

文章编号: 1001-0920(2011)06-0873-06

基于多模型切换的多观测器轨迹优化研究

顾晓婕, 王新民, 李 俨

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 充分考虑辐射源信号覆盖范围带来的观测约束, 提出一种基于动态区间划分的多模型切换轨迹优化算法. 该算法根据可探测区域内的观测器构造子区间划分特征向量, 在不同的控制层使用相应的切换策略分别设计观测器运动规则、构造性能指标函数. 根据设定的目标优化函数, 在切换子层综合多种优化算法分别对不同的观测器进行轨迹优化. 仿真表明, 该方法能够有效解决观测约束下的匀速运动目标轨迹优化问题, 具有一定的工程应用价值.

关键词: 轨迹优化; 多模型切换; 切换策略; 区间划分; 观测约束

中图分类号: TN953

文献标识码: A

Optimization of trajectories based on multiple models switching system

GU Xiao-jie, WANG Xin-min, LI Yan

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: LI Yan, E-mail: liyan@nwpu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the observation constraints of the signal of emitter, a multi-model switching trajectory optimization algorithm based on dynamic range partitioning is proposed. The algorithm constructs a subinterval partition feature vector according to the observers in the detectable region to divide the region. Then the corresponding switching strategy is applied according to different control layer. Meanwhile, this paper designs the movement rules and structures performance index function based on the switching strategy. According to objective optimization function, the optimization trajectory of different observer can be obtained by applying a variety of optimization algorithms in the switching sub-layer. Simulation results show that the method can effectively solve the trajectory optimization problems of the uniform motion target under the observation constraints, with some engineering application value.

Key words: optimization of trajectories; multiple models switching; switching strategy; region partitioning; observation constraints

1 引言

多观测器轨迹优化是指采用一定的优化方法, 协同控制观测器载体的运动以创造一个最优或次优的观测器——目标几何关系, 使得对目标的定位跟踪精度尽可能地高.

作为一个状态估计与最优控制相结合的问题, 观测器轨迹优化产生之初是为了解决单站无源测角系统的可观性或弱观测性问题. 许多研究者试图用最优控制理论或动态规划、马尔可夫链、微分包含、交互多模型等方法, 在一定的性能指标下 (Fisher 信息阵 (FIM) 或其 Cramér-Rao 限 (CRLB) 最大、位置估计协方差的迹最小、方位变化率最大等) 解决最优轨迹问题, 并已取得了一些进展^[1-7], 但研究均是在假定目标辐射源为全向传感器且观测器载体机动对传感器

无约束的条件下进行的. 当敌辐射源载体为战斗机时, 载体具有较高的机动性, 且观测传感器一般为工作频段较高的火控雷达, 所以对我方传感器接收天线而言, 其可探测信号的覆盖域是一个有限的空间区域. 在由空间上分离的多观测器组成的移动传感器网络中, 不同时刻位于探测范围内的观测器个数是不同的, 即多观测器不一定能同时接收到目标的辐射信号. 此时, 需要设计一种新的多观测器自适应运动方法来满足实际工程约束.

本文借鉴切换控制系统和分层递阶控制的相关理论和方法, 首先根据处于可探测区域内的观测器构造子区间划分的特征向量; 然后设计一种直接切换和间接切换相结合的层次性切换控制策略, 在不同切换策略下分别设计观测器运动规则并构造性能指标函

收稿日期: 2010-03-08; 修回日期: 2010-05-22.

作者简介: 顾晓婕(1983—), 女, 博士生, 从事雷达资源管理及数据融合的研究; 王新民(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进控制技术及应用、传感器管理等研究.

数;最后根据设定的目标优化函数,在切换子层综合多种优化算法对不同的观测器进行轨迹优化.该方法有效解决了观测约束下的匀速运动目标轨迹优化问题,实现了多观测器被动跟踪下的观测器自适应运动控制.

2 观测器目标优化函数

文献[8]在对被动跟踪系统的可观测性进行分析的基础上,首次提出了系统可估计性概念,并将其定义为 $\det(\mathbf{FIM})$,轨迹优化的目的是提高系统的可估计性.由于 \mathbf{FIM} 的逆表示状态估计精度的下界^[9],采用任何与定位跟踪精度相关的量来表示可估计性均是有效的.

在使用扩展卡尔曼滤波得到目标状态估计时,有 $P(k|k) = E[(X(k|k) - \hat{X}(k|k))(X(k|k) - \hat{X}(k|k))^T]$.

式(1)反映出每一拍状态估计值与真实值的信息,即状态估计误差的大小,因此本文选择 $\text{GDOP}^2(k) = \text{trace}(P(k|k))$ 作为观测器轨迹优化函数,以期得到每个采样时刻使 $\text{GDOP}^2(k)$ 最小的观测器位置.

证明 对于无源定位跟踪系统,采用如下离散非线性模型:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= FX(k) + G_k U(k) + W(k), \\ Z(k) &= h(X(k)) + V(k). \end{aligned} \quad (2)$$

该系统关于 k 时刻当前估计量 $\hat{X}(k|k)$ 的 \mathbf{FIM} 为

$$\mathbf{FIM}(k, k) = \sum_{i=0}^k (H_i F^{k-i})^T R_k^{-1} (H_i F^{k-i}). \quad (3)$$

其中: $H_i = \nabla_{x(i)} h^T(X(k))$, $R_k = \text{cov}(V(k))$.若 F 为四阶单位阵,则式(2)可简化为

$$\mathbf{FIM}(k)^{-1} = \left(\sum_{i=0}^k H_i^T R_k^{-1} H_i \right)^{-1}. \quad (4)$$

采用EKF对式(2)进行估计,满足^[10]

$$P^{-1}(k|k) = P^{-1}(k|k-1) + H^T(k)R^{-1}(k)H(k).$$

$$P^{-1}(k|k-1) = P^{-1}(k-1|k-1) + H^T(k)R^{-1}(k)H(k).$$

$$P^{-1}(0|0) = \begin{cases} 0, & \text{无先验信息;} \\ P_0^{-1}, & \text{有先验信息.} \end{cases} \quad (5)$$

在无先验信息的条件下,有

$$P(k|k) = \mathbf{FIM}(k)^{-1} = \text{CRLB}(k). \quad (6)$$

因此,选择 $\text{GDOP}^2(k) = \text{trace}(P(k|k))$ 作为目标优化函数,与系统的可估计性和状态估计精度密切相关,能够反映出对目标的定位跟踪误差.□

在基于测向信息的多观测器目标被动跟踪问题中,设系统状态向量为 $X = (x, y, z)^T$,则观测方程为

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \\ \begin{bmatrix} \alpha_i(k) \\ \beta_i(k) \end{bmatrix}_{2n \times 1} &= \begin{bmatrix} \arctan(y_{ik}/x_{ik}) \\ \arctan \frac{z_{ik}}{\sqrt{x_{ik}^2 + y_{ik}^2}} \end{bmatrix} + V(k). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik})^T$ 为观测器 i 在 k 时刻相对于目标的位置; $V(k)$ 为零均值量测噪声向量,其协方差矩阵为 $R(k)$.

由式(7)在滤波预测位置 $\hat{X}(k|k-1) : (x, y, z)^T$ 处线性化得到

$$H(k) = \frac{\partial \theta[\hat{X}(k|k-1)]}{\partial \hat{X}(k|k-1)} = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \alpha_i}{r_i} & \frac{\cos \alpha_i}{r_i} & 0 \\ \frac{r_{ixy}}{r_i} \cos \alpha_i \sin \beta_i & -\frac{r_{ixy}}{r_i} \sin \alpha_i \cos \beta_i & -\frac{\cos \beta_i}{r_i} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中: r_i 和 r_{ixy} 分别为观测器 i 相对于目标预测位置 $\hat{X}(k|k-1)$ 的距离及其在 xy 平面上的投影,有

$$\begin{aligned} r_{ixy} &= ((x(k|k-1) - x_{oi}(k))^2 + \\ & (y(k|k-1) - y_{oi}(k))^2)^{\frac{1}{2}}, \\ r_i &= ((x(k|k-1) - x_{oi}(k))^2 + (y(k|k-1) - \\ & y_{oi}(k))^2 + (z(k|k-1) - z_{oi}(k))^2)^{\frac{1}{2}}; \end{aligned} \quad (9)$$

α_i 和 β_i 为观测器 i 相对目标预测位置 $\hat{X}(k|k-1)$ 的方位角和俯仰角,有

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \arctan \frac{y(k|k-1) - y_{oi}(k)}{x(k|k-1) - x_{oi}(k)}, \\ \beta_i &= \arctan \frac{z(k|k-1) - z_{oi}(k)}{r_i}. \end{aligned} \quad (10)$$

设观测器载体的飞行速度为 v_{oi} ,俯仰角为 β_{oi} ,偏航角为 α_{oi} ,则 k 时刻第 i 个观测器的位置为

$$\begin{aligned} x_{oi}(k) &= x_{oi}(k-1) + v_{oi}T \cos \beta_{oi} \cos \alpha_{oi}, \\ y_{oi}(k) &= y_{oi}(k-1) + v_{oi}T \cos \beta_{oi} \sin \alpha_{oi}, \\ z_{oi}(k) &= z_{oi}(k-1) + v_{oi}T \sin \beta_{oi}. \end{aligned} \quad (11)$$

将式(7)~(11)带入(4)中,将目标优化函数 $\text{GDOP}^2(k)$ 表示为一个包含观测器载体航向和速度信息的表达式.每个采样时刻,要在观测器众多“可能的位置”中寻找使 $\text{GDOP}^2(k)$ 最小的位置,即将 $\text{GDOP}^2(k)$ 最小化问题转化为多维非线性最优化问题.

3 子区间的获取

区间划分是解决复杂和突变系统的一种有效方法.通过对区间进行划分,针对不同的子区间使用不同的观测器运动规则,并设计相应的轨迹优化算法使每个子区间分而治之,有效降低了系统的复杂度.

针对二维平面上两观测器的测向无源定位跟踪过程,选择敌机辐射信号范围内可进行探测的观

测器作为特征矢量 ϑ , 构成一个离散事件状态集合 $\Omega : \{(1, 1), (1, 0), (0, 1), (0, 0)\}$. 由于切换系统不同子区间之间不存在动态特性过渡过程, 使用基于区间硬划分的方法^[11]对整个系统动态区间 Ω 进行合理划分, 得到 4 个工作区域 $\{\Omega_i\}_{i=1}^4$, 均满足下式:

$$\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4 = \Omega, \Omega_i \cap \Omega_{i'} = \emptyset, \quad (12)$$

$$i, i' \in \{1, 2, 3, 4\} \text{ 且 } i \neq i'.$$

其中: Ω 为整个系统的动态区间; $\Omega_i, \Omega_{i'}$ 为第 i, i' 个动态子区间. 具体划分方法如下: 假设敌机火控雷达作用距离为 l , 方位扫描范围为 $[\theta_1, \theta_2]$, 忽略机载雷达天线安装角误差. 设 k 时刻目标的状态估计为 $\hat{X}_t(k) = [x_t, y_t, vx_t, vy_t]^T$, 则此时辐射源雷达的信号覆盖范围可表示为由 l_1, l_2 组成的扇形区域, 如图 1 所示. 图 1 中, l_1 和 l_2 的直线方程分别为

$$y_1 = k_1(x_1 - x_t) + y_t, \quad (13)$$

$$k_1 = \frac{vx_t \sin \theta_1 + vy_t \cos \theta_1}{vx_t \cos \theta_1 - vy_t \sin \theta_1};$$

$$y_2 = k_2(x_2 - x_t) + y_t, \quad (14)$$

$$k_2 = \frac{vx_t \sin \theta_2 + vy_t \cos \theta_2}{vx_t \cos \theta_2 - vy_t \sin \theta_2}.$$

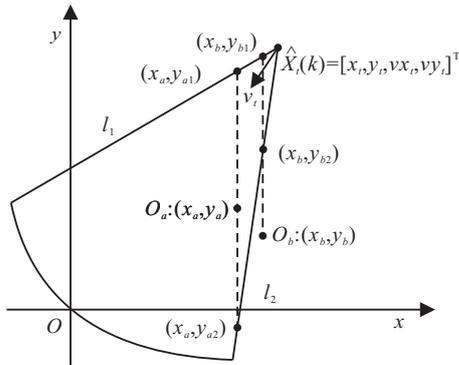


图 1 动态子区间划分图

假设观测器 A 的位置为 $O_a : (x_a, y_a)$, 观测器 B 的位置为 $O_b : (x_b, y_b)$, 将 x_a, x_b 代入式 (13) 计算得到 y_{a1}, y_{b1} , 代入式 (14) 计算得到 y_{a2}, y_{b2} . 由以上计算可得各子区划分条件为

- $\Omega_1, \vartheta = (1, 1) : y_{a2} < y_a < y_{a1}, y_{b2} < y_b < y_{b1};$
- $\Omega_2, \vartheta = (1, 0) : y_{a2} < y_a < y_{a1}, (y_b > y_{b1} \text{ 或 } y_b < y_{b2});$
- $\Omega_3, \vartheta = (0, 1) : (y_a > y_{a1} \text{ 或 } y_a < y_{a2}), y_{b2} < y_b < y_{b1};$
- $\Omega_4, \vartheta = (0, 0) : (y_a > y_{a1} \text{ 或 } y_a < y_{a2}),$
 $(y_b > y_{b1} \text{ 或 } y_b < y_{b2}).$

4 切换控制策略

目前常用的切换控制策略有直接切换法和间接切换法两种^[12]: 直接切换法首先判断连续动态系统当前处于哪一个子区间或子过程, 中间不经过过渡, 将被控对象的输入直接切换到相对应的子控制器

的输出上; 间接切换法根据性能指标(二次型性能指标、积分型和范数型)切换函数值, 选择与实际被控对象最接近的模型, 并将基于此模型的控制器的切换为当前控制器.

对于由多个动态子区间组成的轨迹优化切换系统而言, 若同时考虑位于敌机信号辐射范围外的观测器轨迹控制和辐射范围内的观测器轨迹优化, 则切换将呈现出多层次(2层)的特点, 即切换发生在系统的不同层次中以及同一层次的不同子系统中. 单纯地直接切换和间接切换已不能完全表述该复杂的切换系统, 考虑到系统不同层次的动态特性, 提出了一种混合切换策略, 即在飞行轨迹控制层使用直接切换方法, 在观测器轨迹优化层使用基于加权的间接切换方法. 借鉴分层递阶控制的层次构造法给出了多观测器运动切换系统的结构, 如图 2 所示.

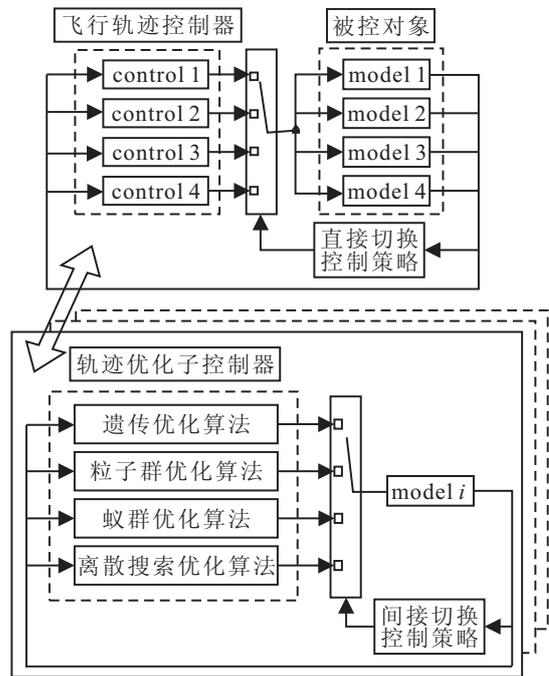


图 2 多观测器运动轨迹切换控制系统优化图

在飞行轨迹控制层, 依据系统子区间的动态特性分析构造得到特征矢量 ϑ , 由此可以确定当前系统属于哪个工作状态, 即可确定敌机探测范围内的两观测器运动规则. 控制器的具体行为如下:

1) $\vartheta = (1, 1)$ 表示两观测器 A, B 均可获得目标的有效方位量测. Control 1 直接进入轨迹优化子控制器对两观测器运动轨迹进行优化, 通过调整观测器间及观测器与目标间的几何关系获得目标的最小定位跟踪误差.

2) $\vartheta = (1, 0)$ 表示观测器 A 可获得目标的有效方位量测, 而观测器 B 在辐射源信号覆盖范围之外. Control 2 首先控制观测器 B 沿垂直于信号覆盖边界的最近轨迹向可探测区域运动, 同时观测器 A 进入轨

迹优化子控制器进行优化,在有限时间 T_B 内通过控制自身机动减小目标的定位跟踪误差,提高可观测性,同时等待观测器B进入。

3) $\vartheta = (0, 1)$ 表示观测器B可获得目标的有效方位量测,而观测器A在辐射源信号覆盖范围之外。Control 3 动作与 Control 2 相似,此略。

4) $\vartheta = (0, 0)$ 表示观测器A和B均在辐射源信号覆盖范围之外,无法获得有效量测。Control 4 控制观测器A和B沿垂直于信号覆盖边界的最近轨迹向可探测区域运动,以尽快获得有效量测。

在观测器轨迹优化子层中,由于滤波误差协方差的迹能够直接反映目标的定位跟踪精度,同时考虑到轨迹优化的实时性,将利用不同优化算法计算得到的 k 时刻滤波误差协方差的迹 $\text{trace}(P)$ 和运算时间 T_{oi} 进行加权,构造性能指标函数为

$$J_i(k) = \omega_1 \text{trace}(P_i(k)) + \omega_2 T_{oi}, i \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (15)$$

在每个采样时刻 k ,根据 $J_i(k)$ 的最小值转换到相应的轨迹优化算法 i ,有 $i = \arg \min_{i \in \{1, 2, 3, 4\}} \{J_i(k)\}$ 。

5 基于区间切换的轨迹优化算法结构

综合以上几点,给出基于多模型切换的多观测器轨迹优化算法的具体流程,如图3所示。

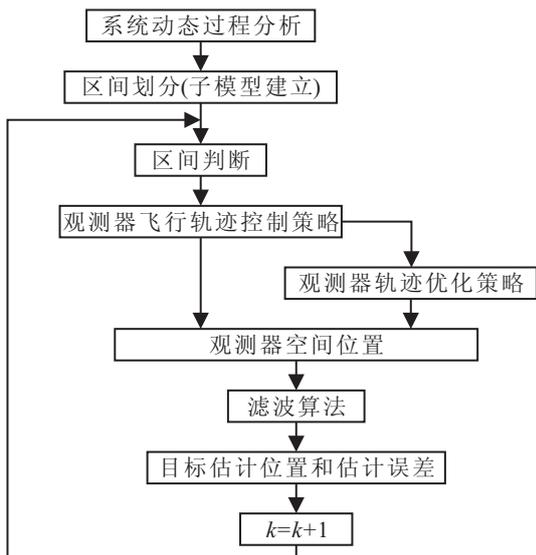


图3 多模型切换多观测器轨迹优化算法流程

Step 1: 在分析系统动态过程的基础上,使用区间硬划分方法分别建立4个子区间模型;

Step 2: 根据特征矢量 ϑ 确定当前系统属于哪个工作状态,即区间判断;

Step 3: 根据切换策略分别在飞行轨迹控制层和观测器轨迹优化子层中对观测器轨迹进行控制和优化,得到各观测器 k 时刻的航向和速度,即最佳观测位置;

Step 4: 观测器飞行一个采样间隔 T ,在最佳位置

对目标进行测量,并利用 k 时刻各观测器对于目标的测量信息,经扩展卡尔曼滤波器估计出 k 时刻目标的位置和预测位置;

Step 5: 令 $k = k + 1$,进入 Step 2 进行循环。

6 仿真结果及分析

6.1 仿真条件

以两观测器二维测向定位跟踪系统为例,假设测量噪声符合零均值高斯分布,测量时间间隔 $T = 1$ s,方位角测量精度为 0.8° , $\omega_1 = 0.7$, $\omega_2 = 0.3$, $\theta_i = -\pi/6$, $\theta_2 = \pi/6$, $l = 100$ km. 设目标辐射源初始位置为 $(100, 50)$ (km),以 $V_x = -0.4$ km/s, $V_y = -0.2$ km/s 在平面内做匀速直线运动, $5\%R = 5.6$ km. 根据不同的动态区间分别设定观测器初始位置。

仿真条件1: 两观测器初始位置均在可观测区域内, $OA(-10, 10)$ (km), $OB(10, -10)$ (km)。

仿真条件2: 观测器A的初始位置在可观测区域内, B在可观测区域外, $OA(50, 10)$ (km), $OB(80, 10)$ (km)。

假设两观测器均以 0.5 km/s的速度做匀速直线运动,使用基于多模型切换的轨迹优化算法对观测器航向进行优化及控制,并与单独使用遗传和粒子群的轨迹优化算法进行仿真对比。

6.2 仿真结果

6.2.1 仿真条件1

图4为3种优化算法下位置和速度的误差曲线(仿真条件1)。图4(a)对 x 轴上和 y 轴向上的位置跟踪误差分别进行描述,图4(b)给出整个 xy 平面内对于目标的位置跟踪误差。通过比较可以看出,基于多模型切换的观测器轨迹优化方法对于目标的跟踪精度明显高于其他两种优化算法。表1给出了3种方法的跟踪均方误差对比,同时定义误差收敛时间 t_s 为位置跟踪误差首次进入相对误差带 $(0 \sim 5\%R)$ 内并保持收敛的时间。从表1可以看出,基于多模切换的轨迹优化算法的误差收敛速度明显快于另外两种算法。

图5给出了两观测器初始位置均在目标可探测范围内,使用不同优化算法得到的观测器运动轨迹(仿真条件1),其中虚线、实线和圆圈分别表示遗传、粒子群和多模型切换优化算法下的观测器运动轨迹。可以看出,使用不同优化算法得到的观测器运动轨迹存在一定差别,但其总体运动趋势是一致的,即当观测器飞行速度恒定、航向可任意改变时,位于目标可探测范围内的两观测器的早期运动轨迹是一种类似“圆”运动,当任意观测器超出可探测范围时,另一观测器做“折线运动”快速接近目标,进行单观测器目标跟踪。

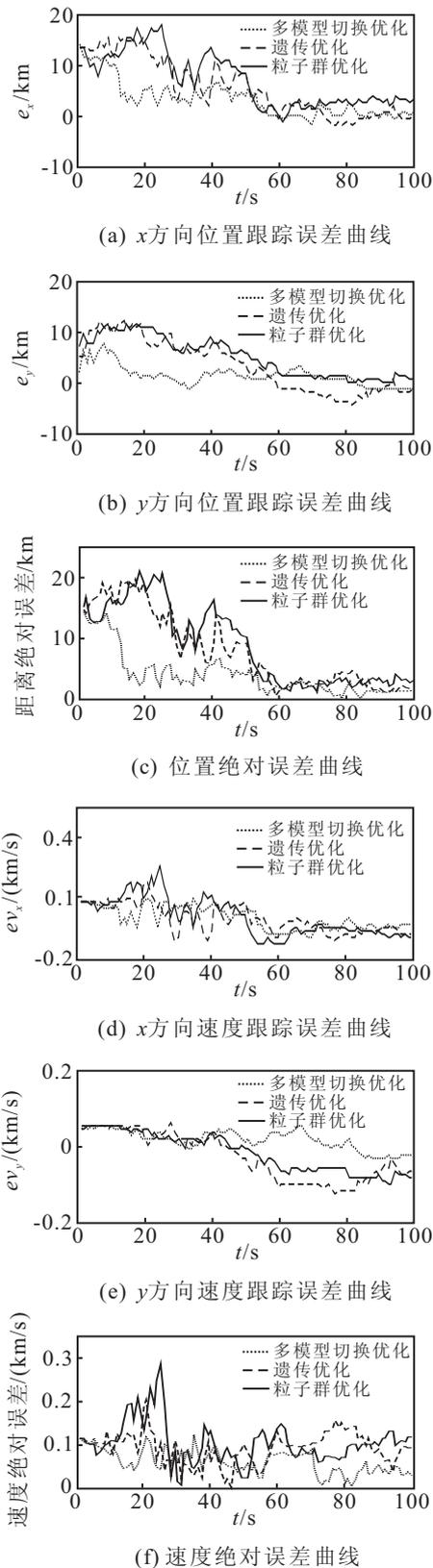


图4 基于不同优化算法的跟踪误差比较(仿真条件1)

表1 不同算法下的位置均方误差和误差收敛时间比较(仿真条件1)

算法	MSE/km	t_c/s
遗传优化	10.05	52
粒子群优化	10.84	51
多模型切换优化	5.30	13

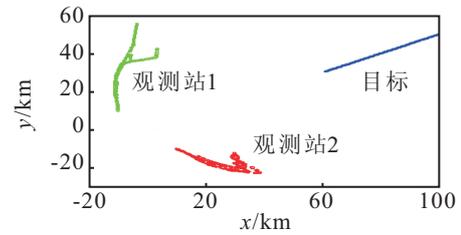


图5 观测器轨迹运动曲线(仿真条件1)

6.2.2 仿真条件2

图6为3种优化算法下位置和速度的误差曲线

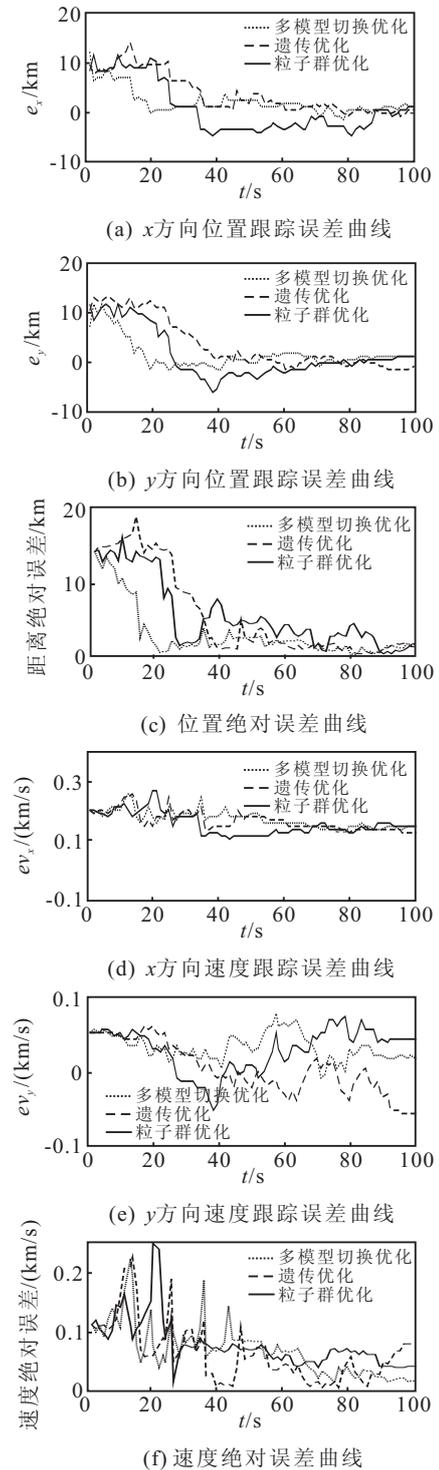


图6 基于不同优化算法的跟踪误差比较(仿真条件2)

(仿真条件 2). 由图 6 可见, 使用多模型轨迹优化方法得到的目标跟踪位置误差明显小于其他两种算法, 因此, 有效提高了定位跟踪精度和滤波收敛速度. 具体的跟踪均方误差和误差收敛时间对比见表 2.

表 2 不同算法下的位置均方误差和误差收敛时间比较(仿真条件 2)

算法	MSE/km	t_c/s
遗传优化	8.05	27
粒子群优化	7.13	20
多模型切换优化	4.48	11

图 7 给出了仿真条件 2 下任意观测器初始位置不在目标可探测范围内时, 不同优化算法下的观测器运动轨迹. 由图 7 可见, 使用遗传和粒子群优化算法得到的观测器轨迹存在局部最优, 表现为位于可观测范围内的观测器以类似“圆”运动的方式接近目标辐射源; 使用多模型切换的轨迹优化算法, 可测观测器以最快的速度几乎是直线接近目标. 对于超出可探测范围的另一观测器, 3 种优化算法得到的轨迹基本相似, 即按照飞行轨迹控制层设计的轨迹控制规则使其快速回到可观测域内.

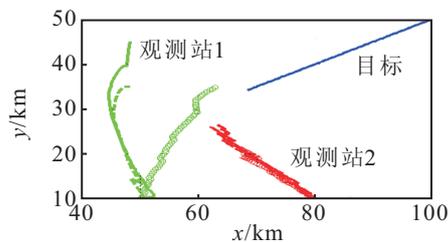


图 7 观测器轨迹运动曲线(仿真条件 2)

7 结 论

本文提出了一种基于动态区间划分的多模型切换轨迹优化控制方法. 该方法可以在一定的观测约束下, 通过飞行轨迹控制和轨迹优化控制以最快的速度使尽可能多的观测器位于可测范围内, 从而实现对目标的被动跟踪. 由轨迹优化结果可以看出, 当目标辐射源为战斗机时, 观测器飞行轨迹主要采取迎头接敌的方式, 这样才能保证组网飞机的天线主瓣截获敌机发射的主瓣信号, 在窄波对窄波的发射-接收条件下有效解决了匀速运动目标辐射源的可观测性问题, 具有较大的工程实用性.

参考文献(References)

[1] Yaakov Oshman, Pavel Davidson. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 892-902.

[2] Rui L Y, Xu Z. A fast global node selection algorithm for bearings-only target localization[J]. Chinese J of Aeronautics, 2008, 21(1): 61-70.

[3] Farhad Ghassemi, Vikram Krishnamurthy. A method for constructing the observer trajectory in bearings-only tracking of targets with a Markovian model[C]. Proc of the 2005 IEEE Int Conf on Information Acquisition. Hong Kong: IEEE Robotics and Automation Society, 2005.

[4] Kaplan L M. Global node selection for target localization in a distributed network of bearings-only sensors[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 113-135.

[5] 邓新蒲, 周一宇, 卢启中. 测角无源定位与跟踪的观测器自适应运动分析[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 311-314. (Deng X P, Zhou Y Y, Lu Q Z. Adaptive observer maneuver analysis for bearings-only tracking [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 311-314.)

[6] 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[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(4): 47-49. (Dai Z H, Deng X P. A geometrical method for optimization of trajectory based on maximizing azimuth changing rate[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007, 23(4): 47-49.)

[7] 张益. 被动式跟踪中轨迹优化问题的研究[J]. 火控雷达技术, 2004, 33(4): 5-10. (Zhang Y. A study on optimizing trajectory in passive tracking[J]. Fire Control Radar Technology, 2004, 33(4): 5-10.)

[8] Cadre J P, Jauffret C. Discrete-time observability and estimability analysis for bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1997, 33(1): 178-201.

[9] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory[M]. London: Prentice Hall PTR, 1993.

[10] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. (He Y, Xiu J J, Zhang J W, et al. Radar data processing with application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.)

[11] Roderiek M S, Tor A J. Multiple model approaches to modeling and control[M]. London: Taylor and Francis, 1997.

[12] 吴锋, 刘文煌, 郑应平. 混杂系统方法及其在过程控制中的应用[J]. 清华大学学报, 1997, 37(11): 77-81. (Wu F, Liu W H, Zheng Y P. Hybrid system methodology and its application in process control systems[J]. J of Tsinghua University, 1997, 37(11): 77-81.)