

两种非视线传播环境下的蜂窝系统定位算法

倪 巍,王宗欣

(复旦大学 通信科学与工程系,上海 200433)

摘 要: 提供移动用户准确的定位业务是未来无线通信发展的必然趋势.但是由于非视线(NLOS)传播的存在,无线定位始终是一个难点.本文先介绍视线(LOS)传播时的定位方法,然后提出 NLOS 消除算法和虚拟基站移动 NLOS 消除方法.通过仿真和比较,说明两种方法获得较好的效果.

关键词: 无线定位; 视线传播; 非视线传播; 最大似然估计; 信号到达时延

中图分类号: TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2003)10-1469-04

Two Novel Location Algorithms for Cellular Systems with Non-Line-of-Sight Propagation Considered

NI Wei, WANG Zong-xin

(Dept. of Communication Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Two novel location algorithms with Non-Line-of-Sight (NLOS) propagation considered are introduced. By inserting some loose variables to represent NLOS, an iterative method was introduced to mitigate the influences of NLOS propagation. The other one is, by moving the base stations virtually, to increase the distances between the base stations and the mobile to replace NLOS with Line-of-sight (LOS), then use the maximum-likelihood estimation and iterate until the solution converges. The simulations and comparisons show these two methods are more effective.

Key words: wireless location; line-of-sight propagation; non-light-of-sight propagation; maximum-likelihood estimation; TOA

1 引言

1996 年美国联邦通信委员会公布了 E-911 定位要求,其中要求为移动台提供精度在 125m 内的定位服务,并将定位服务作为今后无线通信网络必备的基本业务.

一般定位算法都是利用一系列分散分布的接收端分别通过接收源点的发射信号来估计信号到达时延(Time Of Arrival, TOA)或者信号到达时延差(Time Difference Of Arrival, TDOA),然后根据这些 TOA 或者 TDOA 再估计出源点的位置^[1-3],而没有考虑 NLOS 传播干扰的影响.文献[4]中提出的两步最大似然(ML)TDOA 估计的方法,在没有 NLOS 干扰的情况下,精度较高而且运算方便^[5],但是不适用于 NLOS 影响比较严重的情况.本文提出两种通过迭代消除 NLOS 干扰的算法,该两种方法运算量不大,而且当接收机的个数较少时,也能达到比较令人满意的估计效果.

本文首先介绍 LOS 的定位方法,然后分别推导消除 NLOS 算法和虚拟基站移动消除 NLOS 方法.通过实例和比较,说明本文提出的方法在估计精度上的提高.由于所需接收机端较少,该两种方法有较大的实用价值.

2 LOS 的定位算法

假设在两维平面上任意地分布着 M 个接收机,从源点 (x, y) 发射的信号到达第 i 个接收端的 TOA 为 d_i ,于是

$$r_i^2 - K_i = -2x_ix - 2y_iy + R, i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中: $K_i = x_i^2 + y_i^2$; $r_i = cd_i$; $R = x^2 + y^2$, c 是传播速度.则^[4]

$$Z_a = (G_a^T)^{-1} G_a^{-1} h \quad (2)$$

$$\text{协方差为: } \text{cov}(Z_a) = E[Z_a Z_a^T] = (G_a^T)^{-1} G_a^{-1} \quad (3)$$

$$\text{其中: } h = \begin{bmatrix} r_1^2 - K_1 \\ r_2^2 - K_2 \\ \dots \\ r_M^2 - K_M \end{bmatrix}; G_a = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -2x_M & -2y_M & 1 \end{bmatrix}; Z_a = \begin{bmatrix} x \\ y \\ R \end{bmatrix};$$

$$\Phi = 4c^2 \text{BQB}; Q = \text{diag}\{ \frac{1}{r_1^2}, \frac{1}{r_2^2}, \dots, \frac{1}{r_M^2} \}; B = \text{diag}\{ r_1, r_2, \dots, r_M \}.$$

对 Z_a 的元素进行相关化,得到^[4]

$$Z_p = (G_a^T B^{-1} \text{cov}(Z_a)^{-1} B^{-1} G_a)^{-1} G_a^T B^{-1} \text{cov}(Z_a)^{-1} B^{-1} h \quad (4)$$

$$\text{其中: } h = \begin{bmatrix} Z_a(1)^2 \\ Z_a(2)^2 \\ Z_a(3) \end{bmatrix}; G_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; Z_p = R^+ x^1; B = \text{diag}\{ Z_a \}$$

收稿日期:2002-05-13;修回日期:2002-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60172021)



(1), $Z_a(2)$, 0.5)。最后得到源点位置的估计值^[4]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sgn}(Z_a(1)) \cdot \sqrt{Z_p(1)} \\ \text{sgn}(Z_a(2)) \cdot \sqrt{Z_p(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 存在 NLOS 情况下的定位算法

实际情况中, NLOS 的存在使估计距离大于真实距离, 所以考虑引入松弛变量 v_i , 使

$$r_i^2 - K_i = -2x_i x - 2y_i y + R + v_i, \quad i=1, 2, \dots, M, \quad (6)$$

定义误差向量: $\mathbf{h} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a$ (7)

$\mathbf{h} = [r_1^2 - K_1 - v_1 \quad r_2^2 - K_2 - v_2 \quad \dots \quad r_M^2 - K_M - v_M]^T$. 但是, v_i 的存在使得 LOS 定位算法在 NLOS 存在的情况下不适用. 以下通过有限次迭代把 NLOS 的影响减弱, 来估计源点的位置.

在第一次估计时, 近似地把源点到基站的传播看作是 LOS 的, 即 $[v_1, v_2, \dots, v_M]^T = \mathbf{0}$,

$$\mathbf{Z}_a = (\mathbf{G}_a^T \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{h} \quad (8)$$

可以得到 $[x, y, R]^T$. 但由于 NLOS 的影响, $x^2 + y^2$ 和 R 之间存在明显的差异.

$$v_i = r_i^2 - [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2], \quad i=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

于是, 更新得到 $\tilde{r}_i = \sqrt{r_i^2 - v_i}$, $\tilde{\mathbf{B}} = \text{diag}\{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_M\}$, $4c^2 \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{Q}} \tilde{\mathbf{B}}$.

$$\tilde{\mathbf{Z}}_a = (\tilde{\mathbf{G}}_a^T \tilde{\mathbf{G}}_a)^{-1} \tilde{\mathbf{G}}_a^T \tilde{\mathbf{h}} \quad (10)$$

得到 $[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{R}]^T$, 并考虑相关性 (见式 (4)、(5)) 后, 再代入式 (9). 迭代终止的条件

$$\sum_{i=1}^M v_i^2 \quad (11)$$

其中, ϵ 是一个很小的正常数, 例如 $\epsilon = 10^{-2}$. 仿真表明 v_i 的收敛性非常好.

4 虚拟基站 MLOS 消除方法

存在 NLOS 时, $r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$, 变化 (x_i, y_i) 可使不等式近似相等. 假设基站背离移动台移动, 得到一组虚拟位置, 使测得的 TOA 是虚拟基站与移动台之间 LOS 传播的结果, 这样 NLOS 问题就转化为 LOS 问题. 这就是“虚拟基站 NLOS 消除”的基本思想. 其步骤如下:

首先假设 TOA 是 LOS 传播的测量值, 由已知基站位置 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, M$ 和式 (1) ~ (5), 得到移动台位置的初次估计值 (\bar{x}^1, \bar{y}^1) . 再根据该估计位置 (\bar{x}^1, \bar{y}^1) , 得到一组虚拟的基站位置 $(\hat{x}_i^1, \hat{y}_i^1)$, $i=1, 2, \dots, M$, 使之满足

$$r_i^2 = (\hat{x}_i^1 - \bar{x}^1)^2 + (\hat{y}_i^1 - \bar{y}^1)^2, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

显然, 若以 $(\hat{x}_i^1, \hat{y}_i^1)$, $i=1, 2, \dots, M$ 为基站位置, (\bar{x}^1, \bar{y}^1) 为移动台的位置, 则式 (12) 就是一个 LOS 问题了. 但是考虑到 (\bar{x}^1, \bar{y}^1) 的不精确性, 所以对虚拟基站位置进行修正, 即

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^1 = \begin{cases} \frac{\hat{x}_i^1 + \bar{x}^1}{2}, & |\bar{x}^1 - \hat{x}_i^1| > |\bar{x}^1 - x_i| \\ x_i, & |\bar{x}^1 - \hat{x}_i^1| \leq |\bar{x}^1 - x_i| \end{cases} \\ \tilde{y}_i^1 = \begin{cases} \frac{\hat{y}_i^1 + \bar{y}^1}{2}, & |\bar{y}^1 - \hat{y}_i^1| > |\bar{y}^1 - y_i| \\ y_i, & |\bar{y}^1 - \hat{y}_i^1| \leq |\bar{y}^1 - y_i| \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

显然, 虚拟的基站位置 $(\hat{x}_i^1, \hat{y}_i^1)$ 比 (x_i, y_i) 较远离了移动台的位置, 而 r_i 不变, 这可看作 NLOS 影响被减弱了. 然后, 以 $(\tilde{x}_i^1, \tilde{y}_i^1)$, $i=1, 2, \dots, M$ 为基站, 重新估计移动台的位置, 结果为 (\bar{x}^2, \bar{y}^2) . 因为 NLOS 的影响已经被消除了一部分, 所以估计的结果应该较 (\bar{x}^1, \bar{y}^1) 更为精确. 类似式 (12)、(13), 得到 $(\hat{x}_i^2, \hat{y}_i^2)$, $(\tilde{x}_i^2, \tilde{y}_i^2)$,

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^2 = \begin{cases} \frac{\hat{x}_i^2 + \bar{x}^2}{2}, & |\bar{x}^2 - \hat{x}_i^2| > |\bar{x}^2 - \tilde{x}_i^1| \\ \tilde{x}_i^1, & |\bar{x}^2 - \hat{x}_i^2| \leq |\bar{x}^2 - \tilde{x}_i^1| \end{cases} \\ \tilde{y}_i^2 = \begin{cases} \frac{\hat{y}_i^2 + \bar{y}^2}{2}, & |\bar{y}^2 - \hat{y}_i^2| > |\bar{y}^2 - \tilde{y}_i^1| \\ \tilde{y}_i^1, & |\bar{y}^2 - \hat{y}_i^2| \leq |\bar{y}^2 - \tilde{y}_i^1| \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

以此类推, 在已知 $(\tilde{x}_i^k, \tilde{y}_i^k)$ 的条件下, 可以得到 $(\bar{x}^{k+1}, \bar{y}^{k+1})$, $(\hat{x}_i^{k+1}, \hat{y}_i^{k+1})$, $(\tilde{x}_i^{k+1}, \tilde{y}_i^{k+1})$:

$$\mathbf{Z}_a^{k+1} = (\mathbf{G}_a^{k+1 T} \mathbf{G}_a^{k+1})^{-1} \mathbf{G}_a^{k+1 T} \mathbf{h}^k \quad (15)$$

$$\mathbf{Z}_p^{k+1} = (\mathbf{G}_a^{k+1 T} \mathbf{B}^{k+1} \mathbf{G}_a^{k+1})^{-1} \mathbf{G}_a^{k+1 T} \mathbf{B}^{k+1} \mathbf{h}^k \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}^{k+1} \\ \bar{y}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sgn}(Z_a^{k+1}(1)) \cdot \sqrt{Z_p^{k+1}(1)} \\ \text{sgn}(Z_a^{k+1}(2)) \cdot \sqrt{Z_p^{k+1}(2)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{其中: } \mathbf{h}^k = \begin{bmatrix} r_1^2 - K_1^k \\ r_2^2 - K_2^k \\ \dots \\ r_M^2 - K_M^k \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_a^k = \begin{bmatrix} -2\tilde{x}_1^k & -2\tilde{y}_1^k & 1 \\ -2\tilde{x}_2^k & -2\tilde{y}_2^k & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -2\tilde{x}_M^k & -2\tilde{y}_M^k & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h}^{k+1} = \begin{bmatrix} Z_a^{k+1}(1)^2 \\ Z_a^{k+1}(2)^2 \\ Z_a^{k+1}(3)^2 \end{bmatrix}; \quad K_i^k = \tilde{x}_i^k{}^2 + \tilde{y}_i^k{}^2.$$

$\mathbf{B}^{k+1} = \text{diag}\{Z_a^{k+1}(1), Z_a^{k+1}(2), 0.5\}$. 解 $r_i^2 = (\hat{x}_i^{k+1} - \bar{x}^{k+1})^2 + (\hat{y}_i^{k+1} - \bar{y}^{k+1})^2$, 可得到 $(\hat{x}_i^{k+1}, \hat{y}_i^{k+1})$. 修改后及虚拟基站位置:

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{\hat{x}_i^{k+1} + \bar{x}^{k+1}}{2}, & |\bar{x}^{k+1} - \hat{x}_i^{k+1}| > |\bar{x}^{k+1} - \tilde{x}_i^k| \\ \tilde{x}_i^k, & |\bar{x}^{k+1} - \hat{x}_i^{k+1}| \leq |\bar{x}^{k+1} - \tilde{x}_i^k| \end{cases} \\ \tilde{y}_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{\hat{y}_i^{k+1} + \bar{y}^{k+1}}{2}, & |\bar{y}^{k+1} - \hat{y}_i^{k+1}| > |\bar{y}^{k+1} - \tilde{y}_i^k| \\ \tilde{y}_i^k, & |\bar{y}^{k+1} - \hat{y}_i^{k+1}| \leq |\bar{y}^{k+1} - \tilde{y}_i^k| \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

这里, $i=1, 2, \dots, M$; $k=0, 1, \dots, K$; $(\tilde{x}_i^0, \tilde{y}_i^0)$ 即为 (x_i, y_i) .

以上的整个过程, 虚拟的基站位置一直在背离移动台的方向移动, 使得 NLOS 的影响随着迭代次数的增加而逐步减小. 迭代终止的条件为找到最小的自然数 K , 使之满足

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^{K+1} = \tilde{x}_i^K \\ \tilde{y}_i^{K+1} = \tilde{y}_i^K, \quad i=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (19)$$

这时, 可近似认为从移动台到各个虚拟基站的 TOA 为只存在 LOS 情况下的测得的结果.

$(\hat{x}_i^k, \hat{y}_i^k)$ 的选取方法不唯一, 可选择在 (\bar{x}^k, \bar{y}^k) 和 $(\tilde{x}_i^{k-1}, \tilde{y}_i^{k-1})$ 所确定的直线上; 也可在 x 轴或 y 轴上作一维的移动. 本文模拟选用后者, 不同的选取方式对结果的影响不大.

5 计算结果和比较

设接收机的位置 $(20, 20)$ 、 $(-20, 20)$ 、 $(0, 34.6)$ 和 $(0, 0)$; $r_i = r_i^0 + cn_i + N \cdot rand(\cdot)$, $rand(\cdot)$ 是 $[0, 1]$ 上的随机数, N 是最大非视线传播的误差值; cn_i 是均值为 0、方差为 σ_i^2 的高斯白噪声, 这里 $\sigma_i^2 = 0.001$. 10000 次独立估计, 得到坐标估计平均值和均方误差 $MSE = E[(x - x^0)^2 + (y - y^0)^2]$, 结果见表 1、2.

其中 NLOS 是文献[5]中提出的 NLOS 情况下的定位算法的计算结果; 而 NLOS-3 是本文 3 中提出的算法; NLOS-4 是本文 4 中提出的算法.

从表 1 中可以看出, 用 NLOS 消除的方法能较精确的估计出源点. 相比之下, 文献[5]的方法, 由于太依赖于 LOS 估计, 结果不够令人满意. 表 2 说明整体上来讲, NLOS-4 的效果要优于 NLOS-3.

表 1 源点为(5,15)时,平均估计坐标值(x, y)和 MSE 的比较

	LOS		NLOS ^[5]		NLOS-3	
	(x, y)	MSE	(x, y)	MSE	(x, y)	MSE
N = 0	(5.0000, 14.9999)	0.0005	(4.9790, 15.0007)	0.0013	(5.0002, 15.0001)	0.0006
N = 1	(5.2529, 15.2277)	0.2147	(5.1957, 15.2303)	0.1990	(5.0582, 14.9938)	0.1110
N = 2	(5.4959, 15.4538)	0.8704	(5.3916, 15.4557)	0.8110	(5.1091, 14.9871)	0.4580
N = 3	(5.7469, 15.6646)	1.9983	(5.5700, 15.6731)	1.8281	(5.1695, 14.9648)	1.0684
N = 4	(5.9834, 15.8826)	3.6680	(5.7372, 15.9040)	3.3146	(5.2183, 14.9522)	1.9628
N = 5	(6.2442, 16.0871)	5.8821	(5.9303, 16.1040)	5.3087	(5.3036, 14.9465)	3.1590

表 2 N = 3 时,各点平均估计坐标值(x, y)和 MSE 的比较

(x, y)		(0, 0)	(5, 0)	(0, 5)	(15, 0)
	LOS		(0.4622, 1.1631)	(5.3225, 1.5826)	(0.5798, 4.8065)
NLOS-3		(0.4733, 1.4764)	(4.9557, 1.2427)	(0.5014, 4.0672)	(15.8717, 1.1400)
NLOS-4		(0.2546, 0.1504)	(5.2940, 0.2289)	(0.2653, 4.5891)	(15.7434, 0.1820)
MSE	LOS	2.3485	4.0174	1.1588	4.5571
	NLOS-3	3.3425	2.6037	1.8679	3.0249
	NLOS-4	0.2269	0.4444	0.8786	0.9659
(x, y)		(0, 15)	(5, 5)	(5, 10)	(5, 15)
	LOS	(0.7231, 15.6490)	(5.5088, 4.7206)	(5.5732, 10.4031)	(5.7435, 15.6516)
NLOS-3		(0.6381, 14.9606)	(4.9947, 4.1335)	(5.0991, 9.5675)	(5.1686, 14.9568)
NLOS-4		(0.3306, 15.2739)	(5.2283, 4.5750)	(5.2817, 10.0106)	(5.3812, 15.2722)
MSE	LOS	1.5253	1.4531	1.4144	1.9795
	NLOS-3	0.9979	1.7647	1.2054	1.0537
	NLOS-4	0.7216	1.1878	0.9839	1.1805
(x, y)		(15, 5)	(15, 10)	(10, 10)	(10, 5)
	LOS	(16.2698, 5.1230)	(16.4427, 10.5416)	(11.0647, 10.4694)	(10.8135, 4.8318)
NLOS-3		(15.8583, 4.3327)	(15.7250, 9.6081)	(10.4098, 9.6019)	(10.3394, 4.2718)
NLOS-4		(15.8190, 4.7781)	(15.7679, 10.0692)	(10.5902, 10.0382)	(10.4985, 4.6577)
MSE	LOS	2.9031	3.2559	2.2277	1.8862
	NLOS-3	2.3758	1.9082	1.3565	1.7059
	NLOS-4	1.8528	1.5413	1.2372	1.3922

一般,两个相邻基站之间的距离约为 2km,所以本文仿真中的每个长度单位相应于实际空间中约 50m 的距离.在接收机 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, 4$ 所围成的区域中,任意取点 (x, y) 作为源点,当估计位置 (x_e, y_e) 和真实位置 (x, y) 之间距离满足 $\sqrt{(x - x_e)^2 + (y - y_e)^2} < 2$ 时,估计正确.于是可以得到 LOS、NLOS-3、NLOS-4 三种方法 MSE(见图 1) 和正确估计概率(见图 2).显然,在同样条件下 NLOS-4 的估计正确率最高、MSE 最小,NLOS-3 次之;不同程度的 NLOS 干扰下,NLOS-3、NLOS-4 的估计结果好于直接用 LOS 算法,尤其是 NLOS-4 的估计结果,明显好于 NLOS-3.

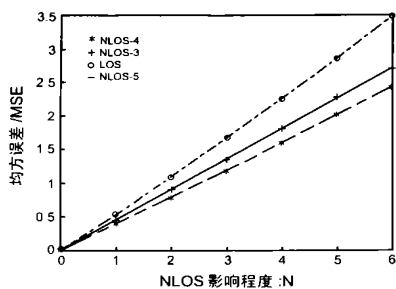


图 1 三种方法的 MSE 的比较

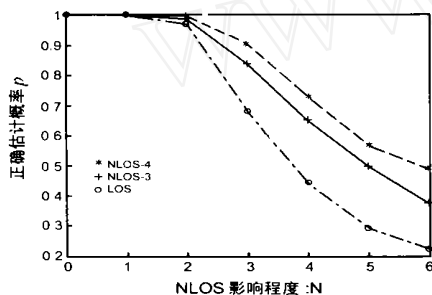


图 2 三种方法的正确估计概率的比较

6 结论

本文针对 NLOS 传播干扰,推导了两种循环算法.一种是反复迭代来消除 NLOS 的影响;另一种是通过增大假设的基站和移动台之间的距离,使得估计到的 TOA 可以近似的看作 LOS 传播下测得的结果,从而用 ML 算法来进行定位估计.

仿真表明,用本文提出的方法可以使蜂窝系统在有 NLOS 传播时进行定位估计,并有较高的正确率.

参考文献:

- [1] GOUD P, SESAY A, FATTOUCHE M. A spread spectrum radiolocation technique and its application to cellular radio[A]. Proc. IEEE Pacific Rim Conf. Commun., Comp. and Signal Processing[C]. Victoria, Canada, 1991. 661 - 664.
- [2] CAFFERY J, STUBER Jr G. Vehicle location and tracking for IVHS in CDMA microcells[A]. Proc. IEEE PIMRC[C]. Den Haag, Netherlands, 1994. 1227 - 1231.
- [3] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976, ASSP-24(8): 320 - 27.
- [4] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(8): 1905 - 1915.
- [5] 王昕、王宗欣、刘石. 一种考虑非视线传播影响的 TOA 定位算法. 通信学报[J], 2001(3): 1 - 8.

作者简介:



倪 巍 男,1977 年 10 月生于上海市,复旦大学博士研究生,主要研究方向为 CDMA 蜂窝系统设计规划、TOA 估计、无线定位和多用户检测.



王宗欣 男,1940 年 9 月生于上海市,复旦大学教授、博士生导师,主要从事微波通信、无线定位、智能天线和蜂窝系统的优化等方面的教学和科研工作.