

## 伪目标动态可行域约束法中的观测站最优路线规划算法

范丹丹 黄开枝 金梁

(解放军信息工程大学信息工程学院信息技术研究所 郑州 450002)

**摘要:** 在针对非视距环境下单站机动定位的伪目标动态可行域约束法中, 目标位置可行域大小直接影响到算法速度和最终定位结果的精度, 因此该文提出了一种基于动态规划的观测站最优路线规划算法。该算法在当前测量时刻所测数据的基础上, 以目标位置可行域收敛面积最大化为目标, 分析出观测站运动到下一测量时刻的最优运动方向, 从而达到缩短定位时间和抑制定位误差的目的, 实现整个测量路线的最优化。

**关键词:** 非视距; 单次反射圆模型; 方向角; 方向角变化率; 可行域

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2980-04

## Optimal Observer Route Planning Algorithm in Pseudo-target Geometrical Constraint Method

Fan Dan-dan Huang Kai-zhi Jin Liang

(Information Technology Institute of Information & Engineering School,  
Information & Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In the pseudo-target geometrical constraint method, which aims at location using single observer in NLOS environment, the area of the target feasible region has direct effect on the speed and accuracy of the location algorithm. An optimal path planning algorithm of the observer is proposed in this paper, which is based on the dynamic programming. Based on the data measured at the current stage, the optimal moving direction of the observer at the next stage is calculated aiming at the maximum area of the target feasible region convergence. The optimized maneuvering path calculated by the proposed algorithm can improve the location precision and reduce the location time.

**Key words:** NLOS; GBSBCM; AOA; Variance of AOA; Feasible region

### 1 引言

近年来, 非视距环境下对目标的定位已成为研究热点, 尤其是单站定位技术具有设备量小、响应时间短、成本低的优点, 也受到越来越多研究人员的关注<sup>[1-3]</sup>, 但已有的单站定位方法多数是针对视距信号, 因此, 我们提出了在非视距环境下利用单个机动观测站对目标进行定位的伪目标动态可行域约束法。该方法利用了单次反射圆模型(GBSBCM)下各条多径信号产生的角度扩展均小于最大角度扩展的几何约束条件, 其原理是将非视距传播环境下目标周围的散射体作为伪目标, 在观测站测量出伪目标位置后根据几何约束条件构造出真实目标位置范围(可行域)。伪目标动态可行域法同时利用机动观测站进行多点测量, 根据多点观测值动态地构造真实目标可行域, 并使可行域面积随着测量数据的增加而不断缩小, 最终在收敛的可行域内进行最优化求解, 估计出目标真实位置。

在上述方法中, 如果目标位置可行域较大, 在进行最优

化求解时可能会使算法花费过多的时间去搜索离实际位置较远的点, 从而浪费了运算时间, 也影响了定位精度。为了最大限度地消除搜索范围的不确定性, 本文基于动态规划理论提出了观测站最优运动路径规划算法, 充分利用观测站的机动性, 将其运动路线按照测量间隔分为各个阶段, 以目标位置可行域收敛面积最大化为目标, 在每一个阶段都分析出下一阶段的最佳运动路线, 即能最快减小目标位置可行域的运动路线, 从而达到缩短定位时间和抑制定位误差的目的, 实现整个测量路线的最优化。

### 2 伪目标动态可行域约束法

#### 2.1 算法模型

伪目标动态可行域约束法针对的信道模型为 GBSBCM<sup>[4]</sup>。为了便于说明问题, 不失一般性地选择伪目标个数  $N = 2$ , 假设各个伪目标和真实目标均固定, 如图 1(a)所示, 并以观测站第 1 次观测所处位置为直角坐标系原点, 真实目标坐标为  $(x_T, y_T)$ , 伪目标坐标为  $(x_j, y_j) (j = 1, 2)$ 。完成第 1 次测量后观测台以  $v$  (m/s) 的速度, 沿与  $Y$  轴夹角为  $\alpha$  ( $0 < \alpha < \pi$ ) 的方向做匀速直线运动, 如图 1(b)所示, 且采样测量时间间隔为  $T$  (s)。第  $i$  次测量时, 观测站坐标为  $(x_O^i, y_O^i)$ , 所测得的来波方向角和方向角变化率实际上来自

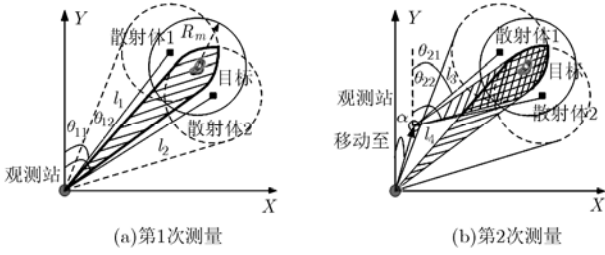


图 1 算法模型

于 2 个伪目标，分别是  $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}$  和  $\dot{\theta}_{i,1}, \dot{\theta}_{i,2}$ ，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  $\phi_i, \dot{\phi}_i$ 。模型中观测站的运动，使得所测伪目标的方向角  $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}$  随时间而变化，若以观测站和伪目标的位置  $\mathbf{X}_i^j = [x_j - x_O^i, y_j - y_O^i]^T$  ( $j = 1, 2$ ) 为状态向量，方向角和方向角变化率为系统观测量，结合观测站的运动状态，则可由双参数法<sup>[5]</sup>计算出伪目标位置。

2.2 可行域规划和最优化求解

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<sup>[6]</sup>，因此在确定了各个伪目标的位置  $(x_j, y_j)$  后，可以结合该几何约束构造出真实目标的可行域。第  $i$  次更新伪目标位置坐标后，真实目标可行域  $P_i$  的构造用数学形式表达如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \left| \phi_i - \arctan \left( \frac{y_j - y_O^i}{x_j - x_O^i} \right) \right| &\leq \arcsin \left( \frac{R_m}{\sqrt{(x_j - x_O^i)^2 + (y_j - y_O^i)^2}} \right) \\ j &= 1, 2 \end{aligned} \right. \quad \phi_i = \arctan \left( \frac{y_T - y_O^i}{x_T - x_O^i} \right) \quad (1)$$

假设经过  $K$  次观测，伪目标的位置坐标趋于稳定且真实目标位置可行域面积已收敛，则最终确定的目标可行域范围为  $P_1 \cap P_2 \cap \dots \cap P_K$ 。如图 1(b) 中阴影交叉部分表示的是由第 2 次测量得到的数据构造的目标可行域  $P_2$  与经第 1 次测量构造出的  $P_1$  取交集的部分。这时在可行域内执行最优化处理<sup>[7]</sup>可得到真实目标位置的估计值。

3 最优路径规划

由于随着观测站运动方向的不同，目标位置可行域会有不同程度的收敛，如图 2 所示。因此本文基于动态规划理论提出了观测站最优运动路线规划算法，将观测站的运动路线按照测量间隔分为各个阶段，在当前阶段测量得的数据的基础上，主要考虑观测站运动方向这一因素，以目标位置可行域收敛面积最大化为目标，分析出观测站下一阶段的最优运动方向，实现整个测量路线的最优化。

仍以两个散射体为例，假设第  $i$  次观测时两个伪目标的位置坐标为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ 。伪目标和真实目标的分布可能有很多种，本文不失一般性地选择图 1 所示分布为例来说明问题，即  $x_1 < x_T < x_2, y_1 > y_T > y_2$ ，其余分布情况可依介

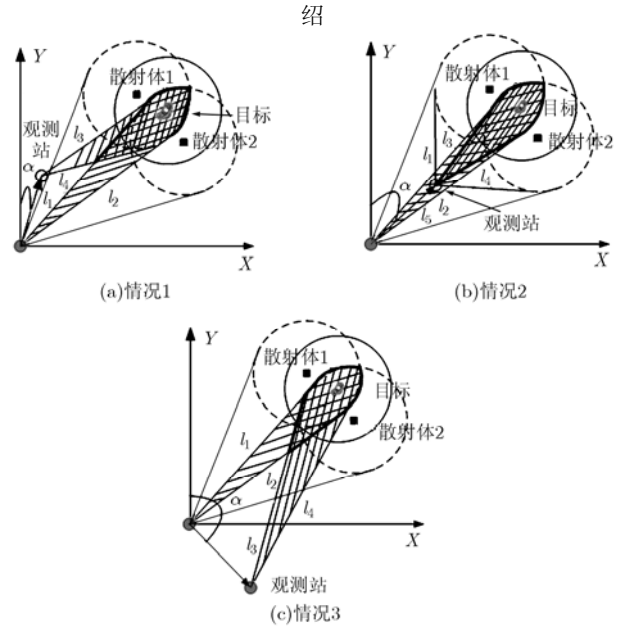


图 2 可行域收敛面积计算

的原理类推。

结合式(1)，可构造出如图 1(a) 阴影部分所示的真实目标位置可行域，形成可行域  $P_i$  的两条直线  $l_1, l_2$  方程为

$$\left. \begin{aligned} l_1: y - y_O^i &= (x - x_O^i) \operatorname{ctg} \left( \theta_{i,2} - \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_2 - x_O^i)^2 + (y_2 - y_O^i)^2}} \right) \\ &\triangleq (x - x_O^i) k_1 \\ l_2: y - y_O^i &= (x - x_O^i) \operatorname{ctg} \left( \theta_{i,1} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_1 - x_O^i)^2 + (y_1 - y_O^i)^2}} \right) \\ &\triangleq (x - x_O^i) k_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

完成第  $i$  次测量后观测站以  $v$  (m/s) 的速度，沿与  $Y$  轴夹角为  $\alpha$  ( $0 < \alpha < \pi$ ) 的方向做匀速直线运动，两次采样测量时间间隔为  $T$  (s)，则进行第  $i + 1$  次测量时观测站的坐标为

$$x_O^{i+1} = x_O^i + vT \sin \alpha, \quad y_O^{i+1} = y_O^i + vT \cos \alpha \quad (3)$$

由  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ ，可以预先计算出第  $i + 1$  次测量时两个伪目标的来波方向角  $\theta_{i+1,1}$  和  $\theta_{i+1,2}$ ，以及方向角变化率  $\dot{\theta}_{i+1,1}$  和  $\dot{\theta}_{i+1,2}$ 。这样利用该组数据同样可构造一个新的可行域，如图 1(b) 所示，形成新的可行域  $P_{i+1}$  的两条直线  $l_3, l_4$  方程为  $l_3: y - y_O^{i+1}$

$$\begin{aligned} &= (x - x_O^{i+1}) \operatorname{ctg} \left( \theta_{i+1,2} - \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_2 - x_O^{i+1})^2 + (y_2 - y_O^{i+1})^2}} \right) \\ &\triangleq (x - x_O^{i+1}) k_3, \\ l_4: y - y_O^{i+1} &= (x - x_O^{i+1}) \operatorname{ctg} \left( \theta_{i+1,1} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_1 - x_O^{i+1})^2 + (y_1 - y_O^{i+1})^2}} \right) \\ &\triangleq (x - x_O^{i+1}) k_4 \end{aligned} \quad (4)$$

经过第  $i + 1$  次测量后确定的可行域  $P_i \cap P_{i+1}$  与  $P_i$  相比, 面积减小的部分可以计算得到。但值得注意的是, 随着  $\alpha$  取值范围的不同, 该面积的计算也各不相同, 因此如图 2 所示, 应该分 3 种情况进行分析。

3 种情况分别为

情况 1  $0 \leq \alpha \leq \theta_{i,2} - \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_2 - x_O^i)^2 + (y_2 - y_O^i)^2}}$

从图 2(a)可以看出, 此时可行域减小的区域为  $l_1, l_2, l_4$  组成的三角形, 其面积由下式表示:

$$S_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{A1} - x_O^i)^2 + (y_{A1} - y_O^i)^2} \cdot \sqrt{(x_{B1} - x_O^i)^2 + (y_{B1} - y_O^i)^2} \cdot \sin \left[ \theta_{i1} - \theta_{i2} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_1 - x_O^i)^2 + (y_1 - y_O^i)^2}} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_2 - x_O^i)^2 + (y_2 - y_O^i)^2}} \right] \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} x_A &= \frac{y_O^{i+1} - y_O^i + x_O^i k_1 - x_O^{i+1} k_4}{k_1 - k_4}, y_A = (x_A - x_O^i) k_1 + y_O^i \\ x_B &= \frac{y_O^{i+1} - y_O^i + x_O^i k_2 - x_O^{i+1} k_4}{k_2 - k_4}, y_B = (x_B - x_O^i) k_2 + y_O^i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由算法中对最优的定义可知, 最优运动方向  $\hat{\alpha}_1$  为使可行域收敛面积  $S_1$  最大的角度, 即  $\hat{\alpha}_1 = \arg \max(S_1)$ 。运算过程不再详细推导, 结合  $\hat{\alpha}_1$  的取值范围, 可求出在该情况下, 最佳运动方向  $\hat{\alpha}_1 = 0$ 。

情况 2  $\theta_{i,2} - \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_2 - x_O^i)^2 + (y_2 - y_O^i)^2}} \leq \alpha \leq \theta_{i,1} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_1 - x_O^i)^2 + (y_1 - y_O^i)^2}}$

如图 2(b)所示, 此时减小的可行域面积  $S_2$  由两部分组成, 一部分是  $l_1, l_3$  和观测平台与原点径向连线  $l_5$  构成的三角形面积, 另一部分是  $l_2, l_4$  和  $l_5$  构成的三角形面积。同样可以由几何关系得到  $S_2$  的表达式, 那么经过运算可得到该情况下最佳运动方向为

$$\hat{\alpha}_2 = \arg \max(S_2) = (1/2)(\theta_{i,1} + \theta_{i,2}) \quad (7)$$

情况 3  $\theta_{i,1} + \arcsin \frac{R_m}{\sqrt{(x_1 - x_O^i)^2 + (y_1 - y_O^i)^2}} \leq \alpha \leq \pi$

这种情况下, 减小的可行域面积  $S_3$  为  $l_1, l_2, l_3$  三条直线构成的三角形面积, 如图 2(c)所示。经计算可得该情况下最佳运动方向为

$$\hat{\alpha}_3 = \theta_{i,2} + \pi/2 \quad (8)$$

在分别计算出 3 种情况下的最佳运动方向  $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3$  和对应的面积最大值  $S_{1MAX}, S_{2MAX}, S_{3MAX}$  后, 再取  $\hat{\alpha} = \arg \max(S_{1MAX}, S_{2MAX}, S_{3MAX})$  为最终的最佳运动方向。

以上给出的是利用第  $i$  次测量得到的数据计算第  $i + 1$  次观测最优运动方向的方法, 观测站每当要进行下一次观测之前, 都通过该方法来计算最优运动方向, 从而达到迅速有效地控制目标可行域范围的目的。

### 4 仿真结果

选定观测站以 30m/s 的速度匀速运动, 采样间隔为 10 s, 宏小区半径约为 3km, 散射区域半径  $R_m$  为 400m, 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  $2m/s^2$ 。

仿真 1 分析观测站的最优运动方向。以第 2 次观测为例, 计算随着观测平台运动方向的变化可行域收敛的面积, 进行 50 次 Monte-Carlo 试验。仿真结果如图 3 所示, 为了便于说明问题, 将仿真图的横坐标轴选择为  $\alpha - \theta_{i,2}$ 。从图中可以看出, 使可行域收敛面积取最大值的最优运动方向  $\alpha$  与  $\theta_{i,2}$  的差值都在  $\pi/2$  左右, 这恰恰符合前文中情况 3 的情况。

仿真 2 分析观测站的运动路线对定位误差的影响。考虑 5 种不同的运动路线, 分别是情况 1:  $\alpha = 0$ ; 情况 2:  $\alpha = (\theta_{i,1} + \theta_{i,2})/2$ ; 情况 3:  $\alpha = \pi/2$ ; 情况 4:  $\alpha = \theta_{i,2} + \pi/2$  以及情况 5: 使用文中所提的最优路线动态规划方法, 按照最优路线运动  $\alpha = \theta_{i,2} + \pi/2$ 。散射体个数均为 5。仿真结果图 4 中每点的值由 100 次 Monte-Carlo 实验得到, 可以看出, 与其余 4 种情况相比, 情况 5 由于在每一步测量之前都使用最优路线选择方法计算出最优运动方向, 使得在有限次的测量后目标位置可行域就迅速减小, 从而加快了平均定位误差的收敛速度。

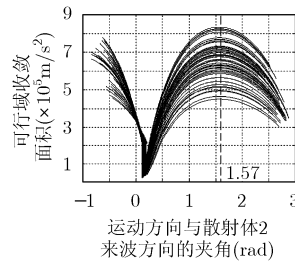


图 3 第二次观测时观测站最佳运动方向

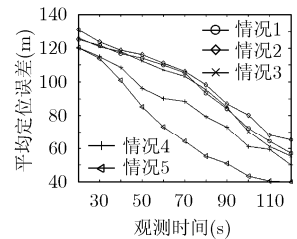


图 4 观测站运动路线对平均定位误差的影响比较

### 5 结束语

本文针对非视距传播环境下单站定位的伪目标动态可行域约束法提出了基于动态规划理论的观测站最优路线选择算法。仿真实验表明, 通过寻找观测站最佳运动模式, 在对目标进行有限次测量后, 即能够快速有效地缩小目标位置可行域, 达到提高定位精度和速度的目的。目前关于非视距传播环境下单站定位的研究尚有很多技术问题有待研究, 但利用单观测站的机动优势对目标进行多点连续测量可以增加信息量, 尤其是能针对机动目标进行机动监测和跟踪等。因此可以肯定, 单个机动观测站能在短时间内对目标移动台迅速有效的定位, 将是未来研究的一个热点。

### 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. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1556-1559.
- Wang Li, Liu Zheng-jun, and Hu Han-ying. Particle filter for single base station mobile tracking in cellular networks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1556-1559.
- [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. *Journal of Jishou University(Natural Science Edition)*, 2006, 27(6): 60-63.
- [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 Rong-hui, Wang Ling, and Wan Jian-wei. Research on robust algorithm for single observer passive target tracking. *Signal Processing*, 2007, 23(3): 464-468.
- [4] Joseph L and Tehodore S. Smart Antennas for Wireless Communications, IS-95 and Third Generation CDMA Applications. First Edition, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999: 174-177.
- [5] 戴中华, 邓新蒲. 基于方位角变化率最大的轨迹优化几何方法. 航天电子对抗, 2007, 23(4): 47-49.
- Dai Zhong-hua and Deng Xin-pu. A geometrical method for optimization of trajectory based on maximizing azimuth changing rate. *Aerospace Electronic Warfare*, 2007, 23(4): 47-49.
- [6] 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. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(6): 775-779.
- Tian Xiao-hua, Liao Gui-sheng, and Zhao Xiu-bin. An AOA location method for the mobile station in NLOS propagation environment. *Journal of Xidian University(Natural Science)*, 2003, 30(6): 775-779.
- [7] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 第一版, 北京: 科学出版社, 2001, 第 7 章.
- Yuan Yaxiang and Sun Wenyu. Optimization Theory and Methods. First Edition, Beijing: Science Press, 2001, Chapter 7.
- 范丹丹: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理、无线定位跟踪.
- 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, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信.