

一种天线阵列定位法及其仿真研究

邓平* 朱中梁**

* (西南交通大学移动通信研究所 成都 610031)

** (西南电子电信技术研究所 成都 610041)

摘要: 为了克服 CDMA 移动台(MS)定位估计中面临的远近效应问题, 该文提出了一种在服务基站(BS)附近布置一种天线阵列, 采用 TSOA/AOA 混合定位技术对 MS 进行定位估计的方法, 分析了采用不同定位法的 GDOP 分布, 并给出了相应的 TSOA/AOA 混合定位算法。不同条件下的仿真结果表明, 只要 AOA 测量值达到一定精度, 采用这种方法就能对 MS 进行准确定位。

关键词: 天线阵列, 到达时间和, 到达时间差, 到达角, 几何精度衰减因子

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)06-0841-04

An Antenna Array Location Method and Its Simulation Study

Deng Ping* Zhu Zhong-liang**

* (Institute of Mobile Communication, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

** (Institute of Southwest Electron. & Telecom. Techniques, Chengdu 610041, China)

Abstract In order to overcome the near-far problem encountered in CDMA mobile location estimation, in this paper a mobile location method to utilize an antenna array and TSOA/AOA hybrid location technique is proposed, the GDOP distribution of different location methods are analyzed and TSOA/AOA hybrid location algorithm are provided. Simulation results under different condition show that as far as AOA measurements is relatively accurate, mobile can be exactly located by this method.

Key words Antenna array, Time Sum Of Arrive (TSOA), Time Difference Of Arrive (TDOA), Angle Of Arrive (AOA), Geometric Dilution Of Precision (GDOP).

1 引言

在蜂窝网络可以采用的无线定位技术中, 电波传播到达时间差(TDOA)定位法由于易于检测且能达到较高的定位精度而受到广泛关注和深入研究^[1]。在 CDMA 蜂窝网络中, 基于增大系统容量, 减小各种干扰等多方面的考虑, 反向链路功率控制得到采用, 使移动台的发射功率受到限制。此外, 在都市环境中, 受多径、非视距(NLOS)传播、多址干扰的影响, 电波的衰落很大, 造成了显著的远近效应^[2], 使得利用 CDMA 蜂窝网络对移动台(MS)进行定位估计时, 有时很难在 3 个以上基站(BS)同时检测到 MS 发射的信号, MS 也难以准确检测到 3 个以上 BS 的导频信号, 因而不能采用 TDOA 技术对移动台进行有效定位。

为了克服上述困难, 在 3GPP 和 3GPP2 中提出了 IPDL, TA-IPDL 等处理方法^[1], 还出现了 Power up 方法, 但这些方法对蜂窝系统容量、复杂性都有一定影响。为此本文提出一种在服务 BS 附近用较短基线布置一个天线阵列, 采用多路接收机对多个天线接收信号的电波特征值进行测量, 用于

对 MS 进行定位估计的方法, 如图 1 所示, 其中 120°张开的 3 组天线两两监控一个蜂窝扇区。由于阵列中各天线距离较近, 只要 MS 能和与服务 BS 正常通信, 所有天线都能有效地检测到目标 MS 的信号, 从而克服远近效应的不利影响。

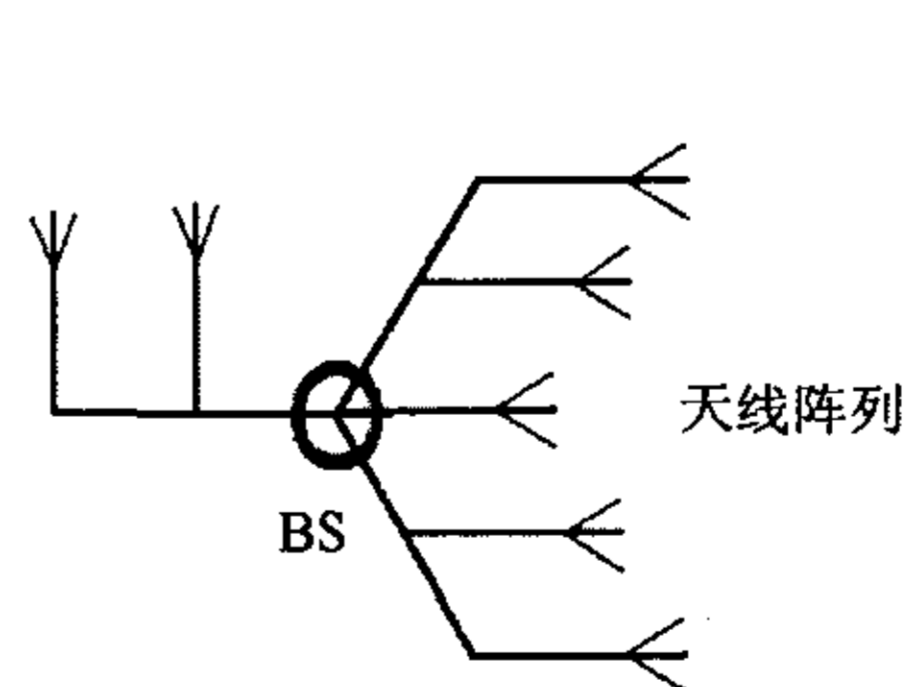


图 1 用于定位的天线阵列

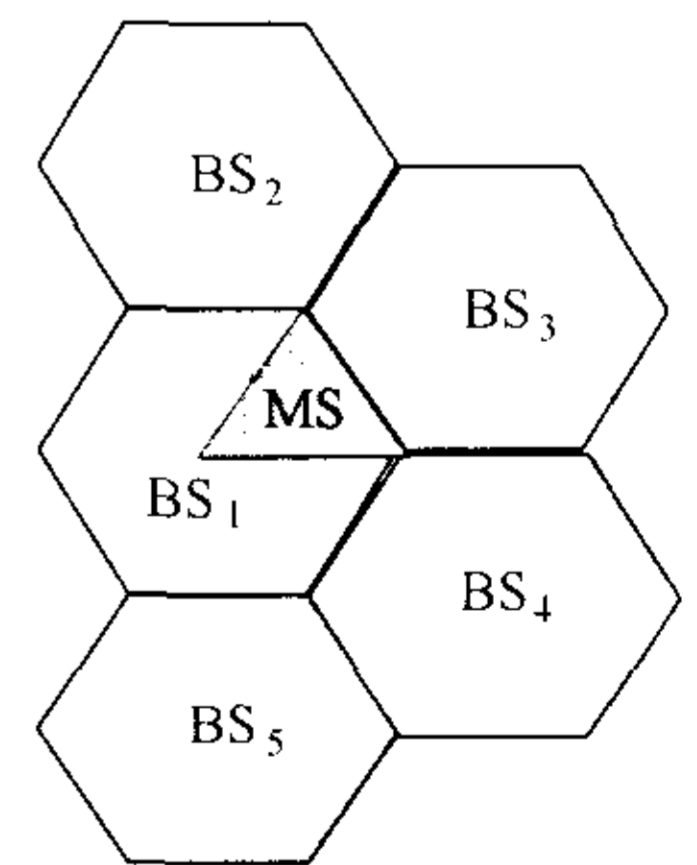


图 2 参与 MS 定位的 5 个 BS

2 定位技术的选择

在蜂窝网络可以采用的基于电波传播时间的定位技术中, 电波到达时间(TOA)和时间差(TDOA)技术已受到广泛研究, 但针对电波到达时间和(TSOA)定位技术的研究还比较少。为了选择适合于以上天线阵列定位的定位技术, 需要对

不同定位技术的几何精度衰减因子(GDOP)进行分析。设 (x,y) 为 MS 的待定位, (X_i,Y_i) 为第 i 根天线的已知位置, 对于 TDOA 测量值, 可以建立以下方程组:

$$R_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}, \quad i=2,3,\dots,N \quad (1)$$

由临近 BS 和服务 BS 检测的 TOA 相加, 得到的 TSOA 为

$$R_{i,1} = R_i + R_1 = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}, \quad i=2,3,\dots,N \quad (2)$$

假定在视距(LOS)传播环境中, 各 TOA 测量值误差服从相同的零均值高斯分布, 由于 TDOA 和 TSOA 依赖于两个相同的 TOA 测量值, 因此这两种测量值误差也服从零均值高斯分布, 且具有相同的协方差矩阵, 这时对移动台位置的估计能得到无偏估计, 其 GDOP 可表示为^[3]

$$GDOP = \sqrt{\text{Tr}[(H^T Q^{-1} H)^{-1}]} \quad (3)$$

其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, H 为 Jacobian 矩阵。对于 TDOA 和 TSOA 技术来说, H 分别为

$$H_{\text{TDOA}} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{R_2} - \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_2}{R_2} - \frac{y-y_1}{R_1} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_N}{R_N} - \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_N}{R_N} - \frac{y-y_1}{R_1} & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H_{\text{TSOA}} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{R_2} + \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_2}{R_2} + \frac{y-y_1}{R_1} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_N}{R_N} + \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_N}{R_N} + \frac{y-y_1}{R_1} & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

由于阵列中各天线距离较近, 应考虑各测量值之间存在的相关性, 两种测量值误差的协方差矩阵 Q 可定义为^[3]

$$Q = \sigma_R^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & 2 & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 σ_R^2 为 TOA 测量值误差方差。在图 1 中, 假定基线长度为 25m, 利用右测两组天线及中心天线共 5 根天线, 分别采用 TDOA 和 TSOA 对 MS 进行定位估计, 其 GDOP 等高线如图 3(a), 3(b)所示。从图中可见, 采用 TSOA 的 GDOP 时要远小于采用 TDOA, 表明对于这种天线阵列定位法, 更适合采用 TSOA 技术, 但是与文献[3]天线(接收机)位于 MS 周围的几何布局, 采用 TDOA 技术相比, 其 GDOP 还是要大, 且 MS 距离越远越大, 表明这种定位方法在 GDOP 上存在弱点, 只靠 TSOA 测量值难以对远距离 MS 进行准确的定位估计。

由于准确的电波到达角(AOA)测量值对提高定位精度有较大帮助^[1], 为此考虑采用 TSOA 和 AOA 相结合的混合定位技术, 不考虑 AOA 和 TSOA 之间的相关性, 其 H 和 Q 矩阵分别为:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{R_2} + \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_2}{R_2} + \frac{y-y_1}{R_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_N}{R_N} + \frac{x-x_1}{R_1} & \frac{y-y_N}{R_N} + \frac{y-y_1}{R_1} \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$Q = \sigma_R^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 2 & & \vdots & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 1 & \dots & & 2 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & R_1^2 \sigma_\alpha^2 / \sigma_R^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

假定 TOA 和 AOA 测量值误差标准差 σ_R, σ_α 分别为 30m 和 2° , 对应的 GDOP 等高线如图 3(c)所示。与图 3(a), 3(b)比较可见, 增加了较准确的 AOA 可以显著降低 GDOP, 因此天线阵列定位法应采用 TSOA/AOA 混合定位技术。

3 定位算法

对于 TSOA 定位方程组, 文献[4]中提到可以采用非线性方程组的数值求解法、间接法、伪逆法等方法进行求解, 但

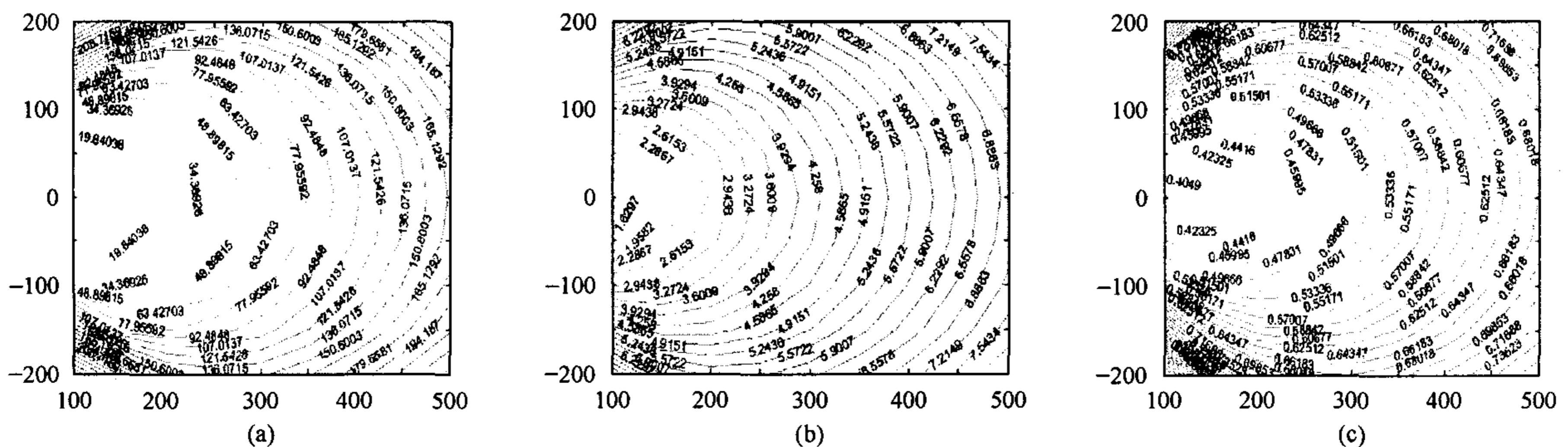


图 3 不同定位法的 GDOP 比较

还没有见到恰当的 TSOA/AOA 混合定位算法。下面采用与文献[5]类似的方法,将 Chan 提出的两步 WLS 算法^[6]推广,推导出相应的 TSOA/AOA 混合定位算法。

不失一般性,假定图 1 中共有 M 根天线,所有 TSOA 都参照于中心天线,下面各式中 $i=2,3,\dots,M$ 。设 (x,y) 为 MS 的待定位位置, (X_i,Y_i) 为第 i 根天线的已知位置,中心天线坐标为 $(0,0)$,则 MS 和第 i 根天线和中心天线之间的 TSOA 如式(2)所示。假定服务 BS 总能提供 MS 的 AOA 测量值,根据 AOA 测量值 α 可建立方程:

$$x \sin \alpha = y \cos \alpha \quad (7)$$

设 $K_i = x_i^2 + y_i^2$, $x_{i,1} = x_i - x_1$, $y_{i,1} = y_i - y_1$, 令 $\mathbf{z}_a = [\mathbf{z}_p^T, R_1^T]^T$ 为未知矢量,其中 $\mathbf{z}_p = [x, y]^T$, 按文献[5]的方法,可将式(2),式(7)组成的联立方程组转化为误差方程组:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0 \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ \vdots \\ R_{M,1}^2 - K_M + K_1 \\ x_1 \tan \alpha - y_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & -R_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{M,1} & Y_{M,1} & -R_{M,1} \\ -0.5 \tan \alpha & 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

\mathbf{z}_a^0 为 MS 实际位置,按文献[6]的处理方法,噪声的误差矢量:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{c} \mathbf{B} \mathbf{n} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{B} = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, \dots, R_M^0\}$, 则

$$\boldsymbol{\Psi} = E[\boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\psi}^T] = \mathbf{c}^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B} \quad (10)$$

其中 \mathbf{Q} 为式(6)表示的协方差矩阵。假定 \mathbf{z}_a 的元素间相互独立,第 1 次 WLS 计算结果为

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_a &= \arg \min \{(\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)\} \\ &= (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{h} \end{aligned} \quad (11)$$

上式 \mathbf{B} 矩阵中含有 MS 与各天线之间的距离,可通过下式结果近似计算出

$$\mathbf{z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (12)$$

为进行第 2 次 WLS 计算,需首先计算 \mathbf{z}_a 的协方差矩阵,该矩阵可采用扰动方法计算^[6]:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{z}_a &= \mathbf{c} (\mathbf{G}_a^{0T} \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a^0)^{-1} \mathbf{G}_a^{0T} \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{n} \\ \text{cov}(\mathbf{z}_a) &= E[\Delta \mathbf{z}_a \Delta \mathbf{z}_a^T] = (\mathbf{G}_a^{0T} \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a^0)^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

由于 \mathbf{z}_a 中各元素可表示为

$$z_{a,1} = x^0 + e_1, \quad z_{a,2} = y^0 + e_2, \quad z_{a,3} = R_1^0 + e_3 \quad (14)$$

其中 e_1, e_2, e_3 为 \mathbf{z}_a 的误差。 \mathbf{z}_a 的前两个元素减去 X_1, Y_1 , 再

对各元素求平方可得另一方程组:

$$\boldsymbol{\psi}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}'_a \mathbf{z}'_a \quad (15)$$

$$\text{其中 } \mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - x_2)^2 \\ z_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}'_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}'_a = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix}.$$

这里 $\boldsymbol{\psi}'$ 定义为 \mathbf{z}_a 的误差矢量。 $\boldsymbol{\psi}'$ 的协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi}' &= E[\boldsymbol{\psi}' \boldsymbol{\psi}'^T] = 4 \mathbf{B}' \text{cov}(\mathbf{z}_a) \mathbf{B}' \\ \mathbf{B}' &= \text{diag}\{x^0 - X_1, y^0 - Y_1, R_1^0\} \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $\boldsymbol{\psi}$ 为高斯分布,因此 $\boldsymbol{\psi}'$ 也为高斯分布, \mathbf{z}'_a 的第 2 次 WLS 估计为

$$\mathbf{z}'_a = (\mathbf{G}'_a \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} \mathbf{G}'_a^T \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{h}' \quad (17)$$

最终 MS 定位计算结果为

$$\mathbf{z}_p = \sqrt{\mathbf{z}'_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \mathbf{z}_p = -\sqrt{\mathbf{z}'_a} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

以上 \mathbf{z}_p 的模糊性可由有关先验信息排除。

4 仿真与讨论

为了评估以上算法的定位性能,假定在图 2 所示的宏蜂窝网络环境中天线阵列设置在服务基站(BS₁),MS 在图中三角形区域内均匀分布,MS 与阵列中各天线及 BS₂ ~ BS₅ 之间电波均能 LOS 传播,各 TSOA 及 AOA 测量误差均服从零均值的高斯分布,以下分几种情况分别进行仿真。

(1) 假定小区半径为 2000m,天线阵列中基线长度为 10~50m,图 4(a)为利用天线阵列采用 TSOA 及 TSOA/AOA 定位法对 MS 的定位结果,其中 TSOA 误差标准差为 30m, AOA 误差标准差为 2°。从图中可见,两种定位法定位误差的均值及均方根误差(RMSE)均随基线长度的增加而减小,表明增加基线长度对提高定位性能有较大帮助,但 TSOA/AOA 的定位误差均值和 RMSE 均远小于 TSOA,表明增加较准确的 AOA 对提高定位精度有很大帮助。

(2) 假定 TSOA 误差标准差为 30m,小区半径为 1000~4000m,基线长度为 30m,图 4(b)为 TSOA 及 AOA 误差标准差分别为 2°和 6°时 TSOA/AOA 的定位性能。从图中可见,随着小区半径的增大,定位误差也相应增大;与图 4(a)相似,TSOA/AOA 的定位误差小于 TSOA;AOA 越精确,对定位性能的改进越明显。

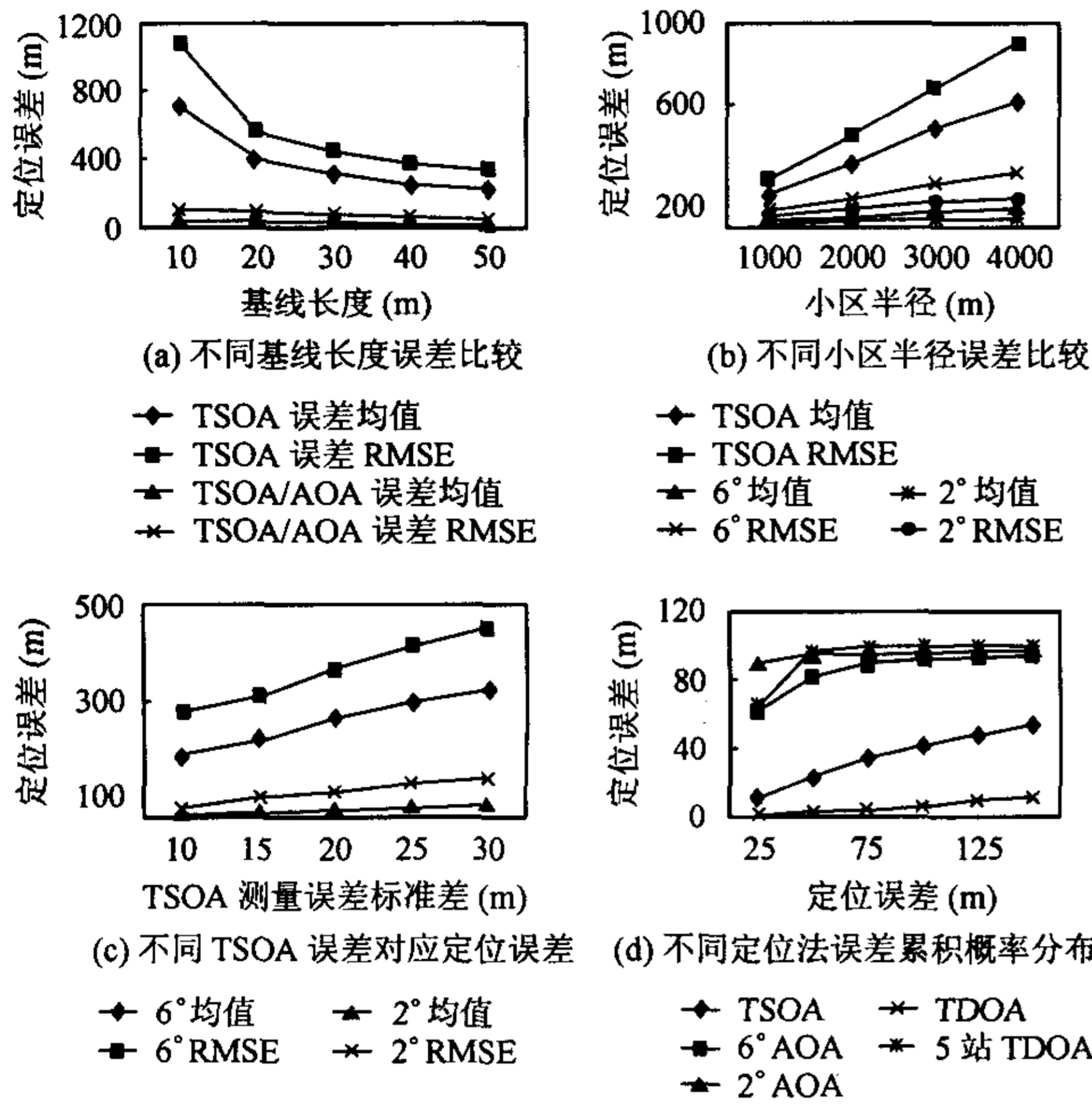


图4 不同环境条件下的仿真结果

(3) 假定小区半径为 2000m，天线阵列中基线长度为 30m，TSOA 测量误差标准差为 10~30m，图 4(C)为 AOA 误差标准差分别为 2°和 6°时 TSOA/AOA 定位法的定位性能。从图中可见，随着 TSOA 测量误差的增大，定位误差均值和 RMSE 也逐渐增大，但 AOA 标准差为 2°远优于 6°时的定位性能。

(4) 假定小区半径为 2000m，天线阵列中基线长度为 30m，TSOA 测量误差标准差为 30m，AOA 误差标准差分别为 2°和 6°，图 4(d)为在利用天线阵列，分别采用 TSOA，TSOA/AOA，TDOA 及图 2 中的 5 个 BS 和 TDOA 定位法对 MS 进行定位的累计误差概率分布(CDF)。从图中可见，AOA 误差标准差为 2°时 TSOA/AOA 定位法的性能最佳，甚至略优于图 2 采用 5 个 BS 及 TDOA 定位的方法；AOA 误差标准差为 6° 时定位性能有一定下降，但还是明显优于单独使用

TSOA，而在天线阵列中采用 TDOA 的定位性能最差。

5 结束语

在 CDMA 蜂窝网络中，如何克服远近效应，提供尽可能高的定位精度是推广定位业务面临的一个技术难题。为此，本文提出了在服务基站及其附近，利用一种天线阵列，采用 TSOA/AOA 混合定位技术对 MS 进行定位估计的方法，并给出了相应的定位算法。仿真结果表明只要 AOA 测量达到一定精度，在宏小区环境中采用该方法就能取得优于采用 TDOA，TSOA 等定位技术的性能。在具有非视距(NLOS)传播特性的都市环境中，该方法的性能还需进一步研究。

参考文献

- [1] 范平志, 邓平, 刘林. 蜂窝网无线定位. 北京: 电子工业出版社, 2002: 52 - 60.
- [2] Caffery J. Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems. Kluwer Academic Publishers, 1999: 5 - 10.
- [3] Levanon J. Lowest GDOP in 2-D scenarios. *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig*, 2000, 147(3): 7 - 9.
- [4] 孙仲康, 等. 单多基地有源无源定位技术. 北京: 国防工业出版社, 1996: 142 - 180.
- [5] 邓平, 等. 一种 TDOA/AOA 混合定位算法及其性能分析. *电波科学学报*, 2002, 17(6): 633 - 636.
- [6] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905 - 1915.

邓平: 男, 1964年生, 博士, 副教授, 研究方向为无线定位技术、统计信号处理、CDMA 移动通信。

朱中梁: 男, 1936年生, 中国科学院院士, 研究员, 主要研究兴趣与方向为无线通信系统、网络安全。