

非直达波条件下的 TDD 高精度移动定位算法

刘申建, 万 群, 彭应宁

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文基于单次散射双向移动信道模型及信道参数联合估计, 利用单基站测得的多条散射路径的到达时延、到达方向和离波方向进行定位, 提出了一种非直达波条件下的 TDD 高精度移动定位算法. 随后分析了其定位误差的分布特性. 仿真结果验证了非直达波条件下该算法的有效性.

关键词: 非直达波; 单次散射; 离波; 移动定位

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1288-04

A Non-Line-Of-Sight High-Resolution Location Algorithm Based on TDD for Mobile Station

LIU Shen-jian, WAN Qun, PENG Ying-ning

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A NLOS (Non line of sight) high-resolution location algorithm is proposed based on the parameters TOA (Time of Arrival), DOA (Direction of Arrival) and DOD (Direction Of Departure) of multiple propagation paths, which can be measured simultaneously under the scenarios where single scattering is dominant in the double-array mobile communication system. From the knowledge of DOD, the single scattering path can be reconstructed and so NLOS location problem becomes solvable. Error analysis disclosed the performance of this algorithm. Simulation shows its effectiveness when no line-of-sight propagation paths exist between the mobile station and the base station.

Key words: non-line-of-sight; single scattering; direction-of-departure; mobile location

1 引言

随着移动通信技术的快速发展, 移动用户数目不断增长, 由移动用户发起的紧急呼叫数目在所有呼叫当中所占比例也不断升高^[1]. 为满足公共应急服务的需要, 美国联邦通信委员会于 1996 年颁布 E-911 计划, 要求蜂窝移动通信系统能对现有移动用户实时精确定位^[2]. 传统的定位方法一般都假定目标和观测站之间存在视距传播 (Line-Of-Sight), 然后依据定位参数计算目标的具体位置^[3]. 在移动通信环境中, 由于严重多径和非直达波 (Non-Line-Of-Sight) 的影响, 实际的定位参数和移动台位置之间不再存在 LOS 条件下才具有的较简单、明确的几何关系^[4,5]. GSM 系统实测表明, 不同传播环境中 NLOS 引起的测距偏差变化范围很大^[6], 移动定位误差随 NLOS 引起的测距偏差近似线性增长^[7]. 目前, 抑制 NLOS 的方法主要有两种: 消极加权和统计校正^[8,9]. 当存在 LOS 或者 LOS 占主要成份时, 这些方法能很好地抑制 NLOS 的影响; 不过, 在 NLOS 路径偏离 LOS 较大时, 即使测量误差很小, 其定位误差也可能很大. 为了克服 NLOS 对定位精度的影响, 必须引入足够的信道观测信息, 将 NLOS 条件下对移动台的定位问题转

化为可解问题.

本文基于单次散射双向移动信道模型^[10]及信道参数联合估计^[11], 利用单基站测得多条散射路径的到达时间 (Time Of Arrival)、到达方向 (Direction Of Arrival) 和离波方向 (Direction Of Departure) 进行定位, 提出了一种 NLOS 条件下的 TDD (TOA-DOA-DOD) 高精度移动定位算法. 和现有 NLOS 定位算法相比, TDD 定位算法由于引入了 DOD 观测量, 能够重建各条单次散射路径, 其定位精度主要取决于定位参数的测量精度, 而和 NLOS 引起的参数偏差无关. 尤其是在 NLOS 引起的参数偏差较大时, TDD 定位性能明显优于其它 NLOS 定位算法, 仿真部分通过比较 TDD 定位算法和 TD (TOA - DOA) 混合定位算法的性能验证了这一点.

2 双向移动信道模型及其定位参数联合估计

现有移动定位系统一般只在基站采用方向天线, 可以采用单向信道模型来描述信道的时延特性和方向特性; 由于移动台天线无方向发射, 该模型不包含移动台的发射方向信息. 在 NLOS 条件下, 利用基站测得的信号 TOA 或 DOA 定位, 将

收稿日期: 2001-06-12; 修回日期: 2001-11-05

基金项目: 清华大学信息学院基础创新基金资助项目 (No. 2001416)

引起一定的 NLOS 定位误差.分析表明,如果不考虑散射区域大小, NLOS 条件下 DOA 定位模糊区分布在移动台所在的整个小区或者扇区内, TOA 定位模糊区由多个定位圆交叉区域决定.也就是说,在 NLOS 条件下,无论是 TOA 定位还是 DOA 定位都是欠定问题.为了更好的抑制 NLOS 对定位精度的影响,有必要增加信道模型的复杂性,引入更多的未知参数描述信道的传播特性.

文献[10]中提出了一种双向信道模型,和其它模型不同的是,该模型还包含了 DOD 信息.考虑到移动台全向覆盖要求、集成复杂度等因素的限制,移动台天线可以选用开关波束双锥形同轴天线^[11].天线的同轴馈源数目以及多模同轴波导内外径的比率决定了天线波束的形状,并通过调整各反馈支路的相移来改变波束指向,这样就兼顾了方向发射和全向覆盖的要求;当然,为了自适应调整波束形状,也可以在相移调整网络中集成幅度调整模块^[12].

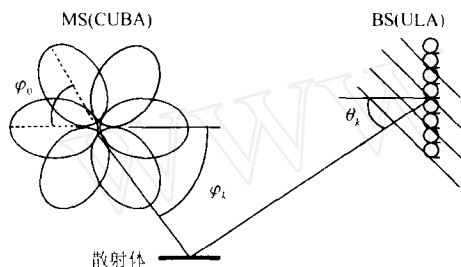


图1 双向移动定位系统配置

双向移动定位系统配置如图1所示.为了计算方便,假设基站采用均匀线性阵列天线,移动台采用上述开关波束天线.波束旋转一周,对各波束指向输出的单次采样等价于具有相同虚拟孔径的圆均匀波束阵列(Circular Uniform Beam Array)的单次快拍,空间采样波束的数目 M 满足空间采样定理 $M \cdot \varphi_0 = 2\pi$, 波束宽度 φ_0 由天线孔径决定.对于第 k 条单次散射路径, CUBA 虚拟阵列输出方向矢量为

$$\mathbf{b}(\varphi_k) = [b(-\varphi_k), b(\varphi_0 - \varphi_k), \dots, b((M-1)\varphi_0 - \varphi_k)]^T$$

利用其空间相位的周期特性

$$b(\varphi) = b(\varphi + 2k\pi), k \in \mathbb{Z}$$

作空间傅立叶变换, $\mathbf{F} \cdot \mathbf{b}(\varphi_k) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{a}(\varphi_k)$, \mathbf{F} 是傅立叶变换矩阵, \mathbf{G} 为 CUBA 的虚拟孔径函数的采样矩阵(可以事先计算 \mathbf{G} 的归一化矩阵,归一化幅度归于信号幅度,所以对基站而言, \mathbf{G} 是常数矩阵),并且

$$\mathbf{G} = \text{Diag}(g_0, \dots, g_{M-1})$$

$$g_k = \sum_{m=0}^{M-1} b(m\varphi_0) \exp(-jmk\varphi_0), k = 0 \sim M-1$$

$\mathbf{a}(\varphi_k) = [1, \exp(-j\varphi_k), \dots, \exp(-j(M-1)\varphi_k)]^T, k = 1 \sim K$ 其中 $\mathbf{a}(\varphi_k)$ 保留了 CUBA 虚拟阵列响应的空间移位不变特性^[13].结合 DOA 的空间移位不变性和 TOA 的时间移位不变性,采用交替 ESPRIT 算法^[10]或者联合 U-ESPRIT 算法^[13],实时估计各条散射路径的 TOA、DOA 和 DOD 参数.关于信道参数估计,不属于本论文讨论的范围,这里不作详述.

3 TDD 定位原理

TDD 定位基于上述的双向移动信道模型,实时估计多条单次散射路径的 TOA、DOA 和 DOD 参数,重建 NLOS 传播路径,实现对移动台的高精度定位.考虑二维定位情况,以双散射路径为例.如图2所示,基站位于 $B(x_b, y_b)$,移动台位于 $M(x, y)$, S_1 和 S_2 为两个散射点.在基站估计两条散射路径的 TOA、DOA 和 DOD,分别记为 $(\tau_1, \theta_1, \varphi_1)$ 和 $(\tau_2, \theta_2, \varphi_2)$.下面以路径1为例分析移动台、基站和散射路径之间的几何位置关系,推导定位方程.

图2中, r_{11} 、 r_{12} 分别是 MS_1 和 S_1B 的长度,两者之和等于路径1的传播距离; P_1 是线段 BS_1 延长线上的一点,并且线段 S_1P_1 和 MS_1 长度相等;再经过 B 点作 MS_1 的平行线 BQ_1 ,线段 BQ_1 的长度等于路径1总长度 $r_{11} + r_{12}$,且 Q_1 和 M 在直线 BP_1 的同一侧,则线段 P_1Q_1 为路径1所包含的移动台定位点的轨迹.同样可以求出路径2所包含的移动台定位点的轨迹 P_2Q_2 . P_1Q_2 和 P_2Q_2 的交点即为移动台所在位置. P_1 、 Q_1 、 P_2 和 Q_2 的坐标为

$$P_1(x_b + \tau_1 \cos \theta_1, y_b + \tau_1 \sin \theta_1)$$

$$Q_1(x_b - \tau_1 \cos \theta_1, y_b - \tau_1 \sin \theta_1)$$

$$P_2(x_b + \tau_2 \cos \theta_2, y_b + \tau_2 \sin \theta_2)$$

$$Q_2(x_b - \tau_2 \cos \theta_2, y_b - \tau_2 \sin \theta_2)$$

P_1Q_1 和 P_2Q_2 的直线方程

$$\begin{cases} \tau_1 \sin(\varphi_1 - \theta_1) = (\sin \varphi_1 + \sin \theta_1)(x - x_b) \\ \quad - (\cos \varphi_1 + \cos \theta_1)(y - y_b) \\ \tau_2 \sin(\varphi_2 - \theta_2) = (\sin \varphi_2 + \sin \theta_2)(x - x_b) \\ \quad - (\cos \varphi_2 + \cos \theta_2)(y - y_b) \end{cases} \quad (1)$$

解方程组(1)得到移动台坐标

$$\begin{cases} x = x_b + \frac{\tau_1(\cos \varphi_2 + \cos \theta_2)\alpha - \tau_2(\cos \varphi_1 + \cos \theta_1)\beta}{\gamma} \\ y = y_b + \frac{\tau_1(\sin \varphi_2 + \sin \theta_2)\alpha - \tau_2(\sin \varphi_1 + \sin \theta_1)\beta}{\gamma} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\alpha = \sin(\varphi_1 - \theta_1)$; $\beta = \sin(\varphi_2 - \theta_2)$; $\gamma = \sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \varphi_2) + \sin(\varphi_1 - \theta_2) + \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$.在有测量误差存在时,如果能同时分离出多条散射路径 $S = \{(\tau_i, \theta_i, \varphi_i), i = 1 \sim N\}$, 定位方程组可以写成矩阵形式

$$\mathbf{R}(S) = \mathbf{G}(S) \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_b) + \mathbf{E}(S) \quad (3)$$

$$\text{其中: } \mathbf{R}(S) = \begin{bmatrix} \tau_1 \sin(\varphi_1 - \theta_1) \\ \vdots \\ \tau_N \sin(\varphi_N - \theta_N) \end{bmatrix};$$

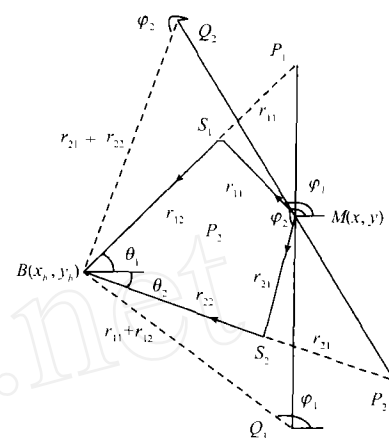


图2 单次散射双向移动信道模型

$$G(S) = \begin{bmatrix} \sin\varphi_1 + \sin\theta_1 & -\cos\varphi_1 - \cos\theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin\varphi_N + \sin\theta_N & -\cos\varphi_N - \cos\theta_N \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; X_b = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix}; E(S) = \begin{bmatrix} e_1(s_1) \\ \vdots \\ e_N(s_N) \end{bmatrix}.$$

则移动台坐标的加权最小二乘(Weighted Least Square)估计及其协方差分别为

$$\hat{X}_{WLS} = X_b + [G^T(S)N_E^{-1}G(S)]^{-1}G^T(S)N_E^{-1} \cdot R(S) \quad (4)$$

$$P_{WLS} = [G^T(S)N_E^{-1}G(S)]^{-1} \quad (5)$$

这里, N_E 是误差项 $E(S)$ 的协方差矩阵。

TDD 定位的本质在于引入 DOD 观测量后,在定位参数和 NLOS 散射路径之间建立起明确的几何关系,将 NLOS 定位问题化为一个可解的问题,其定位误差主要取决于定位参数测量误差,这为实现高精度移动定位提供了可能。相反,对现有 NLOS 定位算法而言,由于缺乏足够的 NLOS 观测信息,定位参数包含的几何关系和移动台之间不存在一一对应关系, NLOS 定位属于欠定问题,这时虽然可以采用统计处理方法得到唯一的定位解,但不能保证定位精度。

4 误差分析

仍然以双散射路径为例,分析 NLOS 条件下 TDD 定位算法的定位性能。在存在测量误差时,由于移动台坐标是定位参数集合 S 的高度非线性函数,很难直接从式(2)求出移动台定位误差的分布特性;不过,如果测量误差很小,以致对 $G(S)$ 的扰动可以忽略,也可以直接从定位方程(3)通过 $R(S)$ 来分析移动台定位误差的分布特性。

对 $R(S)$ 中各元素分别求偏导

$$\Delta R = F \cdot \Delta S \quad (6)$$

$$\text{其中: } \Delta R = \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{21} & f_{22} & f_{23} \end{bmatrix};$$

$$\Delta S = [\Delta\tau_1 \quad \Delta\theta_1 \quad \Delta\varphi_1 \quad \Delta\tau_2 \quad \Delta\theta_2 \quad \Delta\varphi_2]^T.$$

这里,

$$\begin{cases} f_{11} = \frac{\partial R_1}{\partial \tau_1} = \sin(\varphi_i - \theta_i) \\ f_{12} = \frac{\partial R_1}{\partial \theta_i} = -\tau_i \cos(\varphi_i - \theta_i) \quad i=1,2 \\ f_{13} = \frac{\partial R_1}{\partial \varphi_i} = \tau_i \cos(\varphi_i - \theta_i) \end{cases}$$

只考虑测量误差对 $R(S)$ 的影响,而忽略对 $G(S)$ 的扰动,所以 $E(S)$ 完全由 $R(S)$ 的误差决定。为便于计算,假设 S 中各元素测量误差都服从独立零均值的高斯分布,方差分别为 σ_τ^2 、 σ_θ^2 和 σ_φ^2 。则 $E(S)$ 的协方差矩阵为

$$N_E = E\{E(S)E^T(S)\} = E\{\Delta R \Delta R^T\} = F \cdot E\{\Delta S \Delta S^T\} \cdot F^T = \text{Diag}(\sigma_{e1}^2, \sigma_{e2}^2) \quad (7)$$

其中: $\sigma_{e1}^2 = c^2 \sigma_\tau^2 f_{11}^2 + \sigma_\theta^2 f_{12}^2 + \sigma_\varphi^2 f_{13}^2$; $\sigma_{e2}^2 = c^2 \sigma_\tau^2 f_{21}^2 + \sigma_\theta^2 f_{22}^2 + \sigma_\varphi^2 f_{23}^2$ 。

由式(5)计算移动台定位误差的协方差矩阵

$$P_{WLS} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^2 g_{i1}^2 \sigma_{e_i}^{-2} & \sum_{i=1}^2 g_{i1} g_{i2} \sigma_{e_i}^{-2} \\ \sum_{i=1}^2 g_{i1} g_{i2} \sigma_{e_i}^{-2} & \sum_{i=1}^2 g_{i2}^2 \sigma_{e_i}^{-2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

不妨设定位估计是无偏的,则等效的距离估计误差的均方差为

$$\text{RMSE} = \frac{\sqrt{(1 + \cos(\varphi_1 - \theta_1))\sigma_{e_1}^2 + (1 + \cos(\varphi_2 - \theta_2))\sigma_{e_2}^2}}{|\gamma|} \quad (9)$$

从式(7)、(9)可以看出,TDD 定位误差主要取决于定位参数测量误差,测量误差越大,TDD 定位误差也越大;其次,移动台到基站的距离对定位精度也有影响,移动台距离基站越远,定位误差越大,误差增长的快慢由各散射路径几何位置关系和移动台到基站的距离共同决定。

另外,和所有其它的几何定位方法一样,TDD 定位方法也存在定位模糊区。当各散射路径比较接近或者偏离 LOS 很小时,式(9)右边分母部分接近零,对应式(3)中的系数矩阵 $G(S)$ 接近奇异,此时微小的测量误差可能导致较大的定位误差。为了消除定位模糊,可以选取非模糊区观测值进行定位或者采用数据处理的方法解模糊。比如在散射路径较多时,可以只选取差异较大的路径进行定位;如果只有少数几条散射路径,也可以采用正则化等技术来改善系数矩阵 $G(S)$ 的性态,提高 TDD 定位的鲁棒性。当然,如果散射半径很小以致可以忽略,也可以直接采用 LOS 定位方法。

总之,TDD 定位算法能解 NLOS,在各散射路径差异较大和偏离 LOS 较远时,其定位误差分布主要取决于定位参数测量误差和移动台到基站的距离。

5 仿真结果

假设基站位于原点,移动台位于(1500 米,1500 米),只考虑移动台局部散射。在不同采样时刻,采用单次散射几何统计信道模型产生三条散射路径,计算对应的 TOA、DOA 和 DOD 参数值,分别进行 TDD 定位和 TD 定位,比较两者性能。在进行 TDD 定位时,引入判决机制,剔除比较接近或者偏离 LOS 很小的散射路径。实验中分别仿真了散射区域大小、距离测量误差以及移动台到基站的距离对定位精度的影响。每种观测条件下的各进行 5000 次 Monte Carlo 实验。仿真时采用散射半径作为 NLOS 引起的参数偏差的一种量度。

图 3 显示,当散射半径很小时,各散射路径接近 LOS,TD 定位性能优于 TDD 定位;随着散射半径的增大,TD 定位误差呈发散趋势,而 TDD 定位则比较稳定。这说明了,在 NLOS 条件下,TDD 定位方法比较稳健,可以实现高精度定位。图 4 是在散射半径为 400 米时得到的实验结果,从中可以看出,TDD 定位误差随距离参数测量误差的增大而增大,而 TD 的定位误差和参数测量误差关系不大;同样地,在存在 TOA 或 DOD 测量误差的情况下,TDD 定位误差也具有类似的变化规律。图 5 实验中移动台散射半径仍为 400 米,移动台坐标在(1000 米,1000 米)到(2000 米,2000 米)之间变化,等效于改变移动台到基站的距离。和参数测量误差相比,移动台到基站的距离对 TDD 定位误差影响相对较小。所以,从改善 TDD 定位误差的角度来看,应该尽量提高定位参数测量精度。

另外,为了更好的比较 NLOS 条件下两种定位算法的可定位性和定位精度,图 6、图 7 还给出了两种算法的定位误差累计概率函数(CDF)曲线。从图 6 可以看出,在散射半径很小时,各散射路径接近 LOS,TD 定位优于 TDD 定位;随着散射半径的增大,TDD 定位算法的可定位性迅速提高,而 TD 定位算法的定位能力则迅速下降;当散射半径约为 40 米时,TDD 定位误差的 CDF(RMSE < 125)超过 90%,而 TD 定位误差的 CDF

(RMSE < 125)已不足 10%。总的来看,散射半径比较大时,TDD 定位算法能够提供高精度稳健的定位估计。图 7 给出了散射半径为 400 米时两种定位算法的定位误差的 CDF 分布曲线。对 TDD 定位而言,125 米的定位误差均方差对应的可定位概率为 90%,如果以 67% 的概率来衡量,对应的定位误差均方差为 63 米,完全满足 E-911 计划要求;而由 TD 定位算法得到的相应结果分别为 21% 和 271 米。

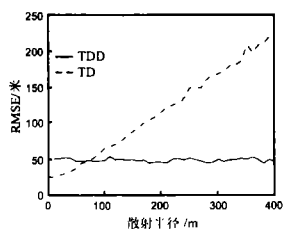


图 3 散射半径的影响

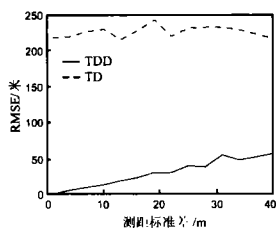


图 4 测距标准差的影响

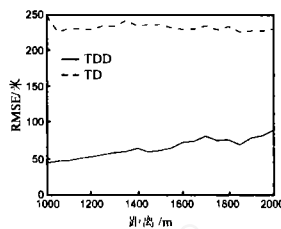


图 5 移动台到基站距离的影响

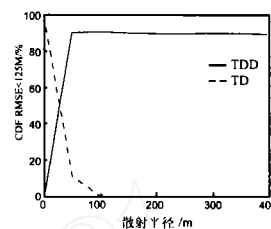


图 6 CDF 随散射半径的变化曲线

6 结论

本文基于单次散射双向移动信道模型及其信道参数联合估计,利用单基站测得的多条散射路径 TOA、DOA 和 DOD 进行定位,提出了一种 NLOS 条件下的 TDD 高精度移动定位算法。由于引入了离波观测测量,算法本身能够重建各条单次散射路径,从而将 NLOS 定位问题转化为可解的问题。分析表明该算法的定位误差对 NLOS 引起的参数偏差并不敏感,在各散射路径不太接近和偏离 LOS 路径较大时,定位误差仅决定于定位参数测量误差和移动台到基站的距离,仿真结果验证了这些结论。

参考文献:

- [1] State of New Jersey. Report on the new jersey wireless enhanced 911 system trial: The first 100 days [R]. June 1997.
- [2] Federal Communication Commission (FCC). Revision of the Commission Rules to Ensure Compatibility with Enhanced 911 Emergency Calling Systems [S]. FCC Docket 94 - 102.
- [3] Rappaport T S, et al. Position location using wireless communication on highways of the future [J]. IEEE Communications Magazine, 1996, 10: 33 - 41.
- [4] Reed J H, et al. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service [J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 4: 30 - 34.
- [5] Caffery J J, et al. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems [J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 4: 38 - 45.
- [6] Silventoinen M I, et al. Mobile station location in GSM [A]. IEEE Wireless Communication System Symposium [C]. NY: Long Island, 1995. 53 - 59.
- [7] Silventoinen M I, et al. Mobile station emergency locating in GSM [A]. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications [C]. India: 1996. 232 - 238.
- [8] Caffery J J, et al. Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems

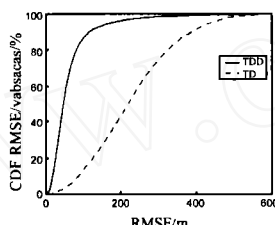


图 7 定位误差均方差的 CDF 曲线

[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

- [9] Wylie M P, et al. The non-line of sight problem in mobile location estimation [A]. IEEE International Conference on Universal Personal Communications [C]. 1996, 2: 827 - 831.
- [10] Steinbauer M, et al. Array measurement of the double-directional mobile radio channel [A]. VTC 2000 [C]. Tokyo: 2000. 1656 - 1662.
- [11] Zwick T, et al. Results of double directional channel sounding measurements [A]. VTC2000 [C]. Tokyo: 2000. 2497 - 2501.
- [12] Demmerle F, et al. A biconical multibeam antenna for space-division multiple access [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 782 - 787.
- [13] Richter A, et al. Joint estimation of DOD, time-delay, and DOA for high-resolution channel sounding [A]. VTC 2000 [C]. Tokyo: 2000. 1045 - 1049.
- [14] Petrus P, et al. Geometrically based statistical channel model for macro-cellular mobile environments [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C]. U K: London, 1996. 1197 - 1201.

作者简介:



刘申建 男, 1974 年 11 月出生于湖北, 清华大学电子工程系在读博士生, 主要从事移动散射信道参数估计、分布式信源波达方向估计、蜂窝移动定位研究。



万 群 男, 1971 年出生于江西, 清华大学电子工程系博士后, 从事现代信号处理、几何定位、超分辨率阵列信号参数(如频率、时延、波达方向)估计及其逆问题等方面的研究。

彭应宁 男, 1939 年出生于四川, 清华大学电子工程系教授、博士生导师, 长期从事阵列信号处理、空间谱估计、多径效应建模、空时自适应处理及数据融合等研究和教学工作。