

Detector Position Optimization in TDOA Passive Location

GU Xiaojie, WANG Xinmin*, LI Wenchao

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In mobile and passive sensor network, the relative geometric relationship between observer and target has a major impact to location and tracking accuracy. In order to improve tracking accuracy, a real time optimize embattle algorithm of mobile platforms based on the Geometric Dilution of Precision (GDOP) of time difference of arrival (TDOA) location system is proposed. First, an expression of GDOP with the baseline length and baseline orientation angle is deduced. As an objective optimization function, a weighted discrete search optimization algorithm is applied to calculate the optimal position which minimizes the objective function. And then, the measurements are obtained in this optimal position to achieve target motion analysis. The simulation results show that this algorithm can eliminate location ambiguity of TDOA algorithm and enhance tracking accuracy on moving targets.

Key words: mobile and passive sensor network; time difference of arrival passive location; geometric dilution of precision; optimize embattle; weighted discrete search optimization algorithm

EEACC: 6150P; 7950

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.01.020

多站时差无源定位探测器位置优化

顾晓婕, 王新民*, 李文超

(西北工业大学自动化学院, 西安 710129)

摘要: 在可移动无源传感器网络中, 观测器与目标的相对几何关系对定位精度有重要影响。为提高对运动目标的定位跟踪精度, 提出一种基于时差无源定位几何稀释精度 (GDOP) 的移动平台实时布站方法。首先推导出二维时差无源定位方法下的带有基线长度和基线偏角的 GDOP 表达式, 将其作为目标优化函数, 使用加权离散搜索优化算法求解网内各观测器每一时刻的最佳观测位置, 并在此最佳位置对目标进行量测, 完成目标运动分析。该方法通估计和优化相结合实现移动平台无源传感器网络的实时优化部署, 仿真证明该算法一定程度上解决了时差无源定位算法的定位模糊问题, 提高了对运动目标的跟踪精度。

关键词: 可移动无源传感器网络; 时差无源定位; 几何稀释精度; 优化布站; 加权离散搜索优化算法

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)01-0093-07

对于可移动传感器组网系统, 其定位跟踪精度与观测器的空间分布和目标与观测器之间的距离、方向有关。特别, 在时差无源定位体制下, 目标的定位跟踪精度在测量误差等保持不变的情况下完全由目标和观测器之间的相对几何关系决定^[1]。考虑到移动传感器网络中观测器所特有的机动性, 观测器能够根据目标的位置自动调节自身的以及观测器间的方位, 以获得更高的定位跟踪精度。因此, 如何根据目标位置的变化自适应的调整自身及观测器间的方位以获得更高的定位

精度成为研究重点。

目前大部分研究成果都集中在时差无源定位体制下布站方式对目标的定位精度的影响。其中文献[2-4]对机动传感器网络定位方法进行研究; 文献[5-13]研究了观测器的不同几何构型对定位精度的影响, 并对影响定位精度的因素(如基线长度)进行静态分析。上述研究在求解得到最优的基线长度和夹角后保持各观测器位置不变, 因此仅适用于固定目标无源定位, 对于运动目标被动跟踪将极大程度出现滤波发散的情况, 即由于观测器位置固定, 使

得观测量误差累积增大,对目标出现失跟。本文基于动平台传感器网络提出一种移动平台实时布站的方法,将基线长度和基线偏角作为待优化参数推导出目标优化函数表达式,利用加权的离散搜索算法对目标函数进行优化,得到每一时刻观测器的最佳位置,完成网络内各观测器位置的实时调整。本质上是通过改变目标与观测器间几何关系,使目标尽可能处于高精度的区域,提高对辐射源的跟踪精度。

1 问题描述

设时差定位系统由1个主观测器及2个副观测器构成,使用三观测器时差无源定位算法对二维平面内辐射源进行定位,假设辐射源高度为 \hat{z} 。各观测器 $O_i(i=0$ 表示主观测器, $i=1,2$ 表示副观测器) k 时刻在 xy 平面内坐标如图1所示: $O_0(k):(0,0)$ 、 $O_1(k):(L_1\cos\theta_1, L_1\sin\theta_1)$ 、 $O_2(k):(L_2\cos\theta_2, L_2\sin\theta_2)$ 。 $T(k-1)$ 为目标 $k-1$ 时刻的估计位置, $T(k|k-1)$ 为目标 k 时刻的一步预测位置,坐标为 $(x,y)^T$ 。 $L_i(i=1,2)$ 为基线,表示副观测器与主观测器之间的距离; $\theta_i(i=1,2)$ 为基线偏角,表示 L_i 与 x 轴之间的夹角,逆时针为正。

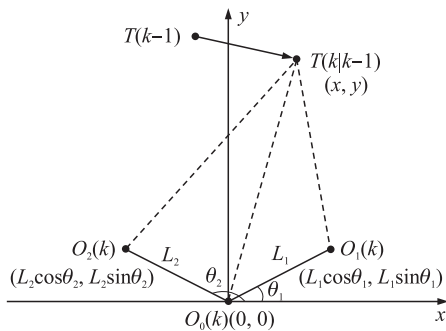


图1 平面时差系统站址配置图

2 目标优化函数

引理1 图1给定坐标系下,利用两点间距离公式,可将带有基线长度 L 及基线偏角 θ_1, θ_2 的三观测器无源定位公式表示为:

$$\begin{cases} r_1 - r_0 = \Delta r_1 \\ r_2 - r_0 = \Delta r_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sqrt{(x-L_1\cos\theta_1)^2 + (y-L_1\sin\theta_1)^2} - \sqrt{x^2 + y^2} = c \cdot \Delta t_1 \\ \sqrt{(x-L_2\cos\theta_2)^2 + (y-L_2\sin\theta_2)^2} - \sqrt{x^2 + y^2} = c \cdot \Delta t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, c 表示辐射源的辐射信号传播速度,为光速, r_i 表示辐射源与第 $i(i=0,1,2)$ 个观测器之间的距离, Δr_i 表示辐射源到第 $i(i=1,2)$ 个观测器与辐射源到主观测器之间的距离差, Δt_i 表示到达时间差。

注1 根据文献[14]中给出的定位算法,可求解出目标的空间位置,但在求解过程中 r_0 可能存在两个解 r_{01}, r_{02} ,若均为正,则存在定位模糊问题。

定义1^[15] 在无源定位系统中衡量定位精度的一个重要指标就是误差几何稀释度(Geometric Dilution of Precision, GDOP)值:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = M \cdot G \quad (2)$$

它用来描述定位误差的三维几何分布,即目标在空间不同位置时定位误差的大小。式中, G 为几何因子, M 为测量因子,即定位误差由两部分组成:几何因子决定于目标和观测器间的相对几何关系;测量因子决定于到达时间测量误差和测量平台的自身定位误差等。

在对三观测器时差定位系统进行精度分析的过程中做如下简化假设:

1、两基线长度始终保持相等,即 $L=L_1=L_2$ 。

2、两基线间夹角 φ 保持不变,即 $\varphi = |\theta_2 - \theta_1| = 120^\circ$ 。

定理1 假设各测量误差均为零均值,且互不相关的高斯白噪声,在上述简化条件下,根据引理1和定义1可得到目标位置 (x,y) 对 $(\Delta t_i, L, \theta_1, \theta_2)$ 的误差分析结果:

$$\text{GDOP} = \sqrt{(a_1 + b_1)\sigma_\theta^2 + (a_2 + b_2)\sigma_L^2 + (a_3 + b_3)\sigma_t^2} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} a_1 = y^2 \\ a_2 = \{ [xy(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) - (y^2 - L^2)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) + Lx\sin(\theta_1 - \theta_2)]r_0 + y[(L - x\cos\theta_1 - y\cos\theta_1)r_2 - r_1(L - x\cos\theta_2 - y\cos\theta_2)] \}^2 \\ a_3 = c^2 r_1^2 [(x - L\cos\theta_2)r_0 - xr_2]^2 + c^2 r_2^2 [(x - L\cos\theta_1)r_0 - xr_1]^2 \\ b_1 = x^2 \\ b_2 = \{ [-xy(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) - (x^2 - L^2)(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) + Ly\sin(\theta_1 - \theta_2)]r_0 + x[(L - x\cos\theta_2 - r_1\cos\theta_2)r_1 - r_2(L - x\cos\theta_1 - y\cos\theta_1)]r \}^2 \\ b_3 = c^2 r_1^2 [(x - L\cos\theta_2)r_0 - xr_2]^2 + c^2 r_2^2 [(x - L\cos\theta_1)r_0 - xr_1]^2 \\ \sigma_\theta^2 = E[(d\theta_1)^2] = E[(d\theta_2)^2] \\ \sigma_L^2 = E[(dL)^2] \\ \sigma_t^2 = E[(dt_i)^2] \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ_θ^2 为基线偏角测量误差标准差; σ_L^2 为基线长度测量误差标准差; σ_t^2 为到达时间的测量误差标准

差,站址分量的测量误差可用 σ_L^2 和 σ_i^2 联合表示。

证明 根据引理 1,对到达时间差 Δt_i ,目标估计位置 (x,y) ,基线长度 L 及基线夹角 θ_1, θ_2 分别取微分得:

$$\begin{cases} \left(\frac{x-L\cos\theta_1}{r_1} - \frac{x}{r_0} \right) dx + \left(\frac{y-L\sin\theta_1}{r_1} - \frac{y}{r_0} \right) dy + \\ \frac{L-x\cos\theta_1-y\sin\theta_1}{r_1} dL + \frac{L(x\sin\theta_1-y\cos\theta_1)}{r_1} d\theta = c \cdot d\Delta t_1 \\ \left(\frac{x-L\cos\theta_2}{r_2} - \frac{x}{r_0} \right) dx + \left(\frac{y-L\sin\theta_2}{r_2} - \frac{y}{r_0} \right) dy + \\ \frac{L-x\cos\theta_2-y\sin\theta_2}{r_2} dL + \frac{L(x\sin\theta_2-y\cos\theta_2)}{r_2} d\theta = c \cdot d\Delta t_2 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)写成矩阵形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}dL + \mathbf{C}d\theta + cd\Delta t_i \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{x-L\cos\theta_1}{r_1} - \frac{x}{r_0} & \frac{y-L\sin\theta_1}{r_1} - \frac{y}{r_0} \\ \frac{x-L\cos\theta_2}{r_2} - \frac{x}{r_0} & \frac{y-L\sin\theta_2}{r_2} - \frac{y}{r_0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1 - L}{r_1} \\ \frac{x\cos\theta_2 + y\sin\theta_2 - L}{r_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{L(y\cos\theta_1 - x\sin\theta_1)}{r_1} \\ \frac{L(y\cos\theta_2 - x\sin\theta_2)}{r_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [dx, dy]^T \quad (8)$$

求解 dx, dy 得:

$$\begin{aligned} Sdx = & [(x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1 - L) dL + (Ly\cos\theta_1 - \\ & Lx\sin\theta_1) d\theta + cr_1 d\Delta t_1] \cdot [(-y + L\cos\theta_2) r_0 + yr_2] - \\ & [(x\cos\theta_2 + y\sin\theta_2 - L) dL + (Ly\cos\theta_2 - Lx\sin\theta_2) d\theta + \\ & cr_2 d\Delta t_2] \cdot [(-y + L\cos\theta_1) r_0 + yr_1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sdy = & - [(x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1 - L) dL + (Ly\cos\theta_1 - \\ & Lx\sin\theta_1) d\theta + cr_1 d\Delta t_1] \cdot [(-x + L\cos\theta_2) r_0 + xr_2] + \\ & [(x\cos\theta_2 + y\sin\theta_2 - L) dL + (Ly\cos\theta_2 - Lx\sin\theta_2) d\theta + \\ & cr_2 d\Delta t_2] \cdot [(-x + L\cos\theta_1) r_0 + xr_1] \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$S = L [(y\cos\theta_1 - y\cos\theta_2 + L\sin(\theta_1 - \theta_2) + x\sin\theta_2 - x\sin\theta_1) r_0 + (y\cos\theta_2 - x\sin\theta_2) r_1 + (x\sin\theta_1 - y\cos\theta_1) r_2] \quad (10)$$

对 dx, dy 分别做统计,即可得目标位置 (x, y) 对 $(\Delta t_i, L, \theta_1, \theta_2)$ 的误差分析结果:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = a_1\sigma_0^2 + a_2\sigma_L^2 + a_3\sigma_i^2 \\ \sigma_y^2 = b_1\sigma_0^2 + b_2\sigma_L^2 + b_3\sigma_i^2 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入定义 1 的表达式中即可得到式(3)所示结果,证毕。

3 优化设计与算法

上述带有基线长度和基线偏角的定位公式及定位精度分析都是在进行定义 1 中简化假设的基础上进行的。组网优化设计的基本思想是将被动传感器网络的定位精度作为优化设计指标,寻求达到指标要求的系统参数,对于三观测器时差无源定位系统而言,重点考虑基线长度和基线偏角这两个系统参数的优化问题。

3.1 系统优化模型

由上述精度分析过程,可以将定位的几何稀释精度 GDOP 写成一个与 $\mathbf{x} = [L, \theta_1, \theta_2]^T$ 相关的函数,即 $G=f(\mathbf{x})$ 。将其作为目标函数进行优化设计,被动定位跟踪系统优化设计模型描述为:

$$P_{\text{opt}} = \arg \min_{P_c} G, \quad \text{s. t. } P_c \subseteq P \quad (12)$$

其中 P 表示被优化参数集,它由基线长度和基线偏角构成; P_c 表示约束参数集,为 P 的子集,当存在某种约束时 $P_c \subseteq P$,对无约束情形 $P_c = P$; P_{opt} 表示优化后得到的最优参数集; $\arg \min_{P_c} G$ 表示在约束参数集 P_c 上使用不同的优化算法求使目标函数 G 最优的参数集。系统优化设计框图如图 2 所示。

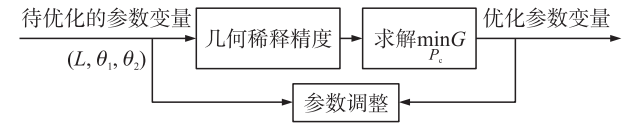


图 2 系统优化设计框图

3.2 加权离散搜索优化算法

由式(3)可知,本文所要求解的问题为非线性约束优化问题,可描述为:

$$\begin{cases} \min f(x), x = (L, \theta_1, \theta_2)^T \\ \text{s. t. } a_1 \leq L \leq b_1 \\ \alpha_1 \leq \theta_1 \leq \beta_1 \\ \alpha_2 \leq \theta_2 \leq \beta_2 \end{cases} \quad (13)$$

将 $f(x)$ 写成整个实数域上的分段函数,令 $F(x) = \begin{cases} f(x), & L \in [a_1, b_1], \theta_1 \in [\alpha_1, \beta_1], \theta_2 \in [\alpha_2, \beta_2] \\ +\infty, & L \notin [a_1, b_1], \theta_1 \notin [\alpha_1, \beta_1], \theta_2 \notin [\alpha_2, \beta_2] \end{cases}$, 可将约束优化问题转化为 $(-\infty, +\infty)$ 的无约束优化问题。

由于变量 x 具有方向性(即多瓣性)和多约束性,因此 $f(\cdot)$ 在实数域上必然有许多局部最优点,传统的优化算法是建立在局部下降基础上的,大多

不适合于全局性优化问题的求解。为了获得满意的解并考虑到优化算法的实时性,本文采用如下策略:

- ①算法在某一搜索步长下,变量 x 顺序调整,必要时重复多轮,直至获得最好的全局最优优点;
- ②搜索步长在整个搜索过程中逐渐减小。

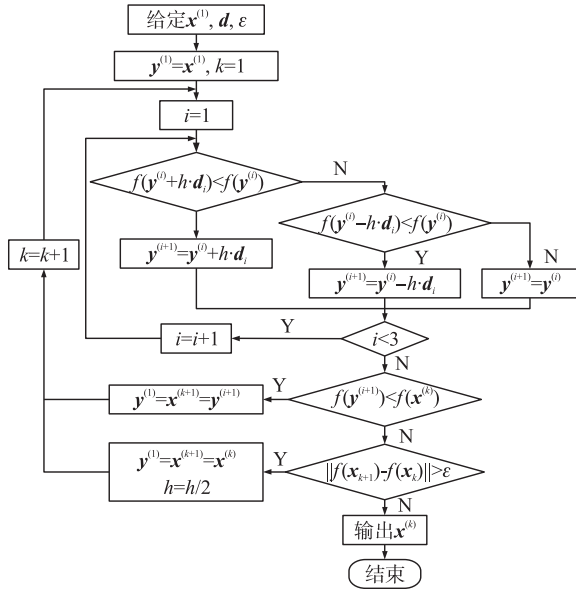


图 3 加权离散搜索优化算法流程图

下面给出算法具体计算步骤。设初始点和初始步长分别为 $x^{(1)}$ 和 h , 计算精度 $\varepsilon > 0$, e_i 表示单位向量, $W = \text{diag}(w_1, w_2, w_3)$ 表示权值矩阵, 令 $d_i = W \cdot e_i$, i, k 分别表示内外层循环次数。

Step 1 取初始点 $x^{(1)} \in \mathbf{R}^3$, 令 $y^{(1)} = x^{(1)}, k = i = 1$;

Step 2 判定 $f(y^{(i)} + h \cdot d_i) < f(y^{(i)})$, 若成立, 令 $y^{(i+1)} = y^{(i)} + h \cdot d_i$; 否则, 计算 $f(y^{(i)} - h \cdot d_i)$, 若小于 $f(y^{(i)})$, 令 $y^{(i+1)} = y^{(i)} - h \cdot d_i$; 否则, 令 $y^{(i+1)} = y^{(i)}$ 。当 $i < 3$ 时, $i \rightarrow i + 1$, 重复 Step 2 的计算, 否则, 进入 Step 3;

Step 3 判定 $f(y^{(i+1)}) < f(x^{(k)})$, 若成立, 令 $y^{(1)} = x^{(k+1)} = y^{(i+1)}, k \rightarrow k + 1$, 返回 Step 2; 否则, 进入 Step 4;

Step 4 判定 $\|f(x_{k+1}) - f(x_k)\| > \varepsilon$, 若成立, 令 $y^{(1)} = x^{(k+1)} = x^{(k)}, h = h/2, k \rightarrow k + 1$, 返回 Step 2; 否则, 输出 $x^{(k)}$ 计算结束。

由以上分析可以看出, 离散搜索优化算法是一种针对多变量函数的直接搜索算法, 它无需求解目标函数的一阶或二阶偏导数, 适用于目标函数复杂不可微, 或无法写成明显解析表达式的高病态优化问题, 方法简单, 适用范围广。此外, 考虑到目标函数 $f(\cdot)$ 由不同类型的参数变量构成, 给出了一个权值矩阵, 用于对不同变量的搜索步长进行合理调整。但该算法由于没有利用函数的分析性质, 收敛速度较之沿梯度下降方向的搜索算法慢, 计算复杂度较大。

4 实验结果

4.1 仿真条件

假设测量噪声符合零均值高斯分布, 测量时间间隔 $T = 0.1 \text{ s}$, 到达时间测量精度为 20 ns 。三个观测器以倒三角型编队(基线夹角为 120°), 初始位置分别为 $(0, 0, 2), (12.99, 7.5, 2), (-12.99, 7.5, 2)$ (单位是 km)。目标辐射源的初始位置为: $(0, 40, 2.4)$ (单位是 km), 考虑以下五种情况:

- ①目标以 $V_x = 200 \text{ m/s}$ 匀速直线运动;
- ②目标以 $V_x = -200 \text{ m/s}$ 匀速直线运动;
- ③目标以 $V_x = 500 \text{ m/s}$ 匀速直线运动;
- ④目标作 $V_x = -500 \text{ m/s}$ 的匀速直线运动;
- ⑤目标以 $V_y = -400 \text{ m/s}$ 匀速直线运动;

使用加权离散搜索算法对移动观测器进行实时布站, 并将此观测条件下的目标被动跟踪误差与观测器位置保持不变时进行比较, 仿真结果分析如下。

4.2 仿真结果及分析

图 4 ~ 图 8 分别给出了目标辐射源在五种不同的运动方式下的 X, Y 方向上的位置估计误差曲线, 其中实线是在观测器间构型和各观测器位置保持不变的条件下的目标跟踪误差曲线 ($L_0 = 1.5 \text{ km}, \theta_1 = \pi/6 \text{ rad}, \theta_2 = 11 \pi/6 \text{ rad}$), 虚线是利用本文所提算法对移动平台被动传感器网内各观测器进行实时优化部署的条件下的目标跟踪误差曲线, 对两者进行对比可明显发现该算法可有效提高辐射源的定位跟踪精度, 同时, 表 1 量化给出了两种算法在 X, Y 方向上的跟踪方差及均方误差 MSE 对比。

表 1 跟踪误差比较表

仿真条件	未调整		调整		MSE/m
	σ_x/m	σ_y/m	σ_x/m	σ_y/m	
情景 1	11.32	11.64	11.19	11.24	16.24
情景 2	6.75	7.26	6.66	6.74	9.91
情景 3	16.24	16.88	16.13	16.13	23.43
情景 4	7.65	7.57	7.62	7.56	11.60
情景 5	7.35	7.56	7.33	7.39	10.55

五种不同的运动方式下优化参数(基线长度和基线夹角)的调整过程见表 2。由基线偏角的变化可以看出, 在 3 个观测器间成等腰三角形分布时, 目标辐射源位于底边的中垂线上及其延长线上时, 定位跟踪误差最小(如情景 5 所示), 两基线并不发生偏转。当目标沿 X 正向或负向运动时两基线会发生相应的偏转。并且, 较之中低速运动的辐射源(情景 1、2), 中高速运动辐射源所对应基线偏转角速率更大(情景 3、4)。由基线长度的变化可以看出, 无论基线偏角如何变化, 基线长度总是保持在设定范围的最大值才能得到最小的定位跟踪精度。

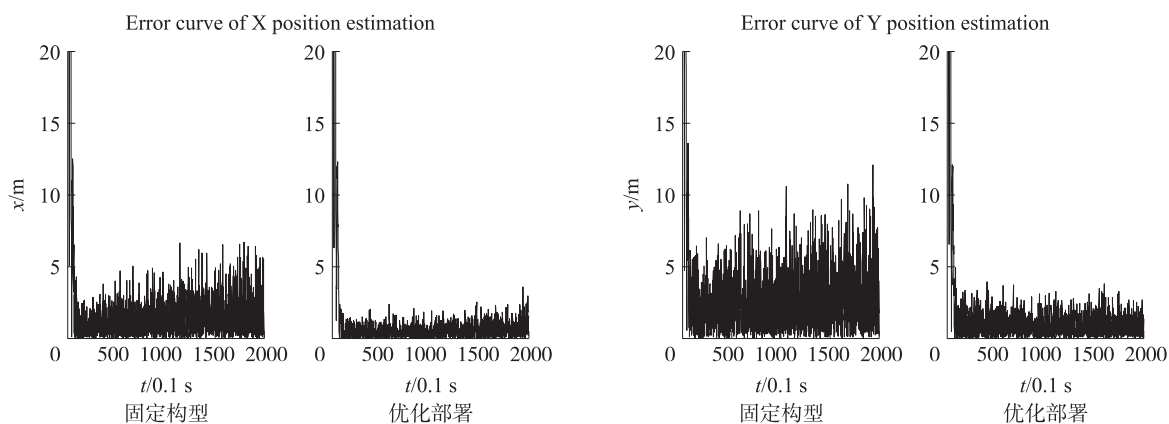


图 4 情景 1 下目标跟踪误差曲线

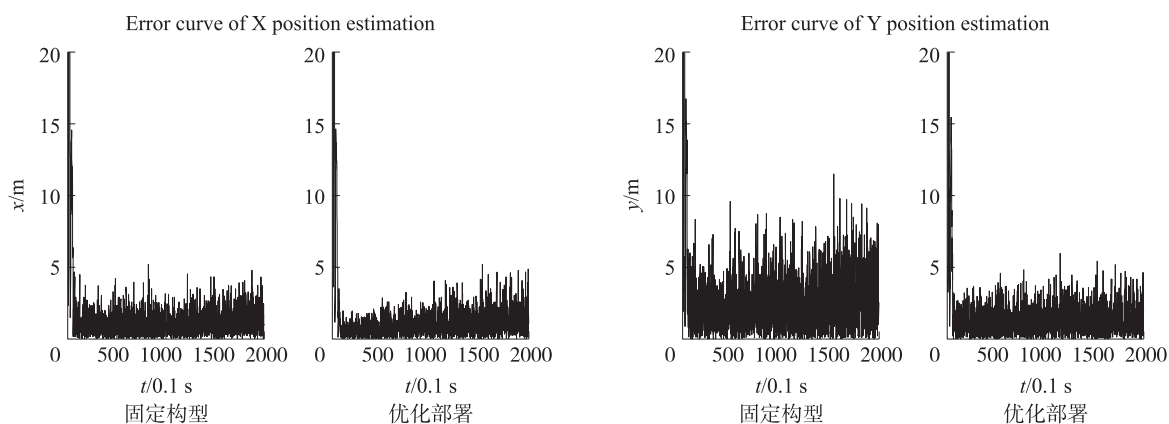


图 5 情景 2 下目标跟踪误差曲线

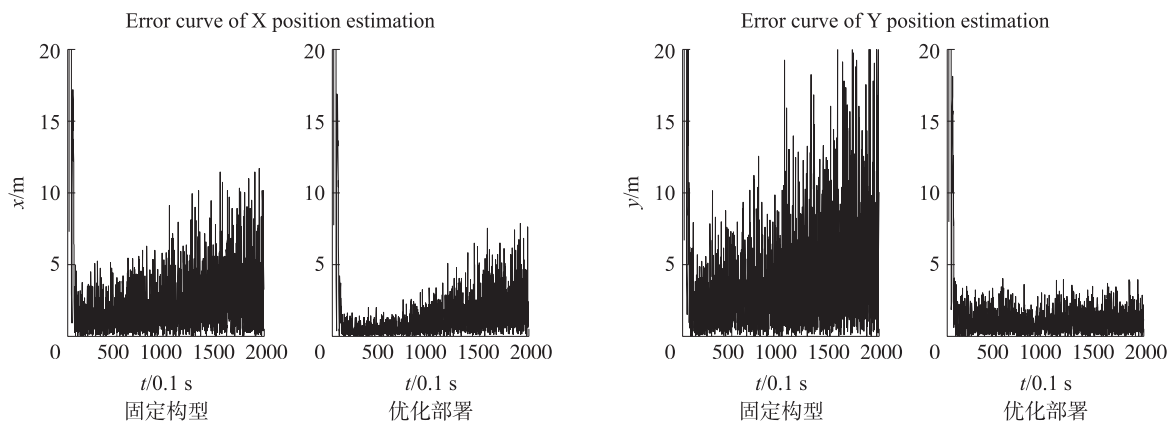


图 6 情景 3 下目标跟踪误差曲线

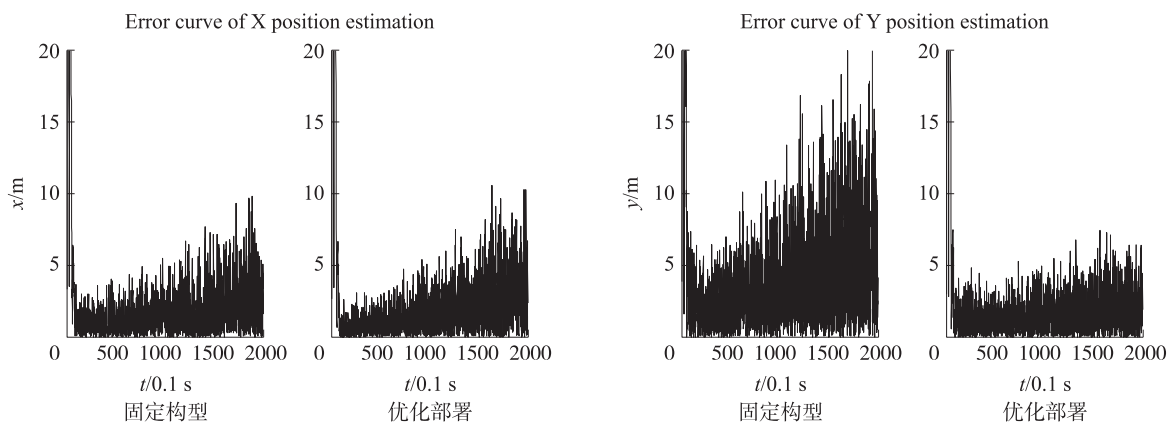


图 7 情景 4 下目标跟踪误差曲线

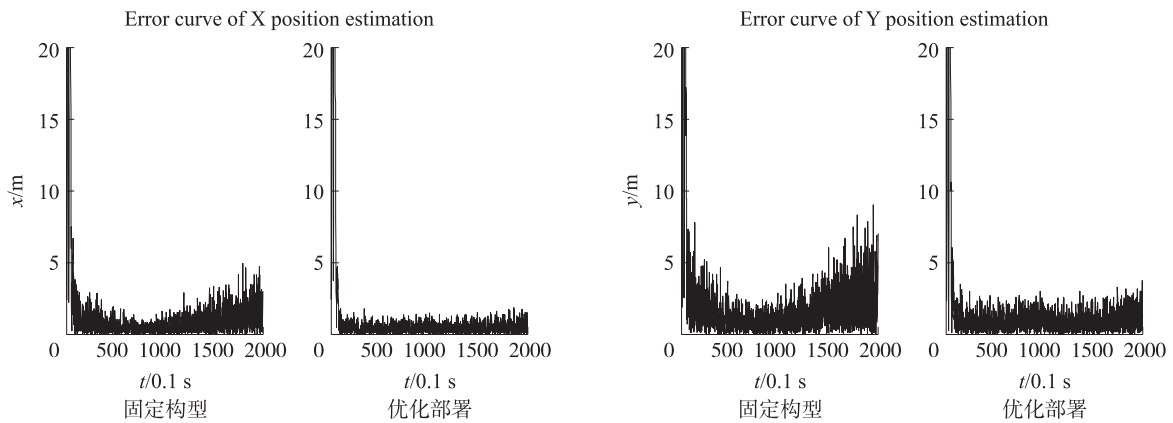


图8 情景5下目标跟踪误差曲线

表2 五种情景下观测器基线及基线偏角调整表

仿真时间/s	情景1		情景2		情景3		情景4		情景5	
	L/km	θ_1 /rad	L/km	θ_1 /rad	L/km	θ_1 /rad	L/km	θ_1 /rad	L/km	θ_1 /rad
10		0.5		0.5		0.5		0.5		
20		0.4		0.6		0.4		0.6		
30		0.4		0.6		0.3		0.8		
40		0.3		0.7		0.2		0.9		
50		0.3		0.7		0.1		1.0		
60		0.2		0.8		0		1.1		
70		0.2		0.8		6.2		1.2		
80		0.1		0.9		6.1		1.2		
90		0.1		0.9		6.0		1.3		
100	30	0.1	30	0.9	30	6.0	30	1.4	30	0.5
110		0		1.0		5.9		1.4		
120		0		1.0		5.9		1.5		
130		6.2		1.1		5.8		1.5		
140		6.2		1.1		5.8		1.5		
150		6.2		1.1		5.8		1.6		
160		6.1		1.2		5.7		1.6		
170		6.1		1.2		5.7		1.6		
180		6.1		1.2		5.7		1.7		
190		6.0		1.3		5.7		1.7		
200		6.0		1.3		5.6		1.7		

5 结论

本文针对移动平台无源传感器网络的优化部署进行研究,考虑观测器运动的可控性,在时差无源定位体制下给出了多观测器实时布站方法。该算法重点研究了基线长度和基线偏角对定位跟踪精度的影响,将其作为带优化参数推导出几何稀释精度的表达式,使用加权离散搜索算法对目标函数进行优化,实现观测器与目标间的几何关系的实时调整,使各观测器在最优观测位置完成对运动辐射源的自适应

被跟踪。该算法兼顾了跟踪精度和实时性要求,避免滤波发散,仿真结果证明其跟踪精度明显高于固定构型时。

参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝. 无线传感器网络(第一版)[M]. 北京:清华大学出版社,2005:391-392.
 [2] Hu Lingxuan, David Evans. Localization for Mobile Sensor Networks[C]//MobiCom USA; Sept,2004,26(1).
 [3] Galstyan A, Krishnamachari B. Distributed Online Localization in

- Sensor Networks Using a Moving Tar-Get [C]//Information Processing in Sensor Networks(IPSN),2004.
- [4] Zhang C, Liu J, Liu S. Research on Improving TDOA Location Accuracy Based on Data Fusion [C]//Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies, 2004, 2:761-764.
- [5] Martin-Escalona I, Barcelo-Arroyo F. Impact of Geometry on the Accuracy of the Passive-TDOA Algo-Rithm [C]//Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008, 1-6.
- [6] Musicki D, Kaune R, Koch W. Mobile Emitte Geolocation and Tracking Using TDOA and FDOA Measurements [J]. Signal Processing, 2010, 58(2):1863-1874.
- [7] Li W C, Wei P, Xiao X C. TDOA and T2/R Radar Based Target Location Method and Performance Analy-Sis [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2005, 152(3):219-223.
- [8] Kbar G, Mansoor W. Mobile Station Location Based on Hybrid of Signal Strength and Time of Arrival [C]//Proc Int Conf on Mobile Business, 2005 :585-591.
- [9] 王成,李少洪.测时差定位系统定位精度分析与最优布局 [J].火控雷达技术, 2003, 32(1):1-6.
- [10] 王中杰,李侠,周启明,等.基于多约束条件遗传算法的雷达网优化部署 [J].系统工程与电子技术, 2008, 2(30):2265-268.
- [11] 孙仲康,周一宇,何黎星.单多基地有源无源技术 [M].北京:国防工业出版社, 1996.
- [12] 邢益临.机载无源雷达组网定位技术研究 [D].国防科技大学, 2005.
- [13] 王瀚.机载多平台时差无源定位系统若干关键技术研究 [D].国防科学技术大学, 2004.
- [14] Yang Lin, Zhou Yiyu, Sun Zhongkang. Passive Location Using TDOA Information in Multistations [J]. Chinese Journal Of Aeronautics, 1998, 11(1):37-43.
- [15] Sivazlian B D, Green R E. Effect of Instrument Siting and Coordinate Selection on GDOP in Target Tracking [R]. AD/A-03183.



顾晓婕(1983-),女,汉,安徽,博士生,主要研究方向为雷达组网无源定位跟踪、观测器轨迹优化, guxiaojie@ mail. nwpu. edu. cn;



王新民(1951-),男,汉,江苏,博士,教授,博士生导师为主要研究方向为先进控制技术及应用,参数优化理论与方法, wxmin@ nwpu. edu. cn。