DOI: 10.7641/CTA.2017.60969

# 一类光电跟踪系统中事件触发机制的设计及应用

梁 苑, 戚国庆, 李银伢, 盛安冬†

(南京理工大学自动化学院,江苏南京210094)

**摘要**: 对于图像采样频率远高于测距重频激光发射频率的一类光电跟踪系统,引入事件触发机制控制量测数据的传输,可在系统估计精度满足允许范围的前提下,减少系统中的通信量和估计中心的计算量.本文针对此类系统设计了基于非线性变换的事件触发机制;为定量的评价系统的估计性能,给出了事件触发机制下系统克拉美--罗下界(Cramér-Rao lower bound, CRLB)的递推计算式.典型测试场景下的仿真结果和实测航路下的实验结果验证了本文设计的事件触发机制的有效性及实际工程中的可行性.

关键词:光电跟踪系统;事件触发机制;状态估计;克拉美-罗下界;通信量;计算量

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Design and application of event-triggered mechanism for a kind of optical-electronic tracking system

LIANG Yuan, QI Guo-qing, LI Yin-ya, SHENG An-dong<sup>†</sup>

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: In some optical-electronic tracking systems, the sampling frequency of target image is considerably higher than the laser emission frequency of laser range finder. The data transmission amount and the computational burden in this kind of optical-electronic tracking system would be reduced if an event-triggered mechanism has been utilized to control the transmission of measurements. The estimation performance of the system could be guaranteed to stay within the allowable range. In this article, an event-triggered mechanism based on a nonlinear transformation has been designed for the aforementioned system. In order to evaluate the estimation performance of the system mentioned above quantitatively, the recursive formula of Cramér-Rao lower bound (CRLB) for the system with the designed event-triggered mechanism has been verified through simulation under different typical scenarios and experiment under actual air route.

**Key words:** optical-electronic tracking system; event-triggered mechanism; state estimation; Cramér-Rao lower bound; data transmission amount; computational burden

### 1 引言(Introduction)

光电跟踪系统是分布式防空火控系统中的关键探测设备之一.所研究的一类光电跟踪系统由探测单元和估计中心组成,两者分开部署,通过无线网络交互信息.目标的距离信息和角度信息分别由不同的测量设备获取,受限于测量设备的固有特性,距离信息的测量频率远低于角度信息的测量频率.各类目标跟踪滤波器<sup>[1-5]</sup>的研究提高了光电跟踪系统的性能.此外,针对本文所研究系统中距离信息与角度信息的测量频率不一致这一特点,文献[6]提出了基于联邦分散滤波结构的双通道目标跟踪滤波器.

上述已有的目标跟踪滤波算法中,量测数据的传

输均是周期性的.其传输周期一般取决于传感器的测量周期,可称之为周期传输(periodic transmission, PT) 机制.研究表明<sup>[7-9]</sup>,数据传输消耗的能量是传感器能量消耗的主要部分之一.受应用环境限制,本文所研究系统的探测单元一般由电池供电.采用周期传输机制可能会导致数据传输过于频繁,从而不利于系统长时间工作;同时,较高的数据传输量也使得估计中心计算负荷较大.

与周期传输机制相比,事件触发(event-triggered, ET)传输机制通过预设的触发准则选择性的传输量测 数据,可在减小系统通信消耗的同时在一定范围内保 证系统的估计精度,因而得到了广泛的研究与关注.

收稿日期: 2016-12-22; 录用日期: 2017-07-03.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: shengandong@njust.edu.cn; Tel.: +86 25-84315872-638.

本文责任编委:潘泉.

国家自然科学基金项目(61273076)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61273076).

Battistelli等<sup>[10]</sup>针对集中式网络,分别研究了量测数据 和局部估计值的事件触发机制,并提出了相应的估计 和融合算法. Liu等[11]研究了分布式网络中的事件触 发机制. Wang等<sup>[12]</sup>针对一类状态方程为非线性、量测 方程为线性的复杂网络系统,提出了相应的事件触发 估计算法.针对事件触发机制下分布式网络中的一致 性问题, Li等<sup>[13]</sup>提出了事件触发卡尔曼一致滤波算 法. Shi等<sup>[14]</sup>在集合量测情形下, 对基于事件触发机制 的多传感器融合估计问题进行了研究.Lu等<sup>[15]</sup>研究 了事件触发机制下的集员信息滤波问题. Zhang等<sup>[16]</sup> 和Xie等<sup>[17]</sup>分别针对非高斯系统和噪声相关情形,提 出了相应的事件触发估计算法. You等<sup>[18]</sup>分别研究了 可控和不可控事件触发机制,给出了两种机制下滤波 器稳定的条件. Han等<sup>[19]</sup>提出了一种概率性事件触发 机制,并给出了最小均方误差意义下的最优估计算法, 与上述基于量测新息的事件触发机制不同, Sebastian 等[20]提出了基于估计误差方差的事件触发机制.与上 述基于卡尔曼滤波(Kalman filtering, KF)的事件触发 估计算法不同, Song等<sup>[21]</sup>提出了事件触发H<sub> $\infty$ </sub>滤波算 法.

上述文献中的事件触发机制均是针对具有线性量 测方程的估计系统所设计的.而本文所研究系统的量 测方程是非线性的,因此已有的事件触发机制无法直 接用于本文所研究的系统.

此外,实际工程中通常需要对光电跟踪系统的性 能进行验前评估.在二阶误差性能指标意义下,克拉 美-罗下界(Cramér-Rao lower bound, CRLB)表征了 估计系统理论上的最高估计精度,常用于系统的设计 选型和性能评估,已经得到大量研究<sup>[22-26]</sup>.然而,已 有的研究成果考虑的均是采用周期传输机制的估计 系统,事件触发机制下估计系统的CRLB仍然有待研 究.

综上所述,为在所研究的一类光电跟踪系统中引入事件触发机制以减少通信量和计算负荷,从而延长系统的工作时间,本文设计了一种基于非线性变换的事件触发机制;为对事件触发机制下系统的估计性能进行验前评估,本文进一步给出了事件触发机制下系统CRLB的递推计算式.典型测试场景下的仿真结果和实测航路下的实验结果说明:所设计的事件触发机制在保证系统估计精度满足允许范围的前提下,减少了系统的通信量和估计中心的计算量.

在本文中:  $\mathbb{R}^n$ 表示n维实数空间;  $E(\cdot)$ 表示数学期 望;  $N(0, \sigma^2)$ 表示均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的正态分布;  $A^{\mathrm{T}}$ 表示矩阵A的转置;  $\operatorname{tr}(A)$ 表示方阵A的迹;  $\ln N$ 表 示求正数N的自然对数;  $p_{\vartheta}(\cdot)$ 表示随机变量 $\vartheta$ 的概率 密度函数 (probability density function, PDF);  $p(\vartheta|\xi)$ 表示 $\xi$ 给定时,随机变量 $\vartheta$ 的条件PDF;  $\otimes$ 表示Kronecker积.

## 2 问题描述(Problem description)

本文研究的一类光电跟踪系统由探测单元和估计 中心组成,如图1所示.探测单元由测角模块和测距 模块组成.目标的角度信息由目标图像中心与白光 CCD/红外热像仪光轴中心的偏差量叠加角度编码器 的量测值获取;距离信息由激光测距设备获取.探测 单元将量测数据传输至估计中心;估计中心将估计结 果反馈给探测单元以引导其跟踪目标.



Fig. 1 The structure diagram of a kind of optical-electronic tracking system

测角模块的测量频率由图像采样频率决定;测距 模块的测量频率由测距重频激光发射频率决定. 受激 光测距模块散热、功率等因素制约,激光发射频率远 低于图像采样频率. 令 $f_a$ 表示测距频率,  $f_b$ 表示测角 频率. 不失一般性, 假设 $n = \frac{f_b}{f_a}(n > 1)$ ,则探测单元 的测量时序如图2所示.





图2中:  $d_k^{\text{m}}, \beta_k^{\text{m}}, \varepsilon_k^{\text{m}}$ 分别表示k时刻目标距离量测 值、方位角量测值和俯仰角量测值. 定义 $Z_k^{\text{a}} \triangleq d_k^{\text{m}},$  $Z_k^{\text{b}} \triangleq [\beta_k^{\text{m}} \varepsilon_k^{\text{m}}]^{\text{T}}. 在 k n k + n$ 时刻, 测距模块发射激光, 系统获取的量测数据为 $Z_j = [Z_j^{\text{a}} (Z_j^{\text{b}})^{\text{T}}]^{\text{T}}, j = k,$ k + n;  $\alpha k n k + n$  时刻之间的各时刻, 系统获取的 量测数据为 $Z_j = Z_j^{\text{b}}, j = k + 1, \cdots, k + n - 1.$ 

以测角周期T<sub>b</sub>作为系统的采样周期,则目标的运动方程和系统的量测方程可描述为

Ì

$$\begin{cases} X_k = F_k X_{k-1} + w_{k-1}, \\ Z_k = \begin{cases} [Z_k^{a} \ (Z_k^{b})^{T}]^{T} = h(X_k) + v_k, \ l_k = 1, \\ Z_k^{b} = h^{b}(X_k) + v_k^{b}, \qquad l_k = 0, \end{cases}$$
(1)

其中:  $l_k = 1$ 表示k时刻探测单元发射激光,有距离量 测值,  $l_k = 0$ 表示k时刻探测单元未发射激光,无距离 量测值;  $X_k \in \mathbb{R}^{n_x} \to k$ 时刻目标的状态向量;  $F_k \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$ 为状态转移矩阵;  $w_k \in \mathbb{R}^{n_x} \to 0$ 过程噪声,且  $w_k \sim N(0, Q_k), Q_k \to 0$ 过程噪声协方差;  $v_k = [v_k^a (v_k^b)^T]^T, v_k^a \in \mathbb{R}^1 \pi v_k^b \in \mathbb{R}^2 \to 0$ 别为测距模块和测角 模块的量测噪声, 且 $v_k^a \sim N(0, R_k^a), v_k^b \sim N(0, R_k^b),$  $R_k^a \pi R_k^b \to 0$ 别为测距模块量测噪声方差和测角模块量 测噪声协方差; 非线性函数 $h(\cdot)$ 为

$$\begin{cases} h(X_k) = \begin{bmatrix} h^{a}(X_k) \\ h^{b}(X_k) \end{bmatrix}, \\ h^{a}(X_k) = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \\ h^{b}(X_k) = \begin{bmatrix} \arctan \frac{y_k}{x_k} \\ \arctan \frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \end{bmatrix}, \end{cases}$$
(2)

其中 $x_k, y_k, z_k$ 表示k时刻目标在笛卡尔坐标系下的位置.

# **3** 事件触发机制的设计(Design of the event-triggered mechanism)

本文所研究的光电跟踪系统中,角度信息测量频 率远高于距离信息测量频率.因此在周期传输机制下, 角度量测的传输次数远多于距离量测的传输次数,可 以使用事件触发机制控制角度量测的传输以减少通 信量.

作如下定义:

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z}^{k} \stackrel{\Delta}{=} \{Z_{0}, Z_{1}, \cdots, Z_{k}\}, \\ \hat{Z}^{b}_{k|k-1} \stackrel{\Delta}{=} \mathrm{E}[Z^{b}_{k}|\boldsymbol{Z}^{k-1}], \\ P^{b}_{k|k-1} \stackrel{\Delta}{=} \\ \mathrm{E}[(Z^{b}_{k} - \hat{Z}^{b}_{k|k-1})(Z^{b}_{k} - \hat{Z}^{b}_{k|k-1})^{\mathrm{T}}|\boldsymbol{Z}^{k-1}]. \end{cases}$$
(3)

令二元变量 $\gamma_k$ 表示k时刻角度量测 $Z_k^b$ 是否被探测 单元传输至估计中心.  $\gamma_k = 1$ 表示k时刻事件被触发, 探测单元发送 $Z_k^b$ ;  $\gamma_k = 0$ 表示k时刻事件未被触发, 探测单元不发送 $Z_k^b$ . 针对所研究的系统,可设计如下 事件触发机制:

$$\gamma_{k} = \begin{cases} 1, \ l_{k} = 1 \ \text{ig} f(\tilde{Z}_{k}^{b}, P_{k|k-1}^{b}) > \delta, \\ 0, \ \text{id} \ \text{if} \ \mathcal{R}, \end{cases}$$
(4)

其中:  $\delta$ 为触发阈值;  $\tilde{Z}_k^{\rm b} = Z_k^{\rm b} - \hat{Z}_{k|k-1}^{\rm b}$ ; 且

$$f(\tilde{Z}_{k}^{\rm b}, P_{k|k-1}^{\rm b}) = (\tilde{Z}_{k}^{\rm b})^{\rm T} [\frac{P_{k|k-1}^{\rm b}}{\operatorname{tr}(P_{k|k-1}^{\rm b})}]^{-1} \tilde{Z}_{k}^{\rm b}.$$
 (5)

注1 式(4)所示的事件触发机制表明,由于距离信息

测量频率较低,故激光发射时刻( $l_k = 1$ )的量测数据均被传输;未发射激光时刻( $l_k = 0$ )的角度量测数据是否传输通过 $Z_k^{\rm b}$ 与其预测值 $\hat{Z}_{k|k-1}^{\rm b}$ 的差异程度的量化值进行判断.

由式(1)和式(2)可知,本文所研究的系统在极坐标 系下的量测与目标在笛卡尔坐标系下的运动状态呈 强非线性关系.因此,若利用式(4)所示的事件触发机 制控制角度量测数据的传输,需对估计中心在笛卡尔 坐标系下的滤波结果进行非线性变换以获取 $\hat{Z}^{b}_{k|k-1}$ 与  $P^{b}_{k|k-1}$ .综合考虑计算量以及精度等因素,本文选用 无迹变换(unscented transformation, UT).根据式(4)所 示的触发准则,针对本文研究的系统,可进一步设计 如下基于无迹变换的事件触发机制 (unscented transformation-event-triggered, UT-ET).

$$\begin{cases} 1, \ l_k = 1 \ \text{if} \ [\Pi(\hat{X}_{k|k-1}, P_{k|k-1})] > \delta, \\ 0, \ \text{Idef} \ \mathcal{R}, \end{cases}$$
(6)

其中:  $\hat{X}_{k|k-1}$ 表示目标状态 $X_k$ 的先验估计值,  $P_{k|k-1}$ 表示 $\hat{X}_{k|k-1}$ 的估计误差协方差;  $\Pi(\cdot)$ 表示从 $\hat{X}_{k|k-1}$ 和 $P_{k|k-1}$ 到 $\hat{Z}_{k|k-1}^b$ 和 $P_{k|k-1}^b$ 的无迹变换, 如下所示:

$$T: \begin{cases} \kappa = \mu^{2}(n_{x} + \eta) - n_{x}, \\ \hat{X}_{k|k-1}, i = 0, \\ \hat{X}_{k|k-1} + \sqrt{(n_{x} + \kappa)P_{k|k-1}}, \\ i = 1, \cdots, n_{x}, \\ \hat{X}_{k|k-1} - \sqrt{(n_{x} + \kappa)P_{k|k-1}}, \\ i = n_{x} + 1, \cdots, 2n_{x}, \\ \omega_{i}^{1} = \begin{cases} \kappa/(n_{x} + \kappa), i = 0 \\ 0.5/(n_{x} + \kappa), i \neq 0 \\ 0.5/(n_{x} + \kappa), i \neq 0 \\ 0.5/(n_{x} + \kappa), i \neq 0, \\ 0.5/(n_{x} + \kappa), i \neq 0,$$

其中: *n<sub>x</sub>*为*X<sub>k</sub>*的维数; η通常设置为0; μ通常设置为 较小的正数; 在高斯分布下, 将λ设置为2是最优的.

由式(5)可知, 当 $Z_k^b$ 因不满足触发条件而未被传输 至估计中心时, 估计中心可依据 $f(\tilde{Z}_k^b, P_{k|k-1}^b) \leq \delta$ 推 测出 $Z_k^b$ 的部分信息. 受上述讨论及文献[10]启发, 给 出如下定理.

**定理1**由式(1)所描述的一类光电跟踪系统使用式(6)所示的事件触发机制控制量测数据的传输时, 若*k*时刻无距离量测信息(*l<sub>k</sub>* = 0),则估计中心可利用的信息为

$$\bar{Z}_{k} = \gamma_{k} Z_{k}^{\mathrm{b}} + (1 - \gamma_{k}) \hat{Z}_{k|k-1}^{\mathrm{b}}, \qquad (8)$$
  
对应的噪声协方差为

第10期

$$\bar{R}_{k} = R_{k}^{\mathrm{b}} + (1 - \gamma_{k}) \frac{\delta}{4} \cdot \frac{P_{k|k-1}^{\mathrm{b}}}{\operatorname{tr}(P_{k|k-1}^{\mathrm{b}})}.$$
 (9)

证 当 $\gamma_k = 1$ 时,表明事件被触发, $Z_k^{\text{b}}$ 被发送至估计中心,式(8)和式(9)显然成立.

考虑
$$\gamma_k = 0$$
时的情况.为表述方便,作如下定义:

$$\begin{cases} M_k \stackrel{\Delta}{=} [\frac{P_{k|k-1}^{\mathrm{b}}}{\operatorname{tr}(P_{k|k-1}^{\mathrm{b}})}]^{-1}, \\ \Psi_k \stackrel{\Delta}{=} \{\varsigma|\varsigma^{\mathrm{T}} M_k \varsigma \leqslant \delta\}, \end{cases}$$
(10)

则式(6)所示的事件触发机制可表示为

$$\gamma_k = \begin{cases} 1, \ l_k = 1 \text{ g} \ \tilde{Z}_k^{\mathrm{b}} \notin \Psi_k, \\ 0, \ \mathrm{\sharp} \mathrm{det} \mathrm{f} \mathrm{R}. \end{cases}$$
(11)

由式(11), 当 $\gamma_k = 0$ 时,  $X_k$ 的后验PDF为

$$p(X_k|\gamma_k=0) \propto \int_{\hat{Z}_{k|k-1}^{\mathrm{b}}+\Psi_k} p_{v_k^{\mathrm{b}}}(\varsigma - h^{\mathrm{b}}(X_k)) \mathrm{d}\varsigma \cdot p_{X_k}(X_k).$$
(12)

构建如下虚拟量测方程:

$$\check{Z}_k = h^{\rm b}(X_k) + v_k^{\rm b} + u_k,$$
 (13)

其中 $u_k \in \mathbb{R}^2$ 为与 $X_k$ 和 $v_k^b$ 不相关的随机变量,且在 $\Psi_k$ 中满足均匀分布.则由式(13)可得

$$p(\check{Z}_k|X_k) = p_{\check{v}_k}(\check{Z}_k - h^{\mathrm{b}}(X_k)), \qquad (14)$$

其中 $\breve{v}_k = v_k^{\mathrm{b}} + u_k.$ 

由于两个互不相关的随机变量之和的PDF等于两个随机变量各自PDF的卷积,故有

$$p_{\breve{v}_{k}}(\breve{v}_{k}) = p_{v_{k}^{b}+u_{k}}(v_{k}^{b}+u_{k}) =$$

$$\int_{\mathbb{R}^{2}} p_{v_{k}^{b}}(v_{k}^{b})p_{u_{k}}(u_{k})du_{k} =$$

$$\int_{\mathbb{R}^{2}} p_{v_{k}^{b}}(\breve{v}_{k}-u_{k})p_{u_{k}}(u_{k})du_{k} \propto$$

$$\int_{\Psi_{k}} p_{v_{k}^{b}}(\breve{v}_{k}-u_{k})du_{k}.$$
(15)

由式(14)和式(15)可得

$$p(\check{Z}_k|X_k) \propto \int_{\Psi_k} p_{v_k^{\rm b}}(\check{Z}_k - h^{\rm b}(X_k) - u_k) \mathrm{d}u_k.$$
(16)

根据贝叶斯公式可得

$$p(X_k|\breve{Z}_k) = \frac{p(\breve{Z}_k|X_k)p_{X_k}(X_k)}{p_{\breve{Z}_k}(\breve{Z}_k)} \propto p(\breve{Z}_k|X_k)p_{X_k}(X_k).$$
(17)

将式(16)代入式(17)可得

$$p(X_k | \check{Z}_k) \propto \int_{\Psi_k} p_{v_k^{\mathrm{b}}}(\check{Z}_k - h^{\mathrm{b}}(X_k) - u_k) \mathrm{d}u_k \cdot p_{X_k}(X_k).$$
(18)

当 $\tilde{Z}_k = \hat{Z}_{k|k-1}^{\text{b}}$ 时, 令式(12)中 $\varsigma = \hat{Z}_{k|k-1}^{\text{b}} - u_k$ , 则 由式(12)和式(18)可得

$$p(X_k|\breve{Z}_k) = p(X_k|\gamma_k=0).$$
<sup>(19)</sup>

在贝叶斯滤波框架下,式(19)所示的等价性说明:当 $\gamma_k = 0$ 时,可认为估计中心接收到由式(13)所示虚拟量测方程产生的虚拟量测 $\check{Z}_k = \hat{Z}^{\rm b}_{k|k-1}$ .因此, $\gamma_k = 0$ 时,式(8)依然成立.

根据式(13), 虚拟量测Ž<sub>k</sub>对应的噪声协方差为

$$\breve{R}_k = \mathbf{E}[(v_k^{\mathbf{b}} + u_k)(v_k^{\mathbf{b}} + u_k)^{\mathrm{T}}].$$
(20)

由 $v_k^{\rm b}$ 和 $u_k$ 互不相关,且 $u_k$ 在 $\Psi_k$ 中均匀分布,可得

$$\ddot{R}_{k} = \mathbf{E}[v_{k}^{\mathbf{b}}(v_{k}^{\mathbf{b}})^{\mathrm{T}}] + \mathbf{E}[u_{k}(u_{k})^{\mathrm{T}}] = R_{k}^{\mathbf{b}} + \frac{\delta}{4}M_{k}^{-1}, \qquad (21)$$

因此,  $\gamma_k = 0$ 时, 式(9)依然成立.

综上所述,定理1得证.

利用式(6)所示的事件触发机制控制量测数据的传输后, 若 $\gamma_k = 0$ , 说明角度量测 $Z_k^b$ 与其预测值 $\hat{Z}_{k|k-1}^b$ 的差异较小, 即 $Z_k^b$ 对系统估计精度的影响较小. 根据定理1, 此时估计中心可利用虚拟量测 $\check{Z}_k$ 进行滤波; 而相比于 $Z_k^b$ ,  $\check{Z}_k$ 对系统估计精度的影响更小, 若在减少系统通信量的基础上进一步考虑减小估计中心的计算负荷, 此时估计中心可以忽略虚拟量测 $\check{Z}_k$ , 直接将上一时刻的估计结果进行一步递推作为当前时刻的估计结果.

## 4 事件触发机制下一类光电跟踪系统的 CRLB(CRLB of the optical-electronic tracking system with event-triggered mechanism)

在二阶误差性能指标意义下, CRLB表征了估计系 统理论上的最高估计精度.为了对系统在事件触发机 制下的估计性能进行验前评估, 需要研究事件触发机 制下系统的CRLB. 作如下定义:

$$P_{k|k} \stackrel{\Delta}{=} \mathbb{E}[(X_k - \hat{X}_{k|k})(X_k - \hat{X}_{k|k})^{\mathrm{T}} | \mathbf{Z}^k], \quad (22)$$
则估计系统的CRLB为 $P_{k|k}$ 的理论下界, 定义为

$$\operatorname{CRLB}_k \stackrel{\Delta}{=} (J_k)^{-1}, \tag{23}$$

其中 $J_k$ 为k时刻估计系统的Fisher信息阵(fisher information matrix, FIM).

对于式(1)所描述的光电跟踪系统,系统的FIM满 足如下递推式:

$$J_k = D_k^{22} - D_k^{21} (J_{k-1} + D_k^{11})^{-1} D_k^{12}, \quad (24)$$
其中:

$$\begin{cases} D_k^{11} = \mathbb{E}[-\Delta_{X_{k-1}}^{X_{k-1}} \ln p(X_k | X_{k-1})], \\ D_k^{12} = \mathbb{E}[-\Delta_{X_{k-1}}^{X_k} \ln p(X_k | X_{k-1})], \\ D_k^{21} = \mathbb{E}[-\Delta_{X_k}^{X_{k-1}} \ln p(X_k | X_{k-1})], \\ D_k^{22} = \mathbb{E}[-\Delta_{X_k}^{X_k} \ln p(X_k | X_{k-1})] + \\ \mathbb{E}[-\Delta_{X_k}^{X_k} \ln p(Z_k | X_k, l_k, \gamma_k)], \end{cases}$$
(25)

其中:  $\Delta$ 表示二阶偏导算子;  $p(X_k|X_{k-1})$ 表示目标状态的条件PDF,  $p(Z_k|X_k, l_k, \gamma_k)$ 表示量测的条件PDF.

考虑到过程噪声
$$w_k \sim N(0, Q_k)$$
,可得  
 $-\ln p(X_k | X_{k-1}) =$   
 $c_1 + \frac{1}{2} (X_k - F_k X_{k-1})^{\mathrm{T}} Q_{k-1}^{-1} (X_k - F_k X_{k-1}),$ 
(26)

其中c<sub>1</sub>为常数.

根据定理1中所得结论,可得

$$-\ln p(Z_{k}|X_{k}, l_{k}, \gamma_{k}) = \begin{cases} c_{2} + \frac{1}{2} [Z_{k} - h(X_{k})]^{\mathrm{T}} R_{k,1}^{-1} [Z_{k} - h(X_{k})], \\ l_{k} = 1; \\ c_{3} + \frac{1}{2} [Z_{k} - h(X_{k})]^{\mathrm{T}} R_{k,2}^{-1} [Z_{k} - h(X_{k})], \\ l_{k} = 0 \oplus \gamma_{k} = 1; \\ c_{4} + \frac{1}{2} [Z_{k} - h(X_{k})]^{\mathrm{T}} R_{k,3}^{-1} [Z_{k} - h(X_{k})], \\ l_{k} = 0 \oplus \gamma_{k} = 0, \end{cases}$$
(27)

其中: c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>, c<sub>4</sub>为常数; 且

$$R_{k,1} = \begin{bmatrix} R_k^{a} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_k^{b} \end{bmatrix},$$

$$R_{k,2} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_k^{b} \end{bmatrix},$$

$$R_{k,3} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_k^{b} + \frac{\delta}{4} M_k^{-1} \end{bmatrix},$$

其中: **0**表示适当维数的零矩阵;  $\sigma_a^2 \rightarrow +\infty$ .

**注 2** 若*l<sub>k</sub>* = 0, 即*k*时刻未发射激光, 无距离量测值, 可认为此时距离量测噪声的方差趋近于无穷.

$$\begin{cases} D_k^{11} = F_k^{\mathrm{T}} Q_{k-1}^{-1} F_k, \\ D_k^{12} = -F_k^{\mathrm{T}} Q_{k-1}^{-1}, \\ D_k^{21} = -Q_{k-1}^{-1} F_k, \\ D_k^{22} = Q_{k-1}^{-1} + \mathrm{E}(H_k^{\mathrm{T}} \tilde{R}_k^{-1} H_k), \end{cases}$$
(28)

其中:

$$\begin{split} H_{k} &= \left[ \left( \frac{\partial h^{\mathrm{a}}(X_{k})}{\partial X_{k}} \right)^{\mathrm{T}} \left( \frac{\partial h^{\mathrm{b}}(X_{k})}{\partial X_{k}} \right)^{\mathrm{T}} \right]^{\mathrm{T}} = \\ & \left[ (H_{k}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}} \left( H_{k}^{\mathrm{b}} \right)^{\mathrm{T}} \right]^{\mathrm{T}}, \\ \tilde{R}_{k} &= \begin{cases} R_{k,1}, \ l_{k} = 1, \\ R_{k,2}, \ l_{k} = 0 \ \pm \gamma_{k} = 1, \\ R_{k,3}, \ l_{k} = 0 \ \pm \gamma_{k} = 0. \end{cases} \\ & \bar{\Lambda} \\ \bar{$$

$$X_k = [x_k \ x'_k \ y_k \ y'_k \ z_k \ z'_k]^{\mathrm{T}},$$

其中: x<sub>k</sub>, y<sub>k</sub>, z<sub>k</sub>为目标在笛卡尔坐标系下的位置; x'<sub>k</sub>, y'<sub>k</sub>, z'<sub>k</sub>为目标在笛卡尔坐标系下的速度.

此时有

$$\begin{split} H_k^{\mathbf{a}}(1,1) &= \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}}, \\ H_k^{\mathbf{a}}(1,3) &= \frac{y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}}, \\ H_k^{\mathbf{a}}(1,5) &= \frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}}, \\ H_k^{\mathbf{b}}(1,1) &= \frac{-y_k}{x_k^2 + y_k^2}, \\ H_k^{\mathbf{b}}(1,3) &= \frac{x_k}{x_k^2 + y_k^2}, \\ H_k^{\mathbf{b}}(2,1) &= \frac{-x_k z_k}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}, \\ H_k^{\mathbf{b}}(2,3) &= \frac{-y_k z_k}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}, \\ H_k^{\mathbf{b}}(2,5) &= \frac{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}. \end{split}$$

将式(28)代入式(24)可得

$$J_{k} = l_{k} \times \mathrm{E}[(H_{k}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}}(R_{k}^{\mathrm{a}})^{-1}H_{k}^{\mathrm{a}}] + \gamma_{k} \times \mathrm{E}[(H_{k}^{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}}(R_{k}^{\mathrm{b}})^{-1}H_{k}^{\mathrm{b}}] + (1 - \gamma_{k}) \times \mathrm{E}[(H_{k}^{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}}\breve{R}_{k}^{-1}H_{k}^{\mathrm{b}}] + (Q_{k-1} + F_{k}J_{k-1}^{-1}F_{k}^{\mathrm{T}})^{-1},$$
(29)

其中 $\check{R}_k = R_k^{\mathrm{b}} + \frac{\delta}{4}M_k^{-1}.$ 

统计意义下,式(6)所示的事件触发机制的触发频 度可定义为

$$\alpha \stackrel{\Delta}{=} \lim_{K \to \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \mathcal{E}(\gamma_k), \qquad (30)$$

其中K为采样周期数.

本文所研究的系统中,角度信息和距离信息的测量频率满足 $\frac{f_b}{f_a} = n$ .则由式(29)和式(30)可得,如式(1)所描述的光电跟踪系统利用式(6)所示的事件触发机制控制探测单元到估计中心的数据传输时,系统在统计意义下的CRLB为

$$CRLB_k = (\bar{J}_k)^{-1}, \qquad (31)$$

其中:

$$\bar{J}_{k} = (Q_{k-1} + F_{k}\bar{J}_{k-1}^{-1}F_{k}^{\mathrm{T}})^{-1} + \frac{1}{n} \times \mathrm{E}[(H_{k}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}}(R_{k}^{\mathrm{a}})^{-1}H_{k}^{\mathrm{a}}] + \mathrm{E}\{(H_{k}^{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}}[R_{k}^{\mathrm{b}} + (1-\alpha)\frac{\delta}{4}M_{k}^{-1}]^{-1}H_{k}^{\mathrm{b}}\}.$$
(32)

## 5 事件触发机制在光电跟踪系统中的应用 与结果分析 (Application and analysis of event-triggered mechanism in the opticalelectronic tracking system)

本文所研究的光电跟踪系统利用式(6)所示的事件 触发机制控制探测单元到估计中心的数据传输后,其 结构如图3所示.





估计中心可采用基于式(6)所示事件触发机制的无 迹卡尔曼滤波 (unscented KF, UKF), 当 $\gamma_k = 1$ 或0时, 分别对接收到的量测数据或式(8)及式(9)所示的虚拟 量测进行滤波, 可称之为"利用虚拟量测ET-UKF"; 若考虑进一步减小估计中心的计算负荷, 估计中心可 忽略  $\gamma_k = 0$ 时的虚拟量测信息, 仅对实际接收到的 量测数据进行滤波, 可称之为"忽略虚拟量测 ET-UKF".

以一种典型的光电探测单元一目标坐标测定仪为 例,测距重频激光发射频率 $f_{\rm a} = 3.125$  Hz,图像采样 频率 $f_{\rm b} = 12.5$  Hz;距离、方位角和俯仰角的测量精 度分别为: $\sigma_{\rm d} = 5$  m, $\sigma_{\beta} = 0.2^{\circ} \pi \sigma_{\varepsilon} = 0.2^{\circ}$ .

分别通过典型测试场景下的仿真实验和实测航路 下的实验,将基于本文所设计的事件触发机制的ET-UKF算法与文献[6]中基于周期传输机制的联邦UKF (PT federated UKF, PT-FUKF)算法在估计精度、通信 量、计算量等方面进行对比,以验证所设计的事件触 发机制的有效性和可行性.

**5.1** 典型测试场景下的仿真结果与分析(Simulation results and analysis under typical simulation scenarios)

不失一般性,若目标状态为

 $X_{k} = [x_{k} \ x'_{k} \ y_{k} \ y'_{k} \ z_{k} \ z'_{k}]^{\mathrm{T}},$ 

其中 $x_k, y_k, z_k$ 和 $x'_k, y'_k, z'_k$ 分别为目标在笛卡尔坐标系下的位置和速度,则系统的位置 CRLB 和速度 CRLB可分别定义为

$$\begin{cases} \text{CRLB}_{k}^{\text{pos}} \triangleq \\ \sqrt{C_{k}(1,1) + C_{k}(3,3) + C_{k}(5,5)}, \\ \text{CRLB}_{k}^{\text{vel}} \triangleq \\ \sqrt{C_{k}(2,2) + C_{k}(4,4) + C_{k}(6,6)}, \end{cases}$$
(33)

其中 $C_k(i, j)$ 为CRLB<sub>k</sub>中第i行、第j列的元素.进一步可定义系统的平均位置CRLB和平均速度CRLB分别为

$$\begin{cases} \operatorname{CRLB}_{\operatorname{av}}^{\operatorname{pos}} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \operatorname{CRLB}_{k}^{\operatorname{pos}}, \\ \operatorname{CRLB}_{\operatorname{av}}^{\operatorname{vel}} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \operatorname{CRLB}_{k}^{\operatorname{vel}}, \end{cases}$$
(34)

其中K为采样周期数.

以采用周期传输机制时(即 $\delta = 0$ 时)系统的CRLB 作为基准值, 触发阈值 $\delta = \tau$ 时, 平均位置CRLB增加 幅度和平均速度CRLB增加幅度分别定义为

$$\begin{cases} \rho^{\rm pos}(\tau) \stackrel{\Delta}{=} \frac{{\rm CRLB}^{\rm pos}_{\rm av}|_{\delta=\tau} - {\rm CRLB}^{\rm pos}_{\rm av}|_{\delta=0}}{{\rm CRLB}^{\rm pos}_{\rm av}|_{\delta=0}},\\ \rho^{\rm vel}(\tau) \stackrel{\Delta}{=} \frac{{\rm CRLB}^{\rm vel}_{\rm av}|_{\delta=\tau} - {\rm CRLB}^{\rm vel}_{\rm av}|_{\delta=0}}{{\rm CRLB}^{\rm vel}_{\rm av}|_{\delta=0}}, \end{cases}$$
(35)

其中CRLB<sup>pos</sup><sub>av</sub> $|_{\delta=\tau}$ 和CRLB<sup>vel</sup><sub>av</sub> $|_{\delta=\tau}$ 分别为触发阈值 $\delta = \tau$ 时的平均位置CRLB和平均速度CRLB.

系统的估计精度通过均方根误差(root mean square error, RMSE)衡量,位置均方根误差和速度均方根误差分别定义为

$$\begin{cases} \text{RMSE}_{k}^{\text{pos}} = \\ \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \left[ \left( \tilde{x}_{k,i} \right)^{2} + \left( \tilde{y}_{k,i} \right)^{2} + \left( \tilde{z}_{k,i} \right)^{2} \right]}, \\ \text{RMSE}_{k}^{\text{vel}} = \\ \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \left[ \left( \tilde{x}_{k,i}^{\prime} \right)^{2} + \left( \tilde{y}_{k,i}^{\prime} \right)^{2} + \left( \tilde{z}_{k,i}^{\prime} \right)^{2} \right]}, \end{cases}$$
(36)

其中:  $\tilde{x}_{k,i}, \tilde{y}_{k,i}, \tilde{z}_{k,i}$ 和 $\tilde{x}'_{k,i}, \tilde{y}'_{k,i}, \tilde{z}'_{k,i}$ 分别为第i次 Monte-Carlo仿真中k时刻的位置估计误差和速度估 计误差; M表示Monte-Carlo仿真次数.

进一步可定义平均位置RMSE和平均速度RMSE 分别为

$$\begin{cases} \text{RMSE}_{\text{av}}^{\text{pos}} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \text{RMSE}_{k}^{\text{pos}}, \\ \text{RMSE}_{\text{av}}^{\text{vel}} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \text{RMSE}_{k}^{\text{vel}}. \end{cases}$$
(37)

系统的通信量通过探测单元到估计中心的平均通 信频度衡量,定义如下:

$$\bar{f}_{\rm c} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \gamma_k^i, \tag{38}$$

其中: $\gamma_k^i$ 为表示第i次Monte-Carlo仿真中k时刻事件 是否触发的二元变量;周期传输机制下, $\bar{f}_c = 1$ .

仿真平台的硬件条件为: Intel Core Duo P8800 CPU, 主频2.66 GHz; 内存4 GB. 估计中心的计算量通 1334

$$\bar{t} \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} t_i, \tag{39}$$

其中 $t_i$ 为第i次Monte-Carlo仿真中对航路数据进行滤波所需的时间.

在以下3种典型的测试场景下分别进行1000次 Monte-Carlo仿真实验.

**仿真场景1** 匀速直线航路,目标航速200 m/s, 航高1000 m,航捷500 m.目标初始状态和状态转移 矩阵分别为

$$\begin{split} X_0 &= [10000 \,\mathrm{m} \ -200 \,\mathrm{m/s} \ 500 \,\mathrm{m} \ 0 \ 1000 \,\mathrm{m} \ 0]^{\mathrm{T}} \\ F_k &= I_{3\times 3} \otimes \begin{bmatrix} 1 & T_{\mathrm{b}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{split}$$

其中 $T_{\rm b} = 1/12.5 \,\mathrm{Hz} = 0.08 \,\mathrm{s}.$ 

利用式(6)所示的事件触发机制控制量测数据的传输后,系统的平均位置CRLB、平均速度CRLB和平均通信频度 $f_c$ 随触发阈值 $\delta$ 的变化趋势如图4所示.





根据图4可知,以采用周期传输机制时(即 $\delta$ =0时) 系统的 CRLB 作为基准值,随着触发阈值 $\delta$ 的增大, CRLB<sup>pos</sup>和CRLB<sup>vel</sup>相对于基准值的增加幅度不断 变大,即系统的估计精度逐渐下降;而随着 $\delta$ 的增大, 平均通信频度 $\bar{f}_c$ 则逐渐下降.为了在减小系统通信量 的同时兼顾在一定范围内保证系统估计精度,根据图 4所示的CRLB<sup>pos</sup>,CRLB<sup>vel</sup>和 $\bar{f}_c$ 随 $\delta$ 的变化趋势,在 仿真场景1下,将触发阈值设为 $\delta$  = 0.2较为合适. 当 $\delta$ = 0.2时,仿真结果如图5-6所示.





t/s

#### 图 5 仿真场景1下, RMSE对比





\*利用虚拟量测ET-UKF通信时刻

o 文献[6]中PT-FUKF通信时刻

O 义\[0]中FI FUKF通信时刻

图 6 仿真场景1下,第500次仿真实验中通信时刻对比 Fig. 6 The comparison of communication instants in 500th simulation under simulation scenario 1

## 表 1 仿真场景1下, RMSE, $\overline{f}_c$ 及计算量对比

Table I	The comparison of RMSE, $f_c$ and
	computational burden under
	simulation scenario 1

	忽略虚拟	利用虚拟	文献[6]中
	量测ET-UKF	量测ET-UKF	PT-FUKF
$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{av}}^{\mathrm{pos}}$	6.01 m	5.98 m	5.44 m
$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{av}}^{\mathrm{vel}}$	2.02  m/s	$1.99 \mathrm{~m/s}$	$1.88 \mathrm{~m/s}$
通信频度 $\overline{f}_{c}$	0.4775	0.4762	1
计算时间 $\overline{t}$	$573 \mathrm{ms}$	$983 \mathrm{ms}$	$1045 \ \mathrm{ms}$

由图5-6和表1可得:在仿真场景1下,当 $\delta$ =0.2时, 忽略虚拟量测信息的ET-UKF与文献[6]中PT-FUKF 相比,平均位置RMSE增加幅度为10.48%、平均速度 RMSE增加幅度为7.45%, 平均通信频度减小幅度为52.25%, 计算量减小幅度为45.17%; 忽略虚拟量测信息的ET-UKF与利用虚拟量测信息的ET-UKF相比, 平均位置RMSE、平均速度RMSE和平均通信频度略有增加, 计算量明显降低.

**仿真场景2** 等速圆周航路,运动半径5000 m,角速度 $\omega = 0.05$  rad/s,航高3000 m.目标初始状态和状态转移矩阵分别为

$$\begin{split} X_{0} &= \\ \begin{bmatrix} 0 & -200 \text{ m/s } 5000 \text{ m } 0 \ 3000 \text{ m } 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \\ F_{k} &= \\ \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega T_{\mathrm{b}})}{\omega} & 0 & -\frac{1-\cos(\omega T_{\mathrm{b}})}{\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega T_{\mathrm{b}}) & 0 & -\sin(\omega T_{\mathrm{b}}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-\cos(\omega T_{\mathrm{b}})}{\omega} & 1 & \frac{\sin(\omega T_{\mathrm{b}})}{\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\omega T_{\mathrm{b}}) & 0 & \cos(\omega T_{\mathrm{b}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_{\mathrm{b}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{split}$$

利用式(6)所示的事件触发机制控制量测数据的传输后,系统的平均位置CRLB、平均速度CRLB和平均通信频度 $\bar{f}_c$ 随触发阈值 $\delta$ 的变化趋势如图7所示.





由图7可知,为了在减小系统通信量的同时兼顾在 一定范围内保证系统的估计精度,在仿真场景2下,将 触发阈值设为δ = 0.2较为合适.此时,仿真结果如图 8-9所示.



图 8 仿真场景2下, RMSE对比

Fig. 8 The comparison of RMSE under simulation scenario 2



× 忽略虚拟量测ET-UKF通信时刻

\*利用虚拟量测ET-UKF通信时刻

o 文献[6]中PT−FUKF通信时刻

图 9 仿真场景2下,第500次仿真实验中通信时刻对比 Fig. 9 The comparison of communication instants in 500th simulation under simulation scenario 2

表 2 仿真场景2下, RMSE,  $\overline{f}_c$ 及计算量对比 Table 2 The comparison of RMSE  $\overline{f}_c$  and

The comparison of KNDL, $f_c$ and
computational burden under
simulation scenario 2

	忽略虚拟	利用虚拟	文献[6]中
	量测ET-UKF	量测ET-UKF	PT-FUKF
$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{av}}^{\mathrm{pos}}$	5.15 m	5.13 m	$4.69~\mathrm{m}$
$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{av}}^{\mathrm{vel}}$	$1.60 \mathrm{~m/s}$	$1.58 \mathrm{~m/s}$	$1.51 \mathrm{m/s}$
通信频度 $\overline{f}_{c}$	0.4760	0.4754	1
计算时间表	$582 \mathrm{ms}$	$1005 \mathrm{ms}$	$1107 \ \mathrm{ms}$

由图8–9和表2可得:在仿真场景2下,当触发阈值 设置为 $\delta = 0.2$ 时,忽略虚拟量测信息的ET-UKF与文 献[6]中PT-FUKF相比,平均位置RMSE增加幅度为 9.81%、平均速度RMSE增加幅度为5.96%,平均通信 频度减小幅度为52.40%, 计算量减小幅度为47.43%; 忽略虚拟量测信息的ET-UKF与利用虚拟量测信息的 ET-UKF相比, 平均位置RMSE、平均速度RMSE和平 均通信频度仅略有增加, 而计算量则显著降低.

**仿真场景3** 俯冲航路,初始航高为6500m,纵向 加速度为10m/s<sup>2</sup>,水平速度为100m/s,航捷为500m. 目标初始状态和状态转移矩阵分别为

$$\begin{aligned} X_0 &= \begin{bmatrix} 5000 \text{ m} & -100 \text{ m/s} & 0 & 500 \text{ m} & 0 & 0 \\ & 6500 \text{ m} & 0 & -10 \text{ m/s}^2 \end{bmatrix}^{\text{T}}, \\ F_k &= I_{3\times 3} \otimes \begin{bmatrix} 1 & T_{\text{b}} & \frac{T_{\text{b}}^2}{2} \\ 0 & 1 & T_{\text{b}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用式(6)所示的事件触发机制控制量测数据的传输后,系统的平均位置CRLB、平均速度CRLB和平均通信频度 $f_c$ 随触发阈值 $\delta$ 的变化趋势如图10所示.





由图10可知,为了在减小系统通信量的同时兼顾 在一定范围内保证系统的估计精度,在仿真场景3下, 将触发阈值设为 $\delta = 0.2$ 较为合适. 当 $\delta = 0.2$ 时,仿真 结果如图11–12所示.

由图11-12和表3可得:在仿真场景3下,当触发阈 值设置为δ = 0.2时,忽略虚拟量测信息的ET-UKF与 文献[6]中PT-FUKF相比,平均位置RMSE增加幅度 为11.93%、平均速度RMSE增加幅度为8.55%,平均 通信频度减小幅度为50.50%,计算量减小幅度为 47.32%;忽略虚拟量测信息的ET-UKF与利用虚拟量 测信息的ET-UKF相比,平均位置RMSE、平均速度 RMSE和通信频度仅略有增加,而计算量则明显降低.





-----忽略虚拟量测ET-UKF ----利用虚拟量测ET-UKF ----文献[6]中PT-FUKF

#### 图 11 仿真场景3下, RMSE对比

Fig. 11 The comparison of RMSE under simulation scenario 3



★利用虚拟量测ET-UKF通信时刻

▼ 和用应该重测EI UKI通信时多

o 文献[6]中PT−FUKF通信时刻

图 12 仿真场景3下,第500次仿真实验中通信时刻对比

Fig. 12 The comparison of communication instants in 500th simulation under simulation scenario 3

#### 表 3 仿真场景3下, RMSE, $\overline{f}_c$ 及计算量对比 Table 3 The comparison of RMSE. $\overline{f}_c$ and

14010 0	The companion of Hillon, JC and
	computational burden under
	simulation scenario 3

忽略虚拟	利用虚拟	文献[6]中
量测ET-UKF	量测ETUKF	PT-FUKF
8.35 m	8.31 m	7.46 m
6.22  m/s	$6.17 \mathrm{~m/s}$	$5.73 \mathrm{~m/s}$
0.4950	0.4948	1
$570 \ \mathrm{ms}$	$994 \ \mathrm{ms}$	$1082 \ \mathrm{ms}$
	忽略虚拟 量测ET-UKF 8.35 m 6.22 m/s 0.4950 570 ms	<ul> <li>忽略虚拟</li> <li>利用虚拟</li> <li>量测ET-UKF</li> <li>量测ET-UKF</li> <li>8.35 m</li> <li>8.31 m</li> <li>6.22 m/s</li> <li>6.17 m/s</li> <li>0.4950</li> <li>0.4948</li> <li>570 ms</li> <li>994 ms</li> </ul>

综上, 3种典型测试场景下的仿真结果表明: 触发 阈值设置为 $\delta = 0.2$ 时, 利用式(6)所示的事件触发机 制可有效的减少系统的通信量, 同时系统的估计精度 下降较小; 与利用虚拟量测的ET-UKF相比, 忽略虚拟 量测的ET-UKF可在基本不影响系统估计精度的同时,进一步减小估计中心的计算量.

# **5.2** 实测航路下的实验结果与分析 (Experiment results and analysis under actual air route)

为进一步验证本文所设计的事件触发机制在实际 工程中的可行性,使用目标坐标测定仪实测的航路数 据进行实验.航路标准值由差分GPS和光电经纬仪等 高精度计量设备提供.坐标转换后的目标坐标测定仪 量测值和航路位置标准值如图13所示.



#### 图 13 实测航路的标准值与量测值 Fig. 13 The standard data and measured data of actual air route

由匀速直线航路、等速圆周航路和俯冲航路3种典 型测试场景下的仿真结果可知,对于所研究的光电跟 踪系统,触发阈值设为 $\delta = 0.2$ 可较好的兼顾减小系统 通信量与在一定范围内保证系统估计精度;同时,为 减小估计中心的计算量以更好的适应防空火控系统 较高的实时性要求,使用忽略虚拟量测信息的 ET-UKF. 实验结果如图14所示.



----- ET-UKF ----- 文献[6]中PT-FUKF





表 4	实测航路下估计精度、通信频度对比
Table 4	The comparison of RMSE and $\bar{f}_{\rm c}$ under

actual air route		
	ET-UKF	文献[6]中PT-FUKF
$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{av}}^{\mathrm{pos}}(\mathrm{m})$	6.85	6.10
$RMSE_{av}^{vel}(m/s)$	2.86	2.57
诵信频度	0.5403	1

由图14和表4可得,在图13所示的实测航路下,基于本文所设计的事件触发机制的ET-UKF与文献 [6]中的PT-FUKF相比,位置估计精度下降幅度为 12.30%、速度估计精度下降幅度为11.28%,系统通信 量减小幅度为45.97%.利用事件触发机制后,系统的 估计精度依然满足工程指标要求.

上述实验结果表明,本文所设计的事件触发机制 在实际工程中是可行的.

### 6 结论(Conclusions)

本文针对一类光电跟踪系统,为减小系统中通信 量和计算量,设计了基于非线性变换的事件触发机制; 为定量的评价系统的估计性能,给出了事件触发机制 下系统CRLB的递推计算式.综合考虑系统通信量、 计算量等因素,利用本文所设计的事件触发机制,在 理论上可保证系统的估计精度满足要求.典型测试场 景下的仿真和实测航路下的实验,验证了所设计的事 件触发机制的有效性和实际工程中的可行性.

#### 参考文献(References):

- DUAN Z S, HAN C Z, LI X R. Comments on "Unbiased converted measurements for tracking" [J]. *IEEE Transactions on Aerospace* and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1374 – 1377.
- [2] ZHAO Z L, LI X R, JILKOV V P. Best linear unbiased filtering with nonlinear measurements for target tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1324 – 1336.
- [3] LEI M, HAN C Z. Sequential nonlinear tracking using UKF and raw range-rate measurements [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 239 – 250.
- [4] JIAN Fusheng, Xu Yuemin, Yin Zejie. Enhanced multiple model particle filter for maneuvering target tracking [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(8): 1012 1016.
  (鉴福生, 徐跃民, 阴泽杰. 改进的多模型粒子滤波机动目标跟踪算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8): 1012 1016.)
- [5] HU Zhentao, ZHANG Yong, LIU Xianxing. Maneuvering target tracking algorithm based on ensemble Kalman filter with observation iterated update [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1517 – 1523. (胡振涛,张勇,刘先省. 基于量测迭代更新集合卡尔曼滤波的机动

目标跟踪算法 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1517 – 1523.)

- [6] CHEN Li, WANG Zhongxu. Research on data mining of redundant angle information in optic-electric tracking system with intermittent observations [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(7): 819 826.
  (陈黎, 王中许. 不完全量测下光电跟踪系统中冗余测角信息的攫取 研究 [J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 819 826.)
- [7] FEENEY L M, NILSSON M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment

第34卷

 [C] //Proceedings of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE, 2001, 3: 1548 – 1557.

- [8] SHNAYDER V, HEMPSTEAD M, CHEN B, et al. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications [C] //Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore: ACM, 2004: 188 – 200.
- [9] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 4258 – 4265.
- [10] BATTISTELLI G, BENAVOLI A, CHISCI L. Data-driven communication for state estimation with sensor networks [J]. Automatica, 2012, 48(5): 926 – 935.
- [11] LIU Q Y, WANG Z D, HE X, et al. Event-based recursive distributed filtering over wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(9): 2470 – 2475.
- [12] WANG L C, WANG Z D, HUANG T W, et al. An event-triggered approach to state estimation for a class of complex networks with mixed time delays and nonlinearities [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(11): 2497 2508.
- [13] LI W L, JIA Y M, DU J P. Event-triggered Kalman consensus filter over sensor networks [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(1): 103 – 110.
- [14] SHI D W, CHEN T W, SHI L. On set-valued Kalman filtering and its application to event-based state estimation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(5): 1275 – 1290.
- [15] LU K L, ZHOU R, LI H. Event-triggered cooperative target tracking in wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(5): 1326 – 1334.
- [16] ZHANG J H, KUAI Y M, REN M F, et al. Event-triggered distributed filtering for non-Gaussian systems over wireless sensor networks using survival information potential criterion [J]. *IET Control Theory* & Applications, 2016, 10(13): 1524 – 1530.
- [17] XIE C H, LI Y J, XIE Y, et al. On Kalman filter for stochastic system with correlated noises based on event-triggered sampling [C] //Proceedings of the 35th Chinese Control Conference. Chengdu: IEEE, 2016: 8330 – 8334.
- [18] YOU K Y, XIE L H. Kalman filtering with scheduled measurements [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(6): 1520 – 1530.
- [19] HAN D, MO Y L, WU J F, et al. Stochastic event-triggered sensor schedule for remote state estimation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(10): 2661 – 2675.

- [20] SEBASTIAN T, RAFFAELLO D A. Event-based state estimation with variance-based triggering [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(12): 3266 – 3281.
- [21] SONG W X, SUN J, CHEN J. Event-based  $H_{\infty}$  filtering for networked singular systems [C] //Proceedings of the 35th Chinese Control Conference. Chengdu: IEEE, 2016: 7503 – 7508.
- [22] TICHAVSKY P, MURAVCHIK C H, NEHORAI A. Posterior Cramér-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1374 – 1377.
- [23] WANG Guohong, XU Jianfeng, MAO Shiyi, et al. On the CRLB of height estimation in a 2-dimensional-radar-based network [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(1): 66 – 68. (王国宏, 许建峰, 毛士艺, 等. 2D 雷达组网中目标高度估计误差的 Cramér-Rao限 [J]. 航空学报, 2004, 25(1): 66 – 68.)
- [24] ZHONG Z, MENG H, WANG X. A comparison of posterior Cramér-Rao bounds for point and extended target tracking [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(10): 819 – 822.
- [25] ZHENG Y J, OZDEMIR O, NIU R X, et al. New conditional posterior Cramér-Rao lower bounds for nonlinear sequential Bayesian estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(10): 5549 – 5556.
- [26] YANG Xiaojun, MA Xiang, SONG Qingsong, et al. Sensor management for target tracking based on conditional posterior Cramér-Rao lower bounds [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(5): 543 548.
  (杨小军, 马祥, 宋青松, 等. 基于条件后验克拉美-罗下界的目标跟踪传感器管理 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(5): 543 548.)

作者简介:

**梁 苑** (1989--), 男, 博士研究生, 目前研究方向为事件触发估 计, E-mail: lyy1989316@163.com;

**戚国庆** (1977–), 男, 副教授, 目前研究方向为随机状态估计、多

传感器数据融合, E-mail: qiguoqing@njust.edu.cn;

**李银伢** (1976--), 男, 副教授, 目前研究方向为纯方位系统目标运动分析, E-mail: liyinya@njust.edu.cn;

盛安冬 (1964-), 男, 教授, 目前研究方向为多源信息融合、非线

性技术在被动跟踪中的应用, E-mail: shengandong@njust.edu.cn.