d_{1i} + a)d) \\ & = 2cr_i^0(e_{m,i} - e_{m,0}), \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $k_i = x_i^2 + y_i^2$, $k_T = x_T^2 + y_T^2$ 。

式 (10) 为关于 x, y, d 的线性方程, 采用加权最小二乘解 x, y, d , 将其写成矩阵形式, 有

$$\varphi = b - Ax \quad (11)$$

其中

$$\varphi = 2c \text{diag}(r_1^0, r_2^0, \dots, r_N^0) \mathbf{n} = 2cB\mathbf{n},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} (c\tau_1 - d_{11} + a)^2 - k_1 + k_T \\ \vdots \\ (c\tau_N - d_{1N} + a)^2 - k_N + k_T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} x_T - x_1 & y_T - y_1 & c\tau_1 - d_{11} + a \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_T - x_N & y_T - y_N & c\tau_N - d_{1N} + a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} e_{m,1} - e_{m,0} \\ \vdots \\ e_{m,N} - e_{m,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{m,0} \\ e_{m,1} \\ \vdots \\ e_{m,N} \end{bmatrix} = C\mathbf{e}_m$$

由于 \mathbf{n} 为零均值的随机变量, 则 φ 亦为零均值的随机变量, 其协方差为

$$\Psi = e[\varphi\varphi^H] = 4c^2\sigma_m^2 BCIC^H B \quad (12)$$

式 (11) 的加权最小二乘解为

$$\mathbf{x} = \min\{(\mathbf{b} - A\mathbf{x})^H \Psi^{-1}(\mathbf{b} - A\mathbf{x})\} = (A^H \Psi^{-1} A)^{-1} A^H \Psi^{-1} \mathbf{b} \quad (13)$$

这里需要特别说明: 由于 r_i^0 未知, 因此对式 (11) 是无法直接采用加权最小二乘求解 x, y, d 的。本文对式 (11) 先用等权最小二乘方法解 x, y, d , 然后用式 (7) 解 r_i^0 的近似值, 再用加

权最小二乘解 x, y, d ，并进行迭代运算（一般迭代两次即可），最后将 x, y, d 代入式 (8) 求解 z 。

$$z = \sqrt{d^2 - (x - x_T)^2 + (y - y_T)^2} \quad (14)$$

3.2 目标跟踪算法

估计定位参数的随机误差使得估计的目标位置也会随机地偏离真实位置，因此，必须对估计的目标位置进一步处理，以改善定位精度，同时完成对运动目标的速度估计。文献 [8~11] 提出了一些对估计位置进行平滑跟踪的方法。本文利用目标在短时间内的运动可近似为匀速直线运动的特点来改善定位精度与测速。

利用连续估计的 K 次目标位置对 $i=1$ 时刻的位置及速度进行估计。设定位间隔为 ΔT ，连续估计的目标位置为 (x_i, y_i, z_i) ， $i = 1, 2, \dots, K$ ，与真实位置的误差为 $e_{x,i}, e_{y,i}, e_{z,i}$ 。待估计的目标速度为 (v_x, v_y, v_z) ，进一步估计的目标在 $i=1$ 时刻的位置用 (x_0, y_0, z_0) 表示，则有

$$x_i = x_0 + v_x(i-1)\Delta T + e_{x,i}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (15)$$

$$y_i = y_0 + v_y(i-1)\Delta T + e_{y,i}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

$$z_i = z_0 + v_z(i-1)\Delta T + e_{z,i}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (17)$$

式 (15)、(16)、(17) 的最小二乘解分别为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{b}_x \quad (18)$$

$$\mathbf{y} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{b}_y \quad (19)$$

$$\mathbf{z} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{b}_z \quad (20)$$

式中

$$\mathbf{x} = (x_0, v_x)^T, \quad \mathbf{y} = (y_0, v_y)^T, \quad \mathbf{z} = (z_0, v_z)^T, \quad \mathbf{b}_x = (x_1, x_2, \dots, x_K)^T,$$

$$\mathbf{b}_y = (y_1, y_2, \dots, y_K)^T, \quad \mathbf{b}_z = (z_1, z_2, \dots, z_K)^T$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \Delta T \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (K-1)\Delta T \end{bmatrix}$$

估计的位置与速度为

$$(x_0, y_0, z_0) = (x(1), y(1), z(1)), \quad (v_x, v_y, v_z) = (x(2), y(2), z(2)) \quad (21)$$

4 仿真分析

为了证明上述算法的有效性，用计算机进行了仿真。设基站坐标为 (0,0,0) km，基站导频序列对应的偏移指数 (64 个码片的倍数) 为 4，定位中心为 (5,0,0) km，分布天线位置为 (5,0,0) km，(0,5,0) km，(5,7,0) km，(7,5,0) km，基站发射信号频率为 880 MHz，接收机对接收信号经混频滤波后，以 4 倍的码片速率采样，共采样 4000 个数据 (1000 个码片周期)。

仿真 1 仿真估计基站发射信号经目标反射被在 (0,5,0) km 处的分布天线接收并传输到定位中心的时间相对于基站信号直接到达定位中心的延迟时间的有效性。设目标以 300 m/s 的速度沿 x 轴的反方向飞行，分布天线接收目标在 (30,3,2.5) km 处反射回来的信号，分布天线接收的信号除了目标的反射信号外，还有基站的直达信号及噪声，直达信号与噪声的信噪比为 6 dB，

目标反射信号的信噪比为 -14 dB (即直达信号比目标反射信号高 20 dB)。对接收信号进行干扰抑制后，利用导频序列在时-频域进行搜索，结果如图 2 所示。图 2(a) 为搜索结果在时域上的投影，图 2(b) 为搜索结果在频域上的投影。纵坐标为相关值，图 2(a) 横坐标为相对时延 (单位为 $1/4$ 码片)，图 2(b) 横坐标为多普勒频移 (单位为赫兹)。由图可见，采用上面方法能有效估计相对时延，但多普勒频移的主瓣宽度很宽，显然估计精确度会受到影响。

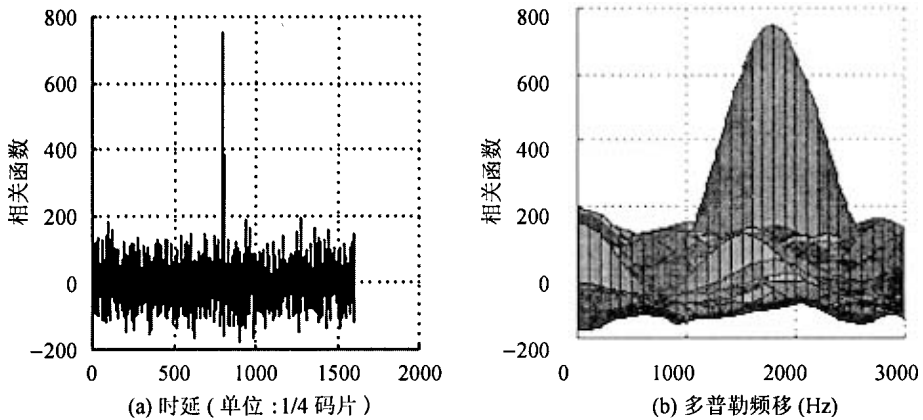


图 2 基站导频序列与接收信号在视频域相关结果

仿真 2 仿真采用 TDOA 对运动目标进行定位和跟踪的有效性。目标从 $(20,20,2)\text{ km}$ 处以 $(-300, -200, 0)\text{ m/s}$ 速度飞行，每 1 s 定位 1 次，对目标的定位由分布天线系统完成，用相邻 10 次定位数据进行平滑跟踪与测速。时延估计误差用在 $[-1/8\text{ 码片}, +1/8\text{ 码片}]$ 内服从均匀分布的随机变量表示。估计目标速度与时间的关系如图 3 所示。其中 1 号线为目标在 x 方向的估计速度，2 号线为目标在 y 方向的估计速度，3 号线为目标在 z 方向的估计速度。由图可见估计速度在 x, y 方向比较准确， z 方向波动较大。定位误差 (米) 与误差分布函数的关系如图 4 所示，1 号线为未平滑的结果，2 号线为平滑后的结果，可见平滑处理对定位精度改善明显。

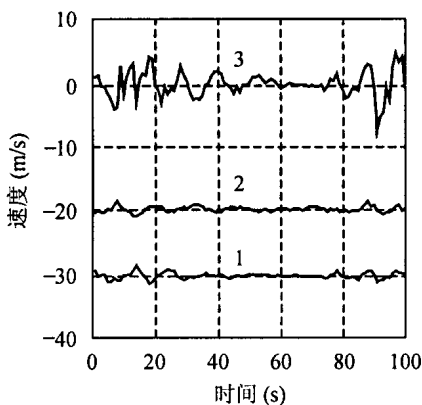


图 3 估计运动目标的速度

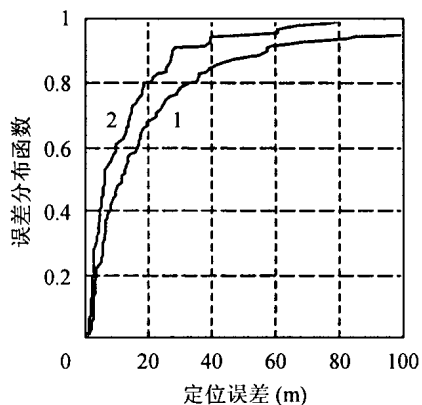


图 4 定位误差与误差分布函数的关系

5 结 论

本文研究了利用 CDMA 蜂窝网的单基站发射的导频序列对三维运动目标进行定位与跟踪的可行性, 并针对其中问题提出了相应的解决方法。从仿真结果看本文提出的方法是有效的。

参 考 文 献

- [1] Liberti J C, Rappaport T S. Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications[M]. New York: Prentice Hall, Inc., 1999: 20-120.
- [2] Garg V K. IS-95 CDMA and cdma 2000: Cellular/PCS systems implementation[M]. New York: Prentice Hall, Inc., 2000: 1-90.
- [3] 田孝华, 廖桂生. 一种新的基于相关序列的 CDMA 系统盲波束形成方法 [J]. 电子学报, 2001, 29 (12A): 1893-1896.
- [4] 孙仲康, 陈辉煌. 定位导航与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987, 第 3 章 - 第 5 章.
- [5] Caffery J. Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems[M]. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000, Chapter1-Chapter4.
- [6] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [7] Foy W H. Position-location solutions by Taylor-series estimation[J]. *IEEE Trans. on AES.*, 1976, 12(3): 187-193.
- [8] Hellebrandt M, Mathar R, Scheibenbogen M. Estimation position and velocity of mobiles in a cellular radio network[J]. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1997, 46(1): 65-71.
- [9] Hellebrandt M, Mathar R. Location tracking of mobiles in cellular radio networks[J]. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1999, 48(5): 11558-1562.
- [10] Jeong Y, You H, Lee W C, Hong D, Youn D H, Lee C. A wireless position location system using forward pilot signal[A]. VTC 2000-Spring Tokyo, 2000 IEEE 51st, vol.2: 1354-1357.
- [11] Shen X, Mark J W, Ye J. Mobile location estimation in cellular networks using fuzzy logic[A]. IEEE VTS Fall VTC 2000. 52nd, vol.6: 2108-2114.

田孝华: 男, 1965 年生, 博士, 副教授, 获军队科技进步三等奖两次, 感兴趣的研究方向为阵列信号处理、移动通信中的定位及非平稳信号处理等。

廖桂生: 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究。