

## 雷达辅助光电跟踪系统协同跟踪算法

王维佳<sup>1</sup>, 柏 鹏<sup>2</sup>, 梁晓龙<sup>3</sup>, 张佳强<sup>3</sup>

- (1. 空军工程大学 装备管理与安全工程学院, 陕西 西安 710051;
2. 空军工程大学 装备管理与运用研究中心, 陕西 西安 710051;
3. 空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:** 针对光电跟踪系统对目标探测过程中发生的不完全量测现象, 采用雷达辅助光电跟踪系统进行协同跟踪保证量测的连续性。首先给出光电跟踪系统的不完全量测模型以及雷达辅助下的协同互牵引模型, 提出基于粒子滤波的序贯融合算法; 其次, 利用粒子滤波求取传感器在每一时刻的 Renyi 信息增量作为协同过程互牵引准则, 确定互牵引触发时机, 确保协同过程的自主性。仿真结果表明: 通过选择合适的互牵引门限, 能够在尽量少的雷达辐射的条件下改善对目标跟踪性能并保证对目标探测的稳定性。

**关键词:** 光电跟踪系统; 不完全量测; 协同跟踪; Renyi 信息增量; 互牵引  
**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1217006

## Cooperative tracking algorithm of radar aided optic-electric tracking system

Wang Weijia<sup>1</sup>, Bai Peng<sup>2</sup>, Liang Xiaolong<sup>3</sup>, Zhang Jiaqiang<sup>3</sup>

- (1. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Equipment Development and Application Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In allusion to the situation in which optic-electric tracking system tracking targets with intermittent observations, cooperative tracking with radar was proposed to ensure the constant of measurements. Firstly, the intermittent measurement model of optic-electric tracking system and the cross cueing model in cooperation between optic-electric tracking system and radar were established, multi-sensor sequence fusion algorithm based on particle filter was proposed. Secondly, Renyi information gain at each time was acquired by particle filter to be cross cueing criterions which determine the triggering time and ensure the autonomous cooperation. Simulation results show that this method can achieve a desired and stable tracking performance through selecting a suitable cross cueing threshold, under the condition of minimum radar radiation time.

**Key words:** optic-electric tracking system; intermittent observations; cooperative tracking; Renyi information gain; cross cueing

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61472442, 61472443); 陕西省自然科学基金(2016JM6071)

作者简介: 王维佳(1990-), 男, 博士生, 主要从事信息融合、传感器资源管理方面的研究。Email: visionwng@foxmail.com

导师简介: 柏鹏(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子战信息处理方面的研究。Email: Bpeng@163.com

## 0 引言

在实际的探测过程中由于障碍物遮挡、气象环境恶劣、目标强机动、量测数据的偶然性丢失等因素的影响,光电跟踪系统会出现不完全量测现象。此时传感器的量测信息中也相应出现了野值和漏测值,使得对信息中目标状态的估计变得更加困难,该问题被称为不完全量测估计问题。Sinopoli B<sup>[1]</sup>对不完全量测下 Kalman 滤波误差协方差的统计收敛性进行了研究。Kluge S<sup>[2]</sup>研究了该情况下扩展 Kalman 滤波的稳定性。陈黎<sup>[3]</sup>等研究了光电跟踪系统中存在不完全量测下的临界探测概率以及基于后验置信度的联邦目标跟踪滤波器,提高了跟踪系统的性能。胡振涛<sup>[4]</sup>给出了不完全量测下估计误差协方差与传感器精度上、下界的关系,并给出了多传感器不完全量测的机动目标跟踪与融合算法。

当前对光电跟踪系统的估计通常采用量测转换卡尔曼滤波 (Converted Measurements Kalman Filter, CMKF) 和无迹滤波。但是,当系统探测概率的下降时,统计意义下的估计误差协方差发散,跟踪精度达不到要求甚至会引起目标丢失。因此,当光电跟踪系统在发生不完全量测时,采用雷达辅助量测可以为光电跟踪系统补充目标信息,提高量测精度和数据率<sup>[5]</sup>。雷达与光电跟踪系统协同过程中主要需要考虑两个方面:一是雷达与光电跟踪系统协同过程中的数据处理;二是确定雷达与光电跟踪系统的互牵引时机<sup>[6]</sup>,从而保证多传感器对目标的持续跟踪。

文中主要研究当光电跟踪系统发生不完全量测,通过雷达辐射探测达到协同探测的目的。首先给出光电跟踪系统不完全量测模型,在此基础上提出雷达与光电跟踪系统协同跟踪的互牵引模型,采用基于重要性采样和递推贝叶斯理论的粒子滤波对目标状态进行估计,给出不完全量测下多传感器粒子滤波序贯融合算法。考虑不完全量测下跟踪误差协方差的不确定性,引入 Renyi 信息增量作为光电跟踪系统与雷达之间互牵引衡量指标,与协方差控制相比,Renyi 增量控制能够实现更稳定的跟踪效果。

## 1 不完全量测模型

在实际的跟踪过程中,由于战场环境中障碍物

的阻挡、气象干扰以及传感器自身性能的影响,常常会出现不完全量测的现象。光电跟踪系统的量测参数包括:目标的方位角  $\theta_k^m$ 、俯仰角  $\varphi_k^m$  以及目标斜距  $l_k^m$ , 将其转换到笛卡尔坐标系下其运动方程可以表示为:

$$X_k^i = F_k X_{k-1}^i + w_k \quad (1)$$

$$Z_k^i = d_k^i h(X_k^i) + v_k^i, i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $F_k$  为状态变量间的增益矩阵;  $w_k$  为均值为零、协方差阵为  $Q = \text{diag}(\sigma_q^2)$  的高斯噪声;  $d_k^i$  为随机变量,服从二元伯努利分布,当  $k$  时刻量测数据丢失,探测信息为无效时,  $d_k^i = 0$ ; 当存在量测时,  $d_k^i = 1$ , 其取值与探测概率  $\lambda$  有关;  $v_k$  为观测噪声, 方差为  $R^i$ 。

$$v_k^i \sim \begin{cases} N(0, R^i), d_k^i = 1 \\ N(0, \alpha^2 I), d_k^i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  取极限  $\alpha \rightarrow \infty$ 。

## 2 雷达、光电跟踪系统协同互牵引模型

对于由激光测距机与红外测角设备组成的光电跟踪系统, 其实是将量测信息分为相互独立的距离信息和角度信息<sup>[3]</sup>, 通常情况下跟踪系统的测角频率也不同于系统的测距频率, 因而可以将光电跟踪系统看作两个传感器的组合。

作为多传感器协同的重要方式, 在敌方施放干扰的情况下, 为了提高机载平台的隐蔽性, 减少雷达开机时间, 可以在雷达间歇性辅助下, 利用雷达、光电跟踪系统从而实现目标跟踪<sup>[5]</sup>。其互牵引流程如图 1 所示, 基本思想是通过误差较大、隐蔽性较好、占用资源较少的传感器牵引精度高、资源消耗大的传感器, 从而在较小的传感器资源消耗下尽可能提高目

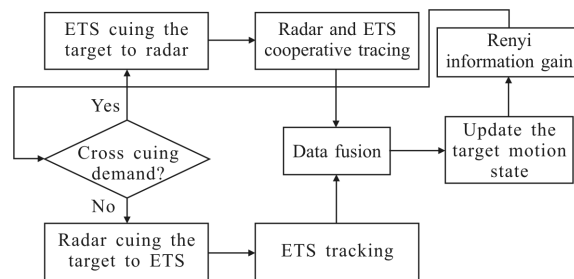


图 1 雷达、光电跟踪系统互牵引流程图

Fig.1 Flow chart of cross cuing between radar and optic-electric tracking system

标信息的完整性与可靠性。其作用主要体现在如下两个方面<sup>[7]</sup>：一是牵引其他传感器快速截获目标，为融合系统提供详细的目标信息支持；二是当某一传感器量测信息有效性降低不能完成对目标的连续探测时，通过将任务移交给其他传感器处理，确保目标持续观测或丢失后快速重新锁定。

由图 1 中可以看出，此时的雷达不再是持续的等间隔辐射，其辐射与实时的跟踪精度相关。当光电跟踪系统的量测结果达到对目标的跟踪精度要求时，雷达不进行辐射。反之，雷达与光电跟踪系统协同工作对目标进行跟踪，直至达到要求的跟踪精度。

由于光电跟踪系统发生不完全量测，假设  $d_k^1$ 、 $d_k^2$  分别为在  $k$  时刻的距离量测和角度量测，则可能出现 4 种探测情况： $d_k^1=1, d_k^2=1$ ； $d_k^1=0, d_k^2=1$ ； $d_k^1=1, d_k^2=0$ ； $d_k^1=0, d_k^2=0$ 。当距离量测和角度量测都存在时，可以直接应用 Kalman 滤波，但是当只有角度测量存在时会呈现出强非线性，线性滤波不再适用。在该条件下，采用分布式的融合算法需要对每个独立量测进行估计和更新，导致算法的复杂度急剧增大以及牵引实时性的降低。如图 2 所示，文中采用顺序处理结构集中式滤波融合模型，先到的量测先进行滤波，即序贯滤波，增加不完全量测下目标航迹的连续性。同时采用粒子滤波序贯融合算法，对不完全量测引起的非线性问题进行估计。

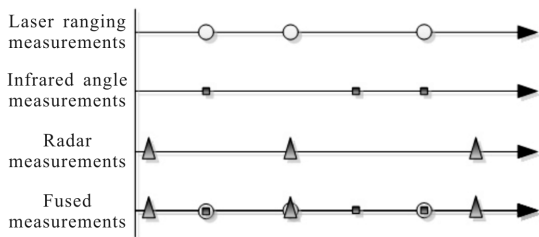


图 2 顺序处理结构的集中式融合跟踪模型

Fig.2 Centralized fusion tracking model of sequential processing structure

粒子滤波器通过寻找一组在状态空间中传播的随机样本对概率密度进行近似，以样本均值代替积分运算，从而得到目标状态最小方差估计。粒子滤波的步骤如下。

- (1) 产生粒子： $x_k^{(n)} \sim p(x_k|Z_k)$ ；
- (2) 计算权值： $\omega_k^{(n)} \propto \omega_{k-1}^{(n)} p(z_k|x_{k-1}^{(n)})$ ；

$$(3) \text{ 权值归一化: } \omega_{k-1}^{(n)} = \frac{\omega_k^{*(n)}}{\sum_{n=1}^N \omega_k^{*(n)}};$$

$$(4) \text{ 判断是否进行重采样: } \left\{ x_k^{(n)}, \frac{1}{N} \right\}_{n=1}^N \sim \{ \tilde{x}_k^{(n)}, \omega_k^{(n)} \}_{n=1}^N;$$

$$(5) \text{ 估值计算: } \hat{x}_{k|k} \approx \sum_{n=1}^N \omega_k^{(n)} x_k^{(n)}.$$

式中： $p(x_k|Z_k)$ 和  $p(z_k|x_{k-1}^{(n)})$ 分别为目标后验概率密度函数和似然函数； $N$ 为粒子数目； $x_{k-1}^{(i)}$ 为粒子； $\omega_{k-1}^{(i)}$ 为第  $i$  个粒子的权重。

当某一时刻出现多个传感器的量测时，对多传感器的量测数据进行序贯融合<sup>[9]</sup>，以粒子滤波为局部滤波器的最优无偏融合估计值为：

$$\hat{x}_{j,kl} = \sum_{j=0}^l c_j \hat{x}_{j,kl} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} c_j = \frac{\beta}{\text{tr}(p_{j,kl})} \\ p_{j,kl} = E\{(x_{j,kl} - \hat{x}_{j,kl})^T (x_{j,kl} - \hat{x}_{j,kl})\} \\ \beta = \left( \sum_{j=0}^l \frac{1}{\text{tr}(p_{j,kl})} \right)^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $j=1, 2, \dots, l$ 表示传感器的数量； $c_j$ 为融合权值； $\hat{x}_{j,kl}$ 为第  $j$  个局部滤波器的估计； $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

### 3 Renyi 信息增量控制

跟踪过程中，误差协方差可以直接反映出估计的精度与跟踪精度。协方差控制的基本思想就是对目标的预先设定一个期望的跟踪精度，即期望误差协方差，然后通过改变传感器探测模式使得跟踪中实际的误差协方差与期望协方差不断靠近，直到达到该精度并将多余的资源用于对其他目标的探测与跟踪中<sup>[10]</sup>。

假设当前空域中存在  $S$  个目标，期望协方差设为  $P_0^i$ ， $(i=1, 2, \dots, D)$ 传感器控制参数指标为  $U(t_k) = \{u(t)|u(t)=0, 1, \dots, S; t=t_1, t_2, \dots, t_k\}$ ，式中  $u(t)$ 表示传感器的控制策略，可以是传感器的工作参数或者模式，从而协方差控制模型可以定义为：

$$u(t_{k+1}) = \underset{j \in \{0, 1, \dots, M\}}{\text{argmin}} F[P_0^i, P^i(t_{k+1}|U(t_k), u(t_{k+1})=j), i=1, 2, \dots, S] \quad (6)$$

式中： $P^i(t_{k+1}|U(t_k), u(t_{k+1})=j)$ 表示在  $t_{k+1}$  时刻已知传感器

已经对目标  $j$  跟踪的条件下,对第  $i$  个目标的跟踪误差协方差,将该值与期望协方差  $P_0^i$  相比较,  $F[\cdot]$  为两者的偏差度,通常可以通过矩阵的迹进行衡量。通过计算最小的函数值,从而决定传感器在下一时刻探测方式的选取。

考虑到不完全量测下跟踪误差协方差的不确定性,需要从不同的角度对跟踪精度进行衡量。从信息论的角度,传感器的量测过程就是与战场环境相互作用从而提高信息有效性的过程,使得每一次探测都能最大程度获取信息。就目标协同跟踪而言,不同的传感器工作模式和参数对应着不同的信息增量,而此时信息增量可以通过目标状态的有效性决定,通过信息熵定量描述其有效性。因此文中应用 Renyi 熵<sup>[11]</sup>,与信息熵相比,Renyi 熵既能够直接反映出信息量的大小,同时其本身就可以作为信息的度量。

对于一个连续分布的随机变量  $X$ , 设其概率密度为  $p_X(x)$ ,则该变量的  $\alpha$  阶 Renyi 熵可以表示为:

$$H_R(X) = \frac{1}{1-\alpha} \log \int_{-\infty}^{\infty} P_X^\alpha(x) dx, \alpha > 0, \alpha \neq 1 \quad (7)$$

假设在前一时刻目标的先验概率为  $p(\cdot|Z^{k-1})$ , 经过传感器测量及滤波后得到目标的概率更新为  $p(\cdot|Z^k)$ 。由此可得 Renyi 信息增量为:

$$D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1})) = \frac{1}{\alpha-1} \ln \int p(\cdot|Z^k)^\alpha p(\cdot|Z^{k-1})^{1-\alpha} dx = \frac{1}{1-\alpha} \ln \int dX^k p(X^k|Z^k)^\alpha p(X^k|Z^{k-1})^{1-\alpha} \quad (8)$$

根据贝叶斯准则,上式可以化简为:

$$D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1})) \approx \frac{1}{1-\alpha} \ln \frac{1}{p(z)^\alpha} \sum_{p=1}^N \omega_k^{(i)} p(z|x_i) \quad (9)$$

式中:  $\omega_k^{(i)}$  为粒子滤波中第  $i$  个粒子的权重;  $x_i$  为第  $i$  个粒子的位置;  $p(z) = \sum_{p=1}^N \omega_k^{(i)} p(z|x_i)$  为传感器观测的边缘分布函数,可以通过序贯粒子滤波求得。参考文献[12]给出了  $\alpha$  取不同值时可以强调概率分布的不同部分,当两个函数的概率分布相似时,  $\alpha=0.5$  时,可以达到最佳的增量值。由公式(9)可得,  $D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1}))$  越大,表明经过探测传感器探测后获得的信息增量越大,则该传感器对跟踪精度的提升越大。假设对多传感器进行管理的过程中可以产生  $M$  个可能探测方式,则每种方式下可得到的 Renyi 信息增益为:

$$\{\bar{D}_\alpha\}_m = \int dz p(z|Z^{k-1}, m) D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1})), m \in M \quad (10)$$

在光电跟踪系统与雷达协同跟踪过程中,一方面要获取符合跟踪需要的精度指标;另一方面要尽量控制雷达的辐射。因而对于下一时刻是否发生互牵引,即雷达是否辐射是一个二元的选择问题,在这种情况下可以对上式进行简化:

$$\begin{cases} \{\bar{D}_\alpha\}_1 = p(z=0|Z^{k-1}) D_{\alpha,m,z=0} \\ \{\bar{D}_\alpha\}_2 = p(z=1|Z^{k-1}) D_{\alpha,m,z=1} \end{cases} \quad (11)$$

因此,在协同过程中需要选择合适的增量门限值:

$$D_{\alpha,thr} = \{\bar{D}_\alpha\}_1 + \eta \{\bar{D}_\alpha\}_2 \quad (12)$$

式中:  $\eta \in [0, 1]$  为控制因子,当光电跟踪系统自身探测的 Renyi 信息增量达不到需求时,牵引雷达共同探测,直到达到跟踪需求。

因此,结合粒子滤波与 Renyi 信息增量,雷达辅助光电跟踪系统的协同跟踪算法的实现步骤如下:

- (1) 计算  $k-1$  时刻目标的后验概率密度函数分布  $p(X_{k-1}|Z_{1:k-1})$ ;
- (2) 应用粒子滤波序贯融合算法计算  $k$  时刻重采样后的后验概率密度函数分布  $p(X_k|Z_{1:k})$ ;
- (3) 计算  $k$  时刻经过序贯融合后的 Renyi 信息增量  $D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1}))$ ;
- (4) 比较  $D_\alpha(p(\cdot|Z^k)||p(\cdot|Z^{k-1}))$  与设定信息增量的门限值  $D_{\alpha,thr}$ ,判断光电跟踪系统与雷达是否需要互牵引;
- (5) 令  $k \leftarrow k+1$ ,返回(1)。

## 4 仿真验证与分析

### 4.1 环境参数设置

设雷达采样周期为  $T_R=0.5$  s,测量误差为 80 m,测角精度为  $\sigma_\theta=0.5^\circ, \sigma_\varphi=0.8^\circ$ 。激光测距机采样周期为  $T_L=0.5$  s,测距误差 20 m。光电测角设备采样周期为  $T_E=1$  s,测角精度为  $\sigma_\theta=0.3^\circ, \sigma_\varphi=0.3^\circ$ 。

雷达、激光测距机、光电测角设备在正常测量时

$$\text{的量测误差分别为: } R_R = \begin{bmatrix} 80^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8^2 \end{bmatrix}, R_L =$$

$$\begin{bmatrix} 20^2 & 0 \\ 0 & 20^2 \end{bmatrix}, R_E = \begin{bmatrix} 0.3^2 & 0 \\ 0 & 0.3^2 \end{bmatrix}。$$

仿真基于粒子滤波序贯融合算法进行目标跟踪,仿真中粒子个数  $N=4000$ 。

为了验证算法有效性,选择当目标发生强机动转弯时应用雷达和光电跟踪系统协同探测。

4.2 结果与分析

根据滤波中 Renyi 信息增量度量函数, 设定互牵引控制因子完成互牵引过程。仿真分三种情况考虑在不完全量测下, 光电跟踪系统的探测概率  $\lambda$  以及控制因子  $\eta$  的不同, 对跟踪效果的影响。

4.2.1 低探测率, 低控制门限

激光测距机与光电测角设备的探测概率分别为  $\lambda_l=0.7, \lambda_e=0.7$ , 互牵引门限控制因子设为  $\eta=3$ , 得到跟踪情况如图 3 所示, 各传感器的量测时序如图 4 所示。

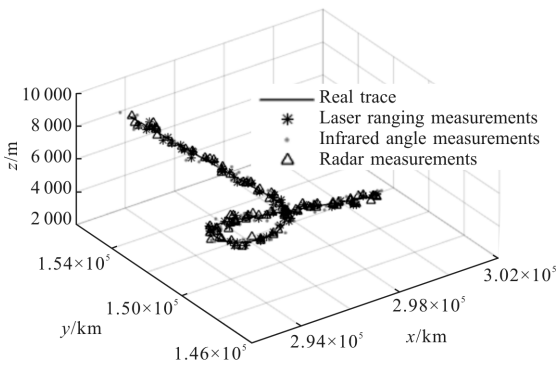


图 3 光电跟踪系统和雷达协同跟踪点迹

Fig.3 Cooperative tracking points of optic-electric tracking system and radar

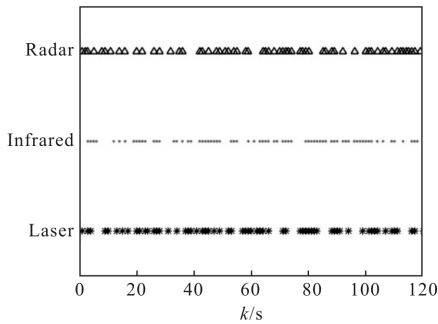


图 4  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=3$  时, 传感器量测时序

Fig.4 Measurement sequence of sensors with  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=3$

由图 4 可得, 此时激光测距机和红外测角设备在探测中发生不完全量测, 当自身的信息增量达不到门限值时, 雷达开机对目标进行持续量测, 从而提供更多的目标信息, 跟踪精度提高。当精度满足要求后, 跟踪任务继续交给光电跟踪系统执行。此时互牵引控制因子为  $\eta=0.3$ , 互牵引易于触发, 因此雷达的辐射时间也较长。图 5 给出了在雷达辐射次数相同情况下, 应用 Renyi 增量和协方差控制之后的跟踪航迹与目标真实航迹在 x 方向的绝对误差。此时采用协方差控制和 Renyi 增量控制的平均跟踪误差

分别为: 106.4 m, 65.3 m 跟踪误差的标准差分别为: 167.2 m, 58.1 m。由图 5 可知在雷达辅助量相同的情况下, 应用协方差控制在某些时刻得到的估计误差较小, 但是量测误差容易剧烈变化, 对整体的跟踪效果产生较大影响。Renyi 增量控制能够在光电跟踪系统出现不完全量测时及时牵引雷达, 尽可能因不完全量测带来的不确定性, 保证跟踪精度的稳定。

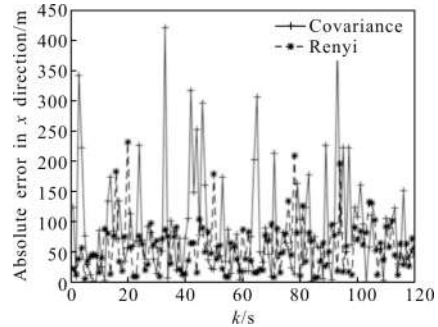


图 5  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=3$  时, x 方向跟踪误差

Fig.5 x direction tracking error with  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=3$

4.2.2 低探测率, 高控制门限

激光测距机与光电测角设备的探测概率分别为  $\lambda_l=0.7, \lambda_e=0.7, \eta=0.6$  各传感器的量测时序与对应的 x 方向的绝对误差如图 6、7 所示。

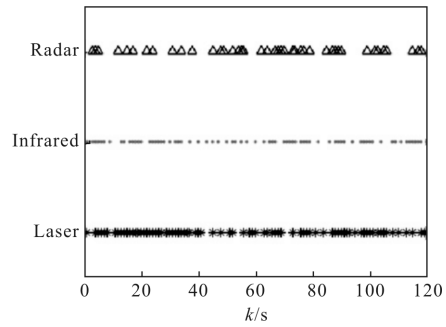


图 6  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=0.6$  时, 传感器量测时序

Fig.6 Measurement sequence of sensors with  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=0.6$

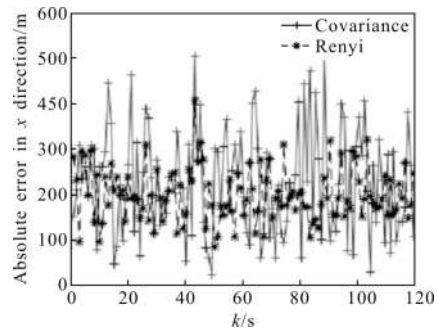


图 7  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=0.6$  时, x 方向跟踪误差

Fig.7 x direction tracking error with  $\lambda_l=\lambda_e=0.7, \eta=0.6$

与 4.2.1 小节相对比,当控制因子设为  $\eta=0.6$  意味着降低对跟踪精度的要求,对应的互牵引被触发的次数相对减少,雷达辐射时间减少。此时采用协方差控制和 Renyi 增量控制的平均跟踪误差分别为: 234.4 m, 211.9 m, 跟踪误差的标准差分别为: 125.3 m, 71.6 m。从而可得,跟踪航迹与目标真实状态的差异较大而且探测误差的稳定性变差。

#### 4.2.3 高探测率,高控制门限

激光测距机与光电测角设备的探测概率分别为  $\lambda_r=0.8, \lambda_e=0.8, \eta=0.6$ , 各传感器的量测时序与对应的  $x$  方向的绝对误差如图 8、9 所示。

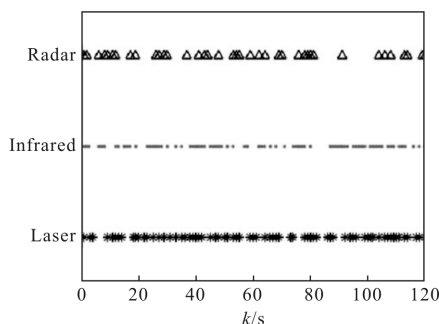


图 8  $\lambda_r=\lambda_e=0.8, \eta=0.6$  时,传感器量测时序

Fig.8 Measurement sequence of sensors with  $\lambda_r=\lambda_e=0.8, \eta=0.6$

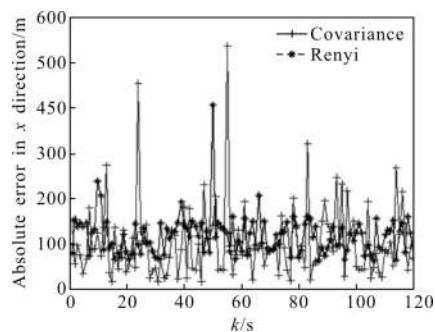


图 9  $\lambda_r=\lambda_e=0.8, \eta=0.6$  时,  $x$  方向跟踪误差

Fig.9  $x$  direction tracking error with  $\lambda_r=\lambda_e=0.8, \eta=0.6$

当 ESM 和IRST 的探测概率较大时,数据率提高,对雷达资源的需求降低,此时采用协方差控制和 Renyi 增量控制的平均跟踪误差分别为: 113.5 m, 107.1 m 跟踪误差的标准差为: 65.6 m, 32.3 m。互牵引被触发的次数相比 4.2.2 小节时减少,同时此时目标跟踪质量有较大提升。

对比前两种情况下的仿真结果,控制因子  $\eta$  变化可以改变光电跟踪系统对雷达的牵引时机,当  $\eta$  取值越小,意味着对精度的要求越高,因此互牵引被

触发的次数增加;反之次数减小,同时也会带来跟踪精度损失,甚至导致目标丢失或者滤波发散。由后两种情况的仿真结果可得,光电跟踪系统的探测概率也对互牵引的频率产生影响。

## 5 结论

协同跟踪的目标之一是以最小的资源代价尽可能取得跟踪性能的最优。文中主要针对雷达辅助不完全量测光电跟踪系统协同跟踪算法进行了研究。采用粒子滤波对目标状态进行估计,给出了不完全量测下多传感器粒子滤波序贯融合算法。考虑不完全量测下跟踪误差协方差的不确定性,引入 Renyi 信息增量作为光电跟踪系统与雷达之间互牵引衡量指标,实现更稳定的跟踪效果。同时,仿真实验表明协同过程中互牵引发生的次数和时机受到光电跟踪系统的探测概率  $\lambda$  以及控制因子  $\eta$  的影响,实际应用中应当综合考虑任务需求和战场环境需要设定合理的控制因子。

## 参考文献:

- [1] Sinopoli B, Schenato L, Franceschetti L M, et al. Kalman filtering with intermittent observations[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1453-1464.
- [2] Kluge S, Reif K, Brokate M. Stochastic stability of the extended Kalman filter with intermittent observations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(2): 514-518.
- [3] Li Chen, Wang Zhongxu. Research on data mining of redundant angle information in optic-electric tracking system with intermittent observations [J]. *Acta Armamentaria*, 2011, 32(7): 819-826.
- [4] Li Song, Hu Zhentao. Multi-sensor information fusion motivate target tracking algorithm based on missing measurements [J]. *Computer Science*, 2013, 40(8): 277-281.
- [5] Li Anping, Jing Zhongliang, Hu Shiqiang. The passive tracking system with active assistance [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(12): 2048-2051.
- [6] Zhang Huarui, Yang Hongwen, Yu Wenxian. The handoff method of IRST and radar under multi-target scenario [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1101-1106.
- [7] Wang Weijia, Xu Yunshan, Tang Shujuan. Triggering criterions of passive sensors cueing and handoff a radar[C]//

- IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015(7): 7494416.
- [8] Aughenbaugh J M, Lacour B R. Sensor management for particle filter tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 503–523.
- [9] Hu Zhentao, Pan Quan. Multi-sensor adaptive particle filter in measurement uncertainty [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(4): 547–556.
- [10] Michael K. Covariance control for multi-sensor systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1138–1157.
- [11] Kreucher C, Kastella K, Hero A O. Sensor management using an active sensing approach [J]. *Signal Processing*, 2005, 11(4): 607–624.
- [12] Hero A O, Ma B, Michel O, et al. Applications of entropic spanning graphs [J]. *Signal Processing Magazine IEEE*, 2002, 19(5): 85–95.
- [13] Ru J F, Jilkov V P, Li X R, et al. Detection of target maneuver onset [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 536–554.
- [14] Cao Y, Guo J. Adaptive parameter identification tracking based on particle filter for airborne laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2015, 44(10): 3098–3102.
- [15] Alfred O H III, Castañón D, Cochran D, et al. Foundations and Applications of Sensor Management [M]. New York: Springer, 2008.