Track Maintenance of Multiple Flying Targets in Shooting Range*

LI Xinghong[1,2*], *ZHANG Lingling*[1,2], *YANG Qin*[1,2]
(1.*The Engineering & Technical College, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan* 614007, *China*;
2.*Southwest Institute of Physics of Nuclear Industry, Chengdu Sichuan* 610000, *China*)

Abstract: The tracking of multiple flying targets is widely used. When it is necessary to track and monitor multiple flying targets in the shooting range, it is necessary to eliminate all kinds of interference factors on the targets. When multiple flying targets move with each other, in order to ensure the accuracy of judging the target hitting, it is necessary to measure the track of multiple flying targets stably. Therefore, the system takes multiple flight targets in the range as the tracking object, and focuses on the problem of keeping the serial number of multiple flight targets unchanged. Through the comparison of different detection methods on the target feature extraction effect, and the multi parameter data association algorithm is applied to the multi-target tracking of the system. It is verified that when the background mean square deviation is between 4.0 and 5.0, when the number of targets is up to 12, the accuracy of the target number keeping is 23.29% higher than that of the PDA algorithm.

Key words: multi flight target; tracking; target number; accuracy
EEACC: 6135 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.022

靶场中多飞行目标的航迹保持*

李兴红[1,2*], 张聆玲[1,2], 杨 琴[1,2]
(1.成都理工大学工程技术学院, 四川 成都 614007; 2.核工业西南物理研究院, 四川 成都 610000)

摘 要: 多飞行目标的跟踪应用广泛, 在靶场中需要对多飞行目标进行跟踪监测时, 要排除目标所受的各种干扰因素, 当多飞行目标之间出现相互运动时, 为保证判断目标击中的准确性, 需要对多飞行目标航迹达到稳定保持的测量。因此, 系统以靶场中多飞行目标为跟踪对象, 着重研究多飞行目标序号保持不变问题。通过不同检测方法对目标的特征提取效果进行对比, 并且将多参数的数据关联算法应用于系统的多目标跟踪中, 验证得出, 在背景均方差 MSE 介于 4.0~5.0 之间的情况下, 当目标数量多达 12 个时, 其目标序号保持的准确度比 PDA 算法提高 23.29%。

关键词: 多飞行目标; 跟踪; 目标序号; 准确度
中图分类号: TP319; TP301.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0114-05

随着电视监视环境的复杂性不断增强, 测量系统面临的困难也逐渐增多。尤其是靶场中多飞行目标会面对各种多传感器的干扰及多飞行目标本身在飞行过程中的交叉等干扰, 使得传感器获取的图像数据失去准确度, 无法判断目标击中的正确性。传统的雷达、电视、红外、可见光等测量方法无法适用当前的多飞行目标测量系统。因此, 系统通过多传感器输出的信息, 克服各种干扰因素的影响, 再通过编程设定行为准则来确定飞行目标的起点位置, 在目标整个飞行跟踪测量系统中保持航迹稳定。

1 提取目标特征

在靶场飞行目标跟踪测控过程中, 时常出现飞行目标的信噪比很低的情况, 这样目标会被噪声淹没而无法提取, 因此系统首先利用双正交小波的线性相位, 紧支撑性, 分解重构时无相位失真等优点提取飞行目标的图像特征, 作为后续的目标编排序号的基础。

在靶场实验中以某 10 位灰度级的空中图像为研究对象, 原始图像图 1(a)中有两个无法识别的弱小目

项目来源: 国家自然科学基金项目(11375055)
收稿日期: 2020-04-26 **修改日期**: 2020-07-21

标,由图中可知,图像中的信噪比较低。系统分别采用三种方法对目标进行特征提取,效果如图 1 所示。

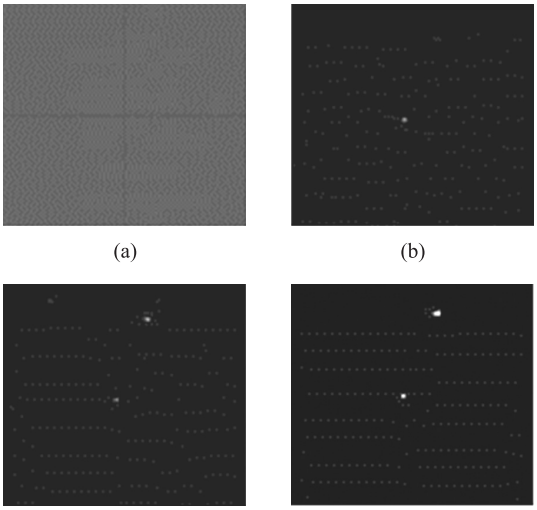


图 1　利用不同检测方法对目标的特征提取效果

图 1 中,图(a)为原始图像,图(b)是利用 Sobel 算子对图像的滤波效果,图(c)是利用 Haar 小波对图像的滤波效果,图(d)是系统利用双正交$_{3,1}\tilde{\psi}$ 小波对图像的滤波效果,从结果图 1 可以表明:利用双正交$_{3,1}\tilde{\psi}$ 小波将原始图像中的两个目标全部检测出来,并且整个图像的信噪比高,目标特征清晰可见。

2　多目标跟踪的数据关联算法

靶场中有多种类型的目标,其中,如果监测目标只有一个,则目标的相关波门内只有一个点迹,这样只需要考虑跟踪问题即可,但如果监测目标是多个,那么就会有多个点迹落入单个目标相关波门内的情况,这样就要考虑数据关联的问题。也就是说当测量目标出现后,系统在对目标进行自动识别建立序号的同时,也要在整个测量过程中保持该目标的序号一直不变。系统利用多参数的数据关联方法对多个目标状态更新,以达到抑制多个目标相互干扰的目的。

因此对于多目标的跟踪测量系统,首先要对新的飞行目标进行编排序号并且保持序号维持过程,系统对目标序号的建立及保持采用如图 2 所示的判别准则。

传统的数据关联算法很多,如概率数据关联算法(PDA)、最近邻域算法(NNDA)、联合概率数据关联算法(JPDA)等。在传统的算法当中,最简单的当属 NNDA 算法,但只适用于在稀疏回波环境中跟踪非动态目标,PDA 算法是一种次优滤波方法,对于杂波环境中单个目标的跟踪处理比较适合,JPDA 算法类似于 PDA 算法,两者略有不同,JPDA 算法认

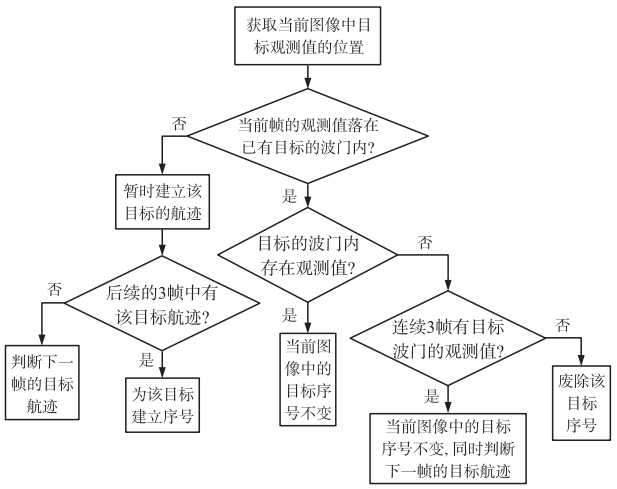


图 2　目标序号的建立及保持的判别准则

为所有的有效回波都可能源于每个特定目标,但源于不同目标的加权不同,因此,当目标和量测数目较多时,JPDA 算法的计算量会呈现组合爆炸现象,造成计算复杂。为了避免上述算法的不足,系统将空间位置关联度,亮度近似度等多参数数据关联,根据不同目标与确认波门内各观测值的后验概率密度赋予不同观测值的更新量不同加权值,从而不断更新目标状态,计算量及准确性有极大的提高。其算法的实现过程概括如下:

(1)构造确认矩阵 $\Omega=[\omega_{jt}]$

图 3 中体现了目标确认波门与观测值的分布情况,其中 $\hat{y}_1,\hat{y}_2,\hat{y}_3$ 分别为 3 个目标预测中心的位置,在当前帧出现了 4 个观测目标 y_1,y_2,y_3,y_4。按照其分布情况,首先建立式(1)的确认矩阵。当 $\omega_{jt}=1$ 时,表示观测值 y_j 落在第 t 个目标的关联门内,该观测值 y_j 的空间位置将对目标 t 状态的更新发生作用,反之表示观测值 y_j 落在第 t 个目标的确认波门之外,该值对目标 t 的状态更新不产生影响。当 $t=0$ 时表示观测值 y_j 可能属于噪声。

$$\Omega=[\omega_{jt}]=\begin{bmatrix}1100\\1010\\1011\\1010\end{bmatrix}\begin{matrix}1\\2\\3\\4\end{matrix}\Big\}j \qquad (1)$$

式中:$t=0,1,2,3$ 为目标编号,$j=1,2,3,4$ 为观测值编号。

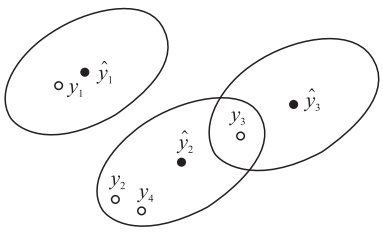


图 3　目标确认波门与观测值的分布情况

(2)计算 ε_j^t 的概率密度

设 ε_j^t 为观测值 j 源于目标 t 的事件,其中 $t=0,1,2,\cdots,N$,$j=1,2,3,\cdots,m$,$P[\varepsilon_j^t \mid Z^t(k)]$ 表示观测值 j 源于目标 t 的先验概率,后面的 $P[\varepsilon_j^t \mid Z^t(k)]$ 简写为 P_{jt}。

(3)寻找出现在各个目标相交波门内的观测值集合

$$\text{设 } U=\left\{Y_j \mid \forall j, \sum_{t=1}^{n}\omega_{jt} > 1, j=1,2,\cdots m\right\} \quad (2)$$

找出集合 U 中每个观测值 j 可能来自于目标的集合 T_j,如下式所示:

$$T_j=\{t \mid \forall t, \omega_{jt}=1\}, Y_j \in U \quad (3)$$

(4)计算处于波门相交区域内的观测值 j 分属于每个目标 t 的修正概率

如果观测值 j 同时落在多个目标波门内,可以通过修正系数 K_{jt}(式(4))降低该观测值分属于各个目标的后验概率密度。同时计算拥有公共观测值的目标各自关联门内的其他观测值对 K_{jt} 的影响。影响因子 g_{jt} 如式(5)定义:

$$K_{jt}=\frac{P_{jt}}{\sum_{teT_t} P_{jt}} \quad (4)$$

$$g_{jt}=\begin{cases}\dfrac{K_{jt}\cdot P_{jt}}{\sum_{j=0}^{m} K_{jt}\cdot P_{jt}} & \text{if } Y_j \in U \\ \dfrac{P_{jt}}{\sum_{j=0}^{m} P_{jt}} & \text{if } Y_j \notin U\end{cases} \quad (5)$$

式中:$t=1,2,\cdots,N$,由于 g_{jt} 的影响,因此需要对 K_{jt} 再次修正:

$$K_{jt}=\frac{g_{jt}\cdot K_{jt}}{\sum_{t=1}^{N} g_{jt}\cdot K_{jt}} \quad (Y_j \in U) \quad (6)$$

(5)当一个目标波门内出现多个观测值时,计算其各个观测值与该目标的空间位置关联度,亮度近似度

设 $\hat{\text{Pix}}_t$,$\hat{H}_t$,$\hat{W}_t$ 分别为目标 t 的预测亮度均值,预测长度值和预测宽度值,而 Pix_j,H_j,W_j 分别为观测值 j 的灰度均值,长度和宽度,则第 j 个观测值与第 t 个目标的灰度相似度 α_j^t 为:

$$a_j^t=1-\frac{|\text{Pix}_j-\hat{\text{Pix}}_j|}{\text{Pix}_{\max}-\text{Pix}_{\min}} \quad (7)$$

式中:$\text{Pix}_{\max}$ 代表图像中最亮点的灰度,$\text{Pix}_{\min}$ 代表最暗点的灰度。α_j^t 表示观测目标 j 的平均灰度值 Pix_j 与目标预测灰度值 $\hat{\text{Pix}}_t$ 越接近,那么观测值 j 与目标 t 的相似度越高。

再定义空间位置关联,包括第 j 个观测值和第 t 个目标的长度相似度和宽度相似度:

$$\vartheta_j^t=1-\frac{|H_j-\hat{H}_t|}{\sum_{j=1}^{m}|H_j+\hat{H}_t|},\quad \zeta_j^t=1-\frac{|W_j-\hat{W}_t|}{\sum_{j=1}^{m}|W_j-\hat{W}_t|} \quad (8)$$

ϑ_j^t 和 ξ_j^t 分别表达了观测值 j 与目标 t 的长度相似度和宽度相似度,其值越大,则观测值 j 与目标 t 在的形状越接近,观测值 j 源于目标 t 的可能性越大。

(6)通过 K_{jt}、α_j^t、ϑ_j^t、ξ_j^t 以及 P_{jt},求取观测值 j 与目标 t 的关联度 η_j^t

$$\eta_j^t=\begin{cases}K_{jt}\cdot P_{jt}\cdot a_j^t\cdot\vartheta_j^t\cdot\zeta_j^t & \text{if } Y_j\in U\\ P_{jt}\cdot a_j^t\cdot\vartheta_j^t\cdot\zeta_j^t & \text{if } Y_j\notin U\end{cases} \quad (9)$$

在计算后验概率密度时,将观测值 j 与预测目标 t 的 α_j^t、ϑ_j^t、ξ_j^t 因素共同作用,以获得观测值 j 与目标 t 的关联程度。

(7)将修正的关联度 η_j^t 归一化,以获得每个观测值 j 从属于不同目标 t 的后验概率密度 β_j^t,该值决定观测值 j 在目标 t 轨迹更新时分配的权重系数:

$$\beta_j^t=\frac{\eta_j^t}{\sum_{j=0}^{m}\eta_j^t}\omega_{jt}(x) \quad (10)$$

(8)利用关联门内每个观测值 j 从属于目标 t 的后验概率对该目标的状态进行更新:

$$\hat{X}_t(k/k)=\sum_{j=0}^{m}\beta_j^t\cdot\hat{X}_j^t(k/k) \quad (11)$$

式中:$\hat{X}_j^t(k/k)$ 表示目标 t 波门内,观测值 j 单独对目标 t 轨迹更新的作用结果,$\hat{X}_t(k/k)$ 就是经过所有观测值联合作用后,目标 t 的最终状态更新结果。从式中可以看出,数据关联的关键在于计算各个观测值从属于不同目标 t 的后验概率密度 β_j^t。

(9)再利用 Kalman 滤波实现单个观测值 j 对目标 t 位置状态的更新

对于第 k 帧图像,目标的状态更新方程为:

$$X_j^t(k/k)=X^t(k-1/k-1)+w_j^t(k) \quad (12)$$

式中:$X_j^t(k/k)$ 为第 k 帧时,第 j 个观测值对目标 t 的状态更新,$X^t(k-1/k-1)$ 表示第 $k-1$ 帧时,所有观测值对目标 t 的状态更新结果。$w_j^t(k)$ 为状态噪声,由于目标运动的变化,$w_j^t(k)$ 是时变的,由 Kalman 滤波理论可得,假设状态噪声 $w_j^t(k)$ 服从高斯分布。集合 $\{X_j^t(k/k)\}_{j=0,1,\cdots,m}$ 的估计值 $\{\hat{X}_j^t(k/k)\}_{j=0,1,\cdots,m}$ 就是第

k 帧时,目标 t 位置状态更新的后选模型。系统对目标状态 $\hat{X}^t(k/k)$ 的更新就是通过各个子观测值对目标当前状态的估计结果 $\{\hat{X}_j^t(k/k)\}_{j=0,1,\cdots,m}$ 赋予不同加权系数而得到的,此处的 $\{\hat{X}_j^t(k/k)\}_{j=0,1,\cdots,m}$ 是当前步骤系统想要计算得到的。

系统的观测方程为:

$$O_j^t(k)=X_j^t(k)+v_j^t \tag{13}$$

式中:v_j^t 为观测噪声,设其服从高斯分布,其方差值为 σ_v^2。在第 k 帧得到各个观测值的位置 $\{O_j(k)\}_{j=1,2,\cdots,m}$ 就是目标的观测模型。

现考虑连续第 k 帧和第 $k-1$ 帧图像,按照 Kalman 理论给出模型更新的方程组:

$$\hat{X}^t(k/k-1)=\hat{X}_j^t(k-1)$$

$$q_j^t(k/k-1)=q_j^t(k-1)+\sigma_w^2$$

$$m_{jt}^0(k)=\frac{q_j^t(k/k-1)}{q_j^t(k/k-1)+\sigma_v^2} \tag{14}$$

$$\hat{X}_j^t(k)=\hat{X}^t(k/k-1)+m_{jt}^0(k)(O_j(k)-\hat{X}^t(k/k-1))$$

$$q_j^t(k)=(1-m_{jt}^0(k))\cdot q_j^t(k/k-1)$$

式中:$\hat{X}_j^t(k/k-1)$ 为 Kalman 滤波一步的预测,$q_j^t(k/k-1)$ 为状态方差,要得到上式目标状态更新 $\hat{X}_j^t(k)$ 方程的解,就要得到初始状态方差 $q_j^t(0)$、状态噪声方差 σ_w^2 及观测噪声方差 σ_v^2。

设滤波残差如下式所示:

$$r_j^t(k)=o_j(k)-\hat{X}^t(k/k-1) \tag{15}$$

对于第 k 帧,进一步定义 $(\overline{r^t(k)})^2$ 表示历史滤波残差:

$$(\overline{r^t(k)})^2=\frac{1}{S}\sum_{i=1}^{S}(o_j^t(i)-\hat{X}_j^t(i/i-1)^2 \tag{16}$$

历史残差 $(\overline{r^t(k)})^2$ 表示过去的 S 帧图像滤波残差取平均,用它调整状态噪声方差 σ_w^2 和初始状态方差 $q_j^t(0)$ 等参数。

观测噪声方差 σ_w^2 可以按照式(18)估算:

$$\sigma_w^2=(\overline{r^t(k)})^2-\sigma_v^2-q_j^t(k-1) \tag{17}$$

当 $k=1$,就得到了滤波初始参数:

$$\begin{aligned}&\sigma_v^2=0.5(\overline{r^t(1)})^2\\&\sigma_w^2=0\\&q_j^t(0)=0.5(\overline{r^t(1)})^2\end{aligned} \tag{18}$$

在实际状态更新过程中,假定观测噪声方差 σ_v^2 为常值,则调整状态噪声方差 σ_w^2 完全可以满足目标状态的更新。

目标状态更新方程:

$$\hat{x}_j^t(k)=\hat{x}^t(k/k-1)+m_{jt}^0(k)(O_j(k)-\hat{x}^t(k/k-1))$$

主要决定于利用上一帧滤波值得到轨迹预测参数 $\hat{X}^t(k/k-1)$ 和观测值和预测值的滤波残差 $o_j(k)-\hat{X}^t(k/k-1)$,状态更新方程是由这两个参数按不同分配系数 $m_{jt}^0(k)$ 得到的。当判断 σ_w^2 比较小时,$m_{jt}^0(k)$ 取值很小,此时目标状态更新主要取决于 $\hat{X}^t(k/k-1)$;反之,目标状态更新方程主要决定于 $o_j(k)-\hat{X}^t(k/k-1)$。

(10)最后再对各个目标 t 的 $\hat{\mathrm{Pix}}_t$、$\hat{H}_t$、$\hat{W}_t$ 进行更新

将上述多参数数据关联算法的步骤引入实验,系统通过实验,比较以上三种算法的飞行目标跟踪的准确率。通过对比,从而表明文中提出的多参数数据关联算法的实用性。

3　实验结果

当图像的背景均方差 MSE<4.0 和在 4.0~5.0 之间两种不同情况下的比较数据,如表 1 和表 2,其中两种情况的实验次数各为 200 次。

表 1　背景 MSE<4.0,飞行目标跟踪的准确率

目标数量	传统的 PDA	传统的 JPDA	多参数数据关联
4	96.7	98.2	98.6
6	77.5	95.4	96.8
12	71.7	91.6	93.7

表 2　背景 MSE 为 4.0~5.0,飞行目标跟踪的准确率

目标数量	传统的 PDA	传统的 JPDA	多参数数据关联
4	95.3	96.5	97.1
6	90.1	93.7	94.2
12	73.6	90.2	91.8

通过表 1 和表 2 可以发现:对 4 个飞行目标进行测量时,在背景 MSE 较低时(<4.0),采用多参量数据关联算法的目标编号保持的准确率相对于传统的 PDA 和 JPDA 算法的目标编号保持要高,准确率为 98.6%,完全满足要求;在背景 MSE 升高时(4.0~4.5),图像的分辨率降低,同样 4 个目标测量,多参量数据关联算法的准确率为 97.1%,也高于传统的 PDA 和 JPDA 算法;而当目标数量增加时,无论何种情况何种算法,其准确率均有所下降,但多参量数据关联算仍是算法中准确率最高的。

将上述过程通过程序写入到以 TMS320C6657 为核心的 DSP 控制系统中,并且对靶场中多目标进行测量,通过图 4 可以得到目标序号建立后能够保持直到序号离开视场。

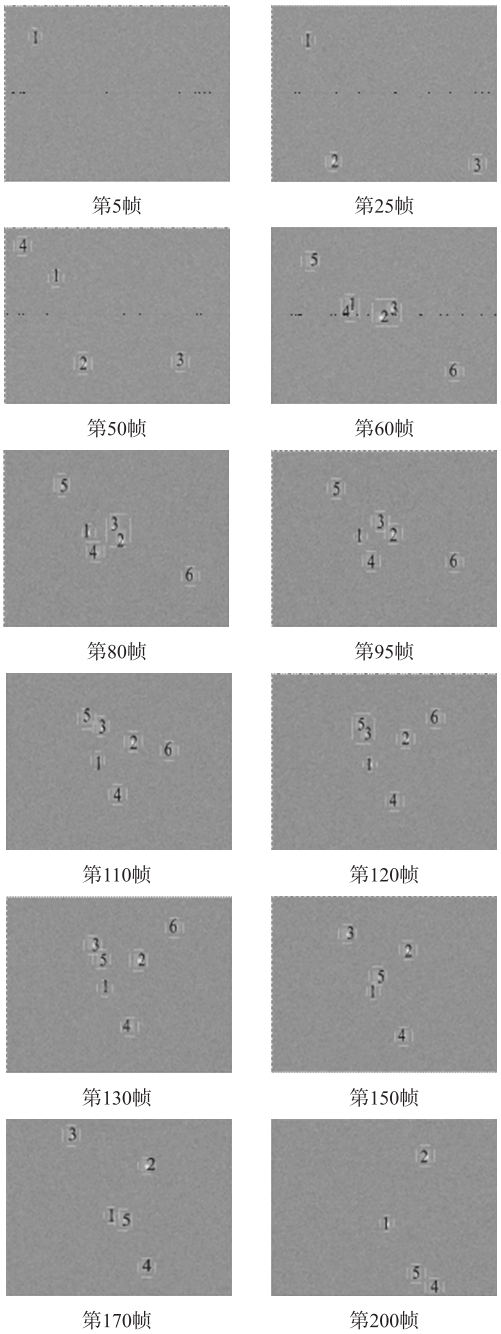


图 4 多目标序号在视场中的建立及保持

4 结论

系统对靶场中多飞行目标进行跟踪测量,首先利用双正交小波提取飞行目标的图像特征,再通过多参数的数据关联方法对目标进行编写序号及保持,通过实验可以看出,在目标数量高达 12 个时,即使背景的 MSE 增加,图像的分辨率降低,目标保持的准确率还可以达到 91.8%,最后利用程序将上述过程下载到以 TMS320C6657 为核心的 DSP 控制系统中。通过实验可以看出,上述过程完全可以达到多飞行目标的跟踪及序号保持,并且其准确率较高,比传统的 PDA 算法提高 23.29%。

参考文献:

[1] 李皓婧. 采用新型蚁群算法的 UAV 动态航迹规划[J],电子器件,2017,1(1):130-135.
[2] 郑存红,赵瑞峰,夏平,等. 光电跟踪系统中跟踪策略优化技术研究[J]. 光学与光电技术,2019,6(6):51-55.
[3] 王鹏宇,赵世杰,马天飞,等. 基于联合概率数据关联的车用多传感器目标跟踪融合算法[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,5(5):1420-1427.
[4] 王岩,崔永涛,陈伟. 多目标跟踪数据关联算法[J]. 数字通信世界,2019,9(9):263-264.
[5] 莫然,高淑芝. 基于小波滤波的 JPDA 算法多目标跟踪[J]. 沈阳化工大学学报,2018,1(1):91-96.
[6] 杜广洋,郑学合. 雷达群目标跟踪条件下的弹道预报方法[J]. 系统工程与电子技术,2018,12(12):2683-2688.
[7] 王璞,王建卫. 基于目标分类识别的跟踪方法研究[J]. 电子测量技术,2019,17(17):71-78.
[8] 郭同健. 云层背景下目标多特征信息融合及跟踪策略研究[D]. 北京:中国科学院大学,2014.
[9] 胡朝晖,闫杰. 红外空空导弹抗干扰性能评估方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2008,4(4):44-49.
[10] Chen H,Li X R,On Joint Track Initiation and Parameter Estimation under Measurement Origin Uncertainty[J]. IEEE Transations on Aerospace and Electronic Systems,2004,40(2):675-694.
[11] 黄国强. 多飞行器协同轨迹优化设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
[12] 王市辉,代冀阳,蒋沅,等. 多无人机协同编队飞行目标跟踪控制仿真[J]. 计算机仿真,2019,2(2):40-44.



李兴红(1975—),女,汉族,江苏人,硕士,副教授。主要从事测控系统的开发及应用;



张聆玲(1970—),女,汉族,重庆人,硕士,副教授。主要从事电子与通信工程的应用;



杨 琴(1988—),女,汉族,四川人,硕士。主要从事模式识别与智能系统的开发及应用。