

# 基于天线子阵的移动台定位方法及其性能分析\*

马金明, 吴伟陵

(北京邮电大学 信息工程学院, 北京 100876)

**摘要:**基于常用的散射环(ROS)、散射盘(DOS)和截短高斯分布(CGS)信道模型,对不同波束之间的NLOS附加误差的相关性进行了分析,并根据分析结果,提出了一种基于天线子阵的定位方法。仿真结果表明,与基于基站的定位方法相比,基于天线子阵的定位方法在抵抗NLOS附加误差的影响方面,具有明显的优势。

**关键词:**天线子阵;TDOA;NLOS

**中图分类号:**TN828.6;TN820.1+6 **文献标识码:**A

## 0 引言

随着移动通信服务的日益普及,人们对移动台(MS)定位技术表现出越来越高的兴趣。在已有的定位方法中,基于波束到达时间差(TDOA)的定位方法,由于能够很好地抵抗多径传播引起的误差<sup>[1]</sup>,并且,不要求MS与基站(BS)同步<sup>[2]</sup>,显示出较高的实用价值。尽管如此,传统的基于BS的TDOA定位方法,由于不能完全抵消多径传播带来的非视线传播(NLOS)误差,其定位精度仍然不能满足实际应用的要求。

本文基于MS定位技术研究中经常使用的3种信道模型:散射环(ROS)模型、散射盘(DOS)模型和截短高斯分布模型(CGS),定性地分析了不同波束的NLOS误差之间的相关性,并根据分析结果提出了一种基于天线子阵的TDOA定位方法。仿真结果表明,在相同的散射模型下,本文给出的方法比基于BS的方法的定位精度有较大幅度的提高。

## 1 散射模型

图1是文献[3]描述的散射模型示意图。图1中, $L_i$ 为BS<sub>i</sub>到MS的真实距离, $L_{Mi}$ 为BS<sub>i</sub>到MS的名义距离,即距离实测值,它受到测量误差和NLOS传播

条件的影响。 $R$ 为散射环(盘)的半径。当散射体等概率分布于圆周的边沿时,该模型为散射环(ROS)模型。其NLOS分布密度函数为

$$P_{\text{ros}}(\eta_i) = \frac{2(\eta_i + L_i - R)}{\pi \sqrt{4R^2 L_i^2 - (\eta_i^2 + 2\eta_i L_i - 2\eta_i R - 2RL)^2}}, \quad 0 \leq \eta_i \leq 2R_r \quad (1)$$

式(1)中, $R_r$ 为散射环半径, $\eta_i = L_{Mi} - L_i$ 为反应在BS<sub>i</sub>的NLOS附加误差。

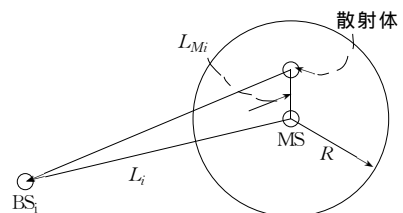


图1 散射模型示意图

Fig. 1 Scattering model

当散射体等概率分布于整个圆形区域上时,该模型为散射盘(DOS)模型。这时,NLOS附加误差的分布密度为<sup>[3]</sup>

$$P_{\text{dos}}(\eta_i) = \frac{N(\eta_i)}{D(\eta_i)} \quad (2)$$

式(2)中, $D(\eta_i) = 4\pi R_d^2 \eta_i^{3/2} (\eta_i + 2L_i)^{3/2}$ ,  
 $N(\eta_i) = -\eta_i(\eta_i + 2L_i)(L_i + \eta_i - 2R_d)$

\* 收稿日期:2003-05-22 修订日期:2003-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60172051)。

作者简介:马金明(1966-),男,山东博兴人,博士研究生,主要研究方向为移动台定位、智能天线和语音信号处理。

$$\frac{\sqrt{(2R_d - \eta_i)(\eta_i + 2L_i - 2R_d)} - 2[(2\eta_i + L_i)^4 - 3(\eta_i + L_i)^2 L_i^2 + L_i^4] \arctan(Q_i)}{(\eta_i + 2L_i) \tan\left[\frac{1}{2} \arccos \frac{\eta_i^2 + 2L_i^2 + 2\eta_i L_i - 2(\eta_i + L_i)R_d}{2L_i(\eta_i + L_i - R_d)}\right] \sqrt{\eta_i^2 + 2\eta_i L_i}},$$

$R_d$  为散射盘半径。

当散射体与 MS 的距离  $r$  服从截短的高斯分布, 即  $r$  的分布密度函数为

$$P_r(r) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g S} e^{r^2/2\sigma_g^2} & 0 \leq r \leq R_g \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

时, 散射模型为截短的高斯散射模型 (CGS)。式 (3)

中,  $S = \int_0^{R_g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} e^{-r^2/2\sigma_g^2} dr$ , 为归一化因子。 $\sigma_g$  为相应的高斯分布的均方根。这时, NLOS 附加误差的分布密度  $P_{\text{cgs}}(\eta_i)$  没有显式解, 只能用数值方法计算。

为了研究不同的 BS 对同一个 MS 进行距离测量时遇到的 NLOS 附加误差之间的关系, 如图 2 所示, 将 2 个测量天线 (子) 阵的几何中心关于 MS 的张角  $\alpha$  定义为测量角跨度。显然, 当  $\alpha = 180^\circ$  时, 2 个天线 (子) 阵 (阵列  $i$  和阵列  $j$ ) 测得的名义距离也是所包含的 NLOS 附加误差 (定义为  $N_{\text{nlos}i}$  和  $N_{\text{nlos}j}$ ) 的相关性最差。而当  $\alpha$  趋近于 0 时, 2 个天线 (子) 阵 (阵列  $i$  和阵列  $j$ ) 接收到的来自同一个 MS 的波束将变为同一个波束。此时, 阵列  $i$  和阵列  $j$  测得的名义距离就包含相同的 NLOS 附加误差 (定义为  $N_{\text{nlos}i}$  和  $N_{\text{nlos}j}$ ), 即  $N_{\text{nlos}i}$  和  $N_{\text{nlos}j}$  完全相等, 其相关系数

$$\frac{\text{cor}_{\text{nlos}}(i, j) = \frac{E\{(N_{\text{nlos}i} - E[N_{\text{nlos}i}]) \cdot (N_{\text{nlos}j} - E[N_{\text{nlos}j}])\}}{\sqrt{\text{var}(N_{\text{nlos}i}) \cdot \text{var}(N_{\text{nlos}j})}} \quad (4)$$

为 1, 达到最大值。这里,  $\text{var}(\cdot)$  为方差运算符,  $\text{var}(X) = EX^2 - (EX)^2$ 。

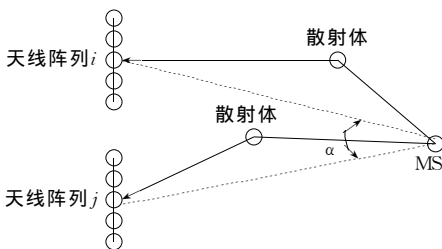


图2 测量跨度角示意图

Fig. 2 Angle span in NLOS measurement

上述分析说明, 当 2 个关于 MS 张角很小的 2 个

天线 (子) 阵利用 TDOA 方法对 MS 进行位置估计时, 可以很好地抵消 NLOS 附加误差的影响, 从而, 获得较高的定位精度。因此, 研究  $\text{cor}_{\text{nlos}}(i, j)$  随测量角跨度  $\alpha$  变化的规律对提高 TDOA 定位算法的精度具有重要的意义。

## 2 NLOS 附加误差的相关性研究

已有的测量结果表明, 通常先到的波束比迟到的波束具有更大的功率<sup>[4]</sup>。因此, 在实际的 TDOA 估计过程中, 可以只使用最先到达的波束。本文在用仿真方法进行  $\text{cor}_{\text{nlos}}(i, j)$  定量分析时, 采取以下 3 个方面的处理:

(i) 按照上述 3 种散射模型的约束条件, 随机地分布一定数量的散射体;

(ii) 选取与天线 (子) 阵几何中心和移动台构成最短折射路径的散射体, 计算当前的 NLOS 附加误差值  $N_{\text{nlos}i}(n)$  和  $N_{\text{nlos}j}(n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ;

(iii) 重复步骤 (i) 和 (ii), 并利用收集到的数据计算  $\text{cor}_{\text{nlos}}(i, j)$  的估计值

$$\text{cor}_{\text{nlos}}(i, j) \triangleq \frac{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (N_{\text{nlos}i} - \bar{\mu}_{\text{nlos}i})(N_{\text{nlos}j} - \bar{\mu}_{\text{nlos}j})}{\sqrt{\left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (N_{\text{nlos}i} - \bar{\mu}_{\text{nlos}i})^2\right] \left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (N_{\text{nlos}j} - \bar{\mu}_{\text{nlos}j})^2\right]}} \quad (5)$$

式 (5) 中,  $\bar{\mu}_{\text{nlos}h} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M N_{\text{nlos}h}$ ;  $h = i, j$ ;  $M$  为样本数。

图 3 为依次采用上述 3 种散射模型的仿真结果。从这里可以看出, 3 种散射模型在 NLOS 附加误差的相关性变化趋势上表现出很好的一致性。当测量角跨度  $\alpha \leq 20^\circ$  时, 2 个测量天线 (子) 阵引入 NLOS 附加误差具有很强的相关性 (相关系数大于 0.6)。随着  $\alpha$  的增大, 相关性逐渐减弱, 当  $\alpha = 40^\circ$  时, 相关性已经非常弱, 对于 ROS 模型和 DOS 模型, 相关系数均已小于 0.2, 当采用 CGS 模型时, 相关系数的变化受到参数设置的影响比较明显, 大约在 0.4 附近变化。当  $\alpha > 50^\circ$  时, 3 种模型的相关系数都迅速减小, 并在零点附近振荡, 其绝对值一般小于 0.2, 并且出现负相关的情况。

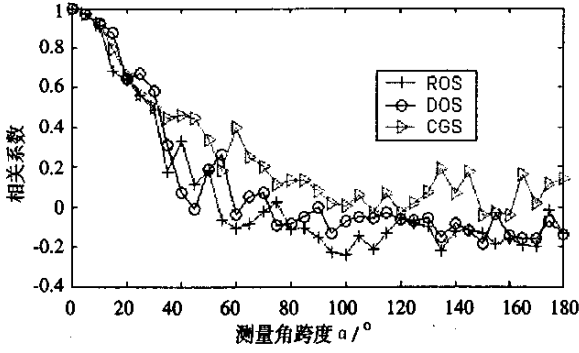


图3 NLOS附加误差相关性曲线

Fig. 3 Correlation curves of NLOS excessive errors

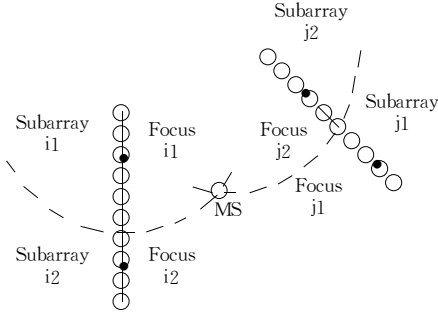


图4 基于天线子阵的定位方法

Fig. 4 Positioning method based on antenna subarrays

### 3 基于天线子阵的MS定位方法及性能分析

根据前文对NLOS附加误差的相关性分析,本文认为,可以将目前广泛采用的扇区天线分为2个(见图4)或者多个子阵,通过测量各个天线子阵关于MS的TDOA参数,来估计MS的位置坐标。由于天线子阵关于MS的张角远远小于2个基站关于MS的张角,因此,利用天线子阵测量TDOA参数可以更好地抵消NLOS附加误差,从而,获得较高的定位精度。

本文对于传统的基于基站的定位方案,采用文献[5]中的迭代法,以扇区的几何中心为起始点,分别利用上述3种散射模型进行仿真。取TDOA参数的协方差矩阵为单位阵。则第 $n$ 次迭代修正量为[5]

$$\Delta \mathbf{x}^n = (\mathbf{G}_n^T \mathbf{G}_n)^{-1} \mathbf{G}_n^T \mathbf{h}_n \quad (6)$$

式(6)中, $n$ 为迭代次数。

已有的测量结果表明,在实际系统中,通常只能有3个BS同时参与对MS的定位[6],因此,取BS数为3。这样,第 $n$ 次迭代的剩余误差矩阵和第 $n$ 次迭代的加权矩阵分别为

$$\mathbf{h}_n = \begin{bmatrix} r_{2,n} - (r_{2(n-1)} - r_{l(n-1)}) \\ r_{3,n} - (r_{3(n-1)} - r_{l(n-1)}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{G}_n = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中

$$a_{11} = \frac{(x_1 - x_{n-1})}{r_{1(n-1)}} - \frac{(x_2 - x_{n-1})}{r_{2(n-1)}}$$

$$a_{12} = \frac{(y_1 - y_{n-1})}{r_{1(n-1)}} - \frac{(y_2 - y_{n-1})}{r_{2(n-1)}}$$

$$a_{21} = \frac{(x_1 - x_{n-1})}{r_{1(n-1)}} - \frac{(x_3 - x_{n-1})}{r_{3(n-1)}}$$

$$a_{22} = \frac{(y_1 - y_{n-1})}{r_{1(n-1)}} - \frac{(y_3 - y_{n-1})}{r_{3(n-1)}}$$

在式(7)、式(8)中, $r_{i(n)}$  ( $i=1,2,3$ )是BS <sub>$i$</sub> 到MS的距离的第 $n$ 次迭代值, $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 分别为3个BS的坐标。这样,MS位置坐标的第 $n$ 次迭代值为

$$\mathbf{x}^n = \mathbf{x}^{n-1} + \mathbf{G}_n \mathbf{h}_n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

在具体的迭代过程中,首先,按照一定的规则确定一个MS位置的初始估计值 $\mathbf{x}^0$ ,然后,反复利用式(9)运算,就可以求得精度逐步提高的MS位置估计值。

由于该方法不能保证收敛[5],需要对仿真结果进行后处理。经过一定的迭代次数之后,计算MS位置估计值与各个BS的距离,若误差仍然较大(相对误差大于2%),即舍弃该结果。

在基于天线子阵的定位方案中,为了保持每一对天线子阵接收的波束在时延上有较强的相关性,TDOA参数只能在每一个基站的天线子阵上获得,因而不能使用上述迭代方法,只能采取对式(8)直接求解的方法。

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_{12})^2 + (y - y_{12})^2} - \sqrt{(x - x_{11})^2 + (y - y_{11})^2} = d_1 \\ \sqrt{(x - x_{22})^2 + (y - y_{22})^2} - \sqrt{(x - x_{21})^2 + (y - y_{21})^2} = d_2 \\ \sqrt{(x - x_{32})^2 + (y - y_{32})^2} - \sqrt{(x - x_{31})^2 + (y - y_{31})^2} = d_3 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, $(x_{11}, y_{11})$ 、 $(x_{12}, y_{12})$ 、 $(x_{21}, y_{21})$ 、 $(x_{22}, y_{22})$ 、 $(x_{31}, y_{31})$ 和 $(x_{32}, y_{32})$ 是天线子阵的几何中心的坐标, $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 是相应的TDOA参数。

2种方法的仿真,采用相同的散射模型,取小区半径为1 000 m,对于ROS模型和DOS模型取散射区域半径为400 m,对于CGS模型,则取 $\sigma_g = 400$  m。

重复试验 200 次得到的结果见表 1。

表 1 2 种 MS 定位方法的性能比较				
Tab.1 Performance comparison between the two MS positioning approaches				
散射模型	基于基站的方法		基于天线子阵的方法	
	均方误差	平均误差	均方误差	平均误差
ROS	697.63	698.99	28.43	21.57
DOS	13.50	13.19	4.07	2.45
CGS	10.85	10.54	4.17	2.64

可见,在任意一种散射模型下,基于天线子阵方法的定位精度都高于基于基站的定位方法。从 3 种散射模型比较来看,ROS 模型下的定位精度普遍较差,这是由于散射点集中在一个圆周上,引起的 NLOS 附加误差比其他 2 种模型大造成的。

从算法效率来看,本文提出的基于天线子阵的定位方法由于不能像通常的双曲线(面)定位方法那样对 TDOA 参数的来源进行自由选择<sup>[6]</sup>,所以,无法使用文献<sup>[5]</sup>提出的迭代方法,只能直接对二次方程进行求解,运算量较大。如何进一步降低运算量,提高算法效率,是基于天线子阵的定位方法需要解决的问题。

参考文献:

[1] CAFFERY J J. Wireless location in CDMA cellular radio sytem[M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.

[2] LIBERTI Joseph C, RAPPAPORT Jr Theodore S. Smart antennas for wireless communications [M]. Prentice Hall PTR,

1999.

[3] CAFFERY J J. YOU H R. A scattering model based approach to NLOS mitigation in TOA location systems[C]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2002, 861-865.

[4] KIM Jangsub, CHUNG Woogon. A spatio-temporal channel model for position location techniques via AOA and TDOA [C]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2001, 233-237.

[5] CHA Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Proccessing, 1994, 42 (8):1905-1915.

[6] SMITH J, ABEL J. The spherical interpolation method of source location [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, OE-12(1):246-252.

[7] SILVENTOINEN M, RANTALAINEN T. Mobile station emergency location in GSM [C]. IEEE Jnt. Conference on Personal Wireless Communications, 1996, 232-238.

[8] 宋宇恒, 林金朝, 谢显中. TD-SCDMA 交流定位算法研究与仿真 [J]. 重庆邮电学院学报 (自然科学版), 2003, 15(1):1-4.

(编辑:何先刚)

Subarray-based MS location approach and its performance analysis

MA Jin-ming, WU Wei-ling

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, P. R. China)

**Abstract:**On the basis of such popular scattering models as ROS, DOS and CGS models, the correlation between the NLOS excessive errors of different beams from a mobile station is investigated. A novel approach is proposed, which is based on antenna subarrays. The simulation result justifies its superiority to the conventional approaches in resistance to NLOS errors, which are based on BSs.

**Key words:**antenna subarrays; TDOA; NLOS

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>