

非视距环境下单站定位的伪目标动态可行域约束法

范丹丹, 张立志, 黄开枝, 金 梁

(解放军信息工程大学, 河南郑州 450002)

摘 要: 针对非视距环境下多站定位方法需要资源量大、成本高且定位精度受非视距传播影响大等问题, 本文提出了单站定位的伪目标动态可行域约束法. 该方法将目标周围的散射体看作伪目标, 利用单个机动观测站测量伪目标信号的来波方向角和方向角变化率, 得到较精确的伪目标坐标后, 根据伪目标与真实目标间的位置关系构造可行域, 在可行域内进行最优化求解, 消除非视距引起的误差, 得到真实目标位置的估计值. 伪目标动态可行域约束法把通常认为是不利的多径信号转化为有利因素. 仿真实验证明: 该方法在对目标连续数次采样测量后, 即可以快速有效地抑制定位误差.

关键词: 非视距; 方向角; 方向角变化率; 可行域; 优化处理

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 10-2040-04

Pseudo-Target Dynamic Feasible Region Constraint Location Method Using Single Observer in NLOS Environment

FAN Dan dan, ZHANG Li zhi, HUANG Kai zhi, JIN Liang

(Information and Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: A location method aiming at suppressing NLOS errors in cellular networks using single observer is proposed, which is named by pseudo target dynamic feasible region constraint method. The method needs less resource and cost than traditional multi base stations location methods. The scatters around the target are regarded as pseudo targets. AOA and the changing rate of AOA of pseudo targets are measured to get the location of pseudo targets. Then the feasible region of real target is constructed according to the location of pseudo targets and the geometrical relationship between real targets and pseudo targets, in which the optimization methods are applied to estimate the location of real target and deal with the NLOS errors. Pseudo target dynamic feasible region constraint method converts multi path signals, usually regarded as harmful factors, to advantage factors. As proved in simulation experiment, the proposed method can depress the location errors effectively and rapidly.

Key words: NLOS; AOA; changing rate of AOA; feasible region; optimization processing

1 引言

单站定位技术只利用单个机动的观测站对目标进行连续测量, 在获得一定定位信息积累的基础上, 进行适当的数据处理以获得目标的定位数据. 然而, 单站获取的信息量少于多个观测站, 其实现难度相对较大, 且在复杂的蜂窝移动网环境下, 信号容易受到多径传播、非视距(NLOS)误差等各种因素的影响, 很难根据单个观测站接收到的信号对目标进行定位, 这也是目前对蜂窝网环境下单站定位技术研究较少的原因. 文献[1~3]中提出的单站定位方法均是针对视距信号, 没有考虑非视距传播带来的误差. 文献[4]综合利用TOA、AOA和多普勒频移以及散射体信息, 提出了一种抗非视距的单站定位方法, 但定位条件较苛刻. 而文献[5]提出的方法虽

能有效减小角度测量中的NLOS误差, 但是需要多个基站同时参与.

为了抑制非视距传播环境下的单站定位误差, 本文提出了伪目标动态可行域约束法. 该方法将真实目标周围的散射体看作伪目标, 结合伪目标的位置和无线信道模型的特点, 将通常被视为不利因素的多径传播转化为有利因素合理利用, 建立对真实目标的几何约束, 达到降低定位误差的目的.

2 算法模型

本文中选定的信道模型为GBSBCM, 如图1所示, N 个散射体均匀分布在以目标移动台为中心、 R_m 为半径的圆内^[6]. 以观测站 O 第一次观测所处位置为直角坐标系原点, 目标 T 静止, 坐标为 (x_{MS}, y_{MS}) , 完成第一次

测量后观测台以 v 米/秒的速度,沿与 Y 轴夹角为 α ($0 < \alpha < \pi$) 的方向做匀速直线运动,且采样测量时间间隔为 T 秒.第 i 次测量时,观测站坐标为 (x_0^i, y_0^i) ,所测得的来波方向角和方向角变化率实际上来自于 N 个散射体,分别是 $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,N}$ 和 $\dot{\theta}_{i,1}, \dot{\theta}_{i,2}, \dots, \dot{\theta}_{i,N}$,而目标移动台的真实来波方向角和方向角变化率则分别为 $\phi_i, \dot{\phi}_i$;第 j 个散射体的位置坐标为 (x_j, y_j) .

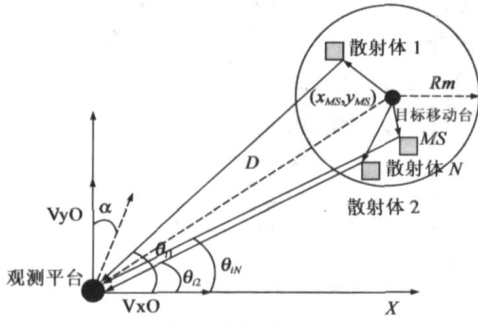


图 1 系统模型

3 伪目标动态可行域约束法

伪目标动态可行域约束法在观测站检测到目标后,首先用对其来波方向角和方向角变化率进行测量,由于散射体的存在,此时测得的是散射体(伪目标)的参数,因此利用双参数法^[7]计算出的坐标也是各个伪目标的坐标.为了精确伪目标位置,伪目标动态可行域约束法利用机动观测站进行多点测量,并应用扩展卡尔曼滤波来平滑参数测量误差,平滑后的伪目标位置与 GBSBCM 的特点相结合可以构造出真实目标的可行域,最终在收敛后的真实目标可行域内进行最优化解可以得到真实目标位置的估计值.

3.1 伪目标位置估计

以观测站和各个伪目标的相对位置 $X_i = [x_j - x_0^i, y_j - y_0^i]^T$ 为状态向量,方向角和方向角变化率为系统观测量,则可得到双参数法的系统状态转移方程和系统观测方程:

$$X_{i+1}^j = I \cdot X_i^j + T \cdot \begin{bmatrix} -v \cdot \sin \alpha \\ -v \cdot \cos \alpha \end{bmatrix} + \frac{T^2}{2} \begin{bmatrix} \delta x_{o_i} \\ \delta y_{o_i} \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$Z_j = \begin{bmatrix} \theta_{i,j} \\ \dot{\theta}_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctg \frac{y_j - y_0^i}{x_j - x_0^i} \\ \frac{-v \cdot \sin \alpha \cdot (y_j - y_0^i) + v \cdot \cos \alpha \cdot (x_j - x_0^i)}{(x_j - x_0^i)^2 + (y_j - y_0^i)^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \theta_{i,j} \\ \delta \dot{\theta}_{i,j} \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

其中, I 为二维单位矩阵, $\delta X_i = [\delta x_{o_i}, \delta y_{o_i}]^T$ 为测量观

测站位置时 x 方向和 y 方向上的加速度扰动, $\delta X_j = [\delta \theta_{i,j}, \delta \dot{\theta}_{i,j}]^T$ 为角度及其变化率的测量误差.观测站的运动速度 v 可通过导航设备获得,而目标方向角和方向角变化率可通过观测站上的智能天线和无线电、红外等手段测量得到^[8].理论上通过单次测量即可独立解算出目标的位置,但文中采用扩展卡尔曼滤波法^[9]来消除由参数测量引起的误差,得到较精确的伪目标位置坐标.

3.2 可行域构造

从图 1 可看出,GBSBCM 中存在一定的几何约束,即各个散射体导致的多径信号的角度扩展均不大于最大角度扩展,因此在确定了各个伪目标的位置 (x_j, y_j) 后,可结合该几何约束构造出真实目标的可行域^[5].为了便于说明问题,不失一般性的选择散射体个数 $N = 2$,真实目标位置可行域为两个伪目标分别构造的目标位置区域的交集.例如,在第 i 次更新伪目标位置坐标后,真实目标位置可行域 P_i 可由以下不等式构造:

$$\left| \phi_i - \arctg \left[\frac{y_j - y_0^i}{x_j - x_0^i} \right] \right| \leq \arcsin \left[\frac{R_m}{\sqrt{(x_j - x_0^i)^2 + (y_j - y_0^i)^2}} \right] \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

(x_j, y_j) 此时的是经过扩展卡尔曼滤波处理后更新的伪目标坐标.综合第 1 次到第 i 次分别得到的可行域 P_1, P_2, \dots, P_i ,真实目标位置可行域缩小为 $P_1 \cap P_2 \cap \dots \cap P_i$.因此,如图 2 所示,随着采样测量次数的增加和扩展卡尔曼滤波的应用,目标位置可行域将大大减小.

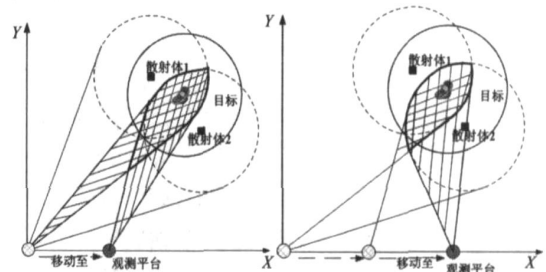


图 2 目标位置的可行域不断缩小(阴影交叉部分)

3.3 最优化处理

假设经过 K 次观测,伪目标的位置坐标和真实目标位置可行域都趋于稳定,这时可在最终确定的可行域内执行最优化处理以得到真实目标位置的估计值.由于之前的扩展卡尔曼滤波处理已修正了参数测量误差,因此此处主要考虑 NLOS 误差,并使用最后一次更新的伪目标信息,包括来波方向角 $\theta_{K1}, \theta_{K2}, \dots, \theta_{KN}$ 和 $\dot{\theta}_{K1}, \dot{\theta}_{K2}, \dots, \dot{\theta}_{KN}$ 方向角变化率.从参数间关系可得式(4):

$$\begin{cases} \theta_{Kj} = \arctg \frac{y_{MS} - y_0^K}{x_{MS} - x_0^K} + \xi \\ \dot{\theta}_{Kj} = \frac{-v \cdot \sin \alpha (y_{MS} - y_0^K) + v \cdot \cos \alpha (x_{MS} - x_0^K)}{(x_{MS} - x_0^K)^2 + (y_{MS} - y_0^K)^2} + \zeta \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

其中 ξ 和 ζ 为 NLOS 误差, 根据最小二乘法原理, 该最优化问题的目标函数为:

$$F(x_{MS}, y_{MS}) = \min_{x_{MS}, y_{MS}} \sum_{j=1}^N (|\xi_j|^2 + |\zeta_j|^2) \quad (5)$$

而问题的约束为

$$s. t. \quad G(x_{MS}, y_{MS}) = \{(x_{MS}, y_{MS}) \in \{P_1 \cap P_2 \cap \dots \cap P_K\}\} \quad (6)$$

由于目标函数和约束函数均为非线性, 文中采用常用的序列无约束最小化方法(SUMT 法), 并采用对数罚函数, 形式如下:

$$P(x_{MS}, y_{MS}, L_k) = F(x_{MS}, y_{MS}) - L_k \ln G(x_{MS}, y_{MS}) \quad (7)$$

L_k 为大于 0 的罚因子序列, 此处不再详细介绍罚因子的选择和最优化求解的迭代过程^[10].

4 仿真分析

为了验证伪目标动态可行域约束法在 NLOS 传播环境下利用单个机动观测站对目标进行定位的可行性和效果, 对算法做了如下的仿真分析. 选定观测站以 30 米/秒的速度匀速运动, 采样间隔为 10 秒, 宏小区半径约为 3000 米, 散射区域半径为 300 米, 移动台位置在 D 大于 R_m 的区域内随机产生, 同时假设各个参数测量误差为零均值的独立高斯分量, 其中方向角的标准偏差为 0.1mrad, 方向角变化率的标准偏差为 0.1mrad/s, x 方向和 y 方向的加速度扰动的标准偏差均为 2 米/秒².

仿真 1: 综合比较单次测量定位、经过扩展卡尔曼滤波处理的经典双参数法以及伪目标动态可行域约束法的定位性能. 假设产生多径信号的散射体数为 5 个, 在目标移动台周围均匀分布. 仿真结果如图 3 所示, 每点的值由 500 次 Monte Carlo 实验得到. 从图中可以看出利用观测站单次得到的测量值求解时, 因为每次使用的数据是独立测量得到的, 所以相应的每次定位的平均误差也相互独立. 而同样利用十次测量得到的数据, 伪目标动态可行域约束法与经过扩展卡尔曼滤波处理的经典双参数法相比, 平均定位误差降低了约 45 米. 在使用

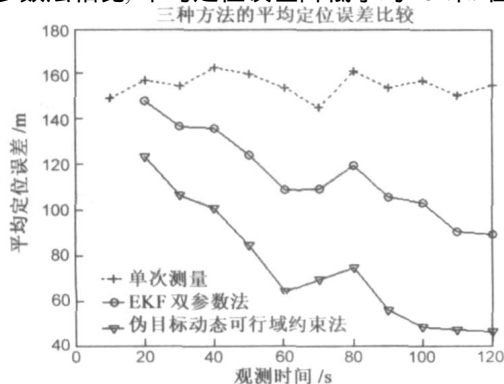


图 3 三种方法的平均定位误差比较

文中方法对目标持续进行三次采样测量后, 平均定位误差便降低了约 23 米. 在经过十次测量后, 降低了约 75 米, 且误差趋于平稳.

仿真 2: 分析散射体个数对伪目标动态可行域约束法定位性能的影响. 假设产生多径信号的散射体个数分别为 2 个、3 个和 5 个, 在目标移动台周围均匀分布, 比较三种情况下的平均定位误差. 仿真结果如图 4 所示, 每点的值由 500 次 Monte Carlo 实验得到. 从图中可以看出, 随着散射体个数的增多, 目标的位置可行域进一步缩小, 平均定位误差得到控制.

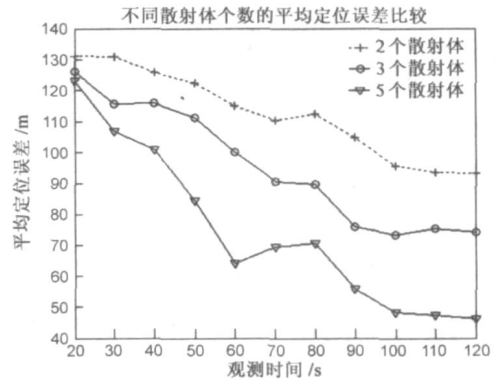


图 4 散射体个数对平均定位误差的影响比较

5 结论

本文基于 GBSBCM 提出了伪目标动态可行域约束法, 该算法将产生多径信号的散射体作为伪目标, 利用伪目标和真实目标间的位置关系以及观测站机动的特点, 快速有效地缩小目标位置的可行域, 这样不仅合理利用了往往被视为不利因素的多径信息, 还提高了目标定位精度和速度. 仿真实验证明了该方法在对目标进行有限次测量后, 可有效抑制定位误差. 与多站定位技术相比, 利用单个观测站进行定位的伪目标动态可行域约束法的精度还有待提高, 但是该方法具有设备量小、响应时间短的优点, 且灵活性强, 可定位概率高, 便于实现对目标的隐蔽接收、定位和跟踪.

参考文献:

- [1] 王丽, 刘正军, 胡捍英. 基于粒子滤波的蜂窝网移动台单站跟踪[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1556-1559.
Wang Li, Liu Zheng jun, Hu Han ying. Particle Filter for Single Base Station Mobile Tracking in Cellular Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(7): 1556-1559(Chinese Source).
- [2] 乔梁. 基于 TDOA 和 DOA 测量的单站无源定位方法. 吉首大学学报(自然科学版), 2006, 27(6): 60-63.
Qiao Liang, Single Station Passive Location Based on TDOA and DOA Measurement[J]. Journal of Jishou University(Natural Science Edition), 2006, 27(6): 60-63.

- ral Science), 2006, 27(6): 60– 63(Chinese Source) .
- [3] 占荣辉,王玲,万建伟. 稳健的单站无源目标跟踪算法研究. 信号处理, 2007, 23(3): 464– 468.
Zhan Ronghui, Wang Ling, Wan Jianwei. Research on Robust Algorithm for Single Observer Passive Target Tracking. Signal Processing, 2007, 23(3): 464– 468(Chinese Source) .
- [4] Thomas N J, Cruickshank D G M, and Laurenson D I. Calculation of Mobile Location Using Scatter Information[J]. Electronic Letters, 2001, 37(9): 1193– 1194.
- [5] 田孝华,廖桂生,赵修斌. 非视距传播环境下对移动用户定位的 AOA 方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(6): 775– 77.
Tian Xiaohua, Liao Guisheng, Zhao Xiubin. An AOA location method for the mobile station in NLOS propagation environment [J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2003, 30(6): 775– 77(Chinese Source) .
- [6] Joseph L, Tehodore S. Smart Antennas for Wireless Communications, IS 95 and Third Generation CDMA Applications[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.
- [7] 郭福成,孙仲康. 方向角及其变化率的单站无源定位的可观测性[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(9): 30– 32.
Guo Fucheng, Sun Zhongkang. Observability Analysis of Two Dimensional Single Observer Passive Location Using Bearing and Its Changing Rate[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(9): 30– 32(Chinese Source) .
- [8] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1996.
- [9] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [10] 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2001.

作者简介:

范丹丹 女, 1982 年生于江西安福, 现为解放军信息工程大学通信与信息处理专业博士生, 主要研究方向为研究方向为通信信号处理, 无线定位跟踪.

E-mail: vandd82@163.com

张立志 男, 1976 年生, 讲师, 研究方向为下一代移动通信关键技术.

黄开枝 女, 1973 年生, 副教授, 研究方向为无线安全, 异构无线网络.

金 梁 男, 1969 年生, 解放军信息工程大学博士生导师, 国家科技进步一等奖、第十届中国青年科技奖和求是奖获得者, 目前主要研究方向为无线通信.