

© Айвазян С.А., Львов А.А., Есев А.А., Ткачук А.В.
Aivazyan S, Lvov A., Esev A., Tkachuk A.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ
НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВИЗИРНОЙ СИСТЕМЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**MATHEMATICAL SOFTWARE EVALUATION TRAJECTORY
GROUND TARGETS IN AN AUTOMATED SYSTEM SIGHTING AIRCRAFT**

Аннотация. Изложено математическое обеспечение модуля оценивания параметров движения цели комплексной автоматизированной визирной системы авиационных комплексов, реализующего алгоритм квазиоптимального оценивания параметров движения наземной цели в нормальной системе координат первого порядка комплексирования.

Annotation. Described software module for estimating the parameters of target motion a complex automated system sighting aircraft systems that implements the algorithm for estimating the parameters of motion of the quasi-surface targets in the normal coordinate system of first-order aggregation.

Ключевые слова. Летательный аппарат, сопровождение цели, визирная система, оптимальное оценивание.

Key words. Aircraft tracking, sighting system, optimal estimation.

Важнейшим компонентом комплексной автоматизированной визирной системы в режиме сопровождения наземной цели является модуль оценивания параметров движения цели (МОПДЦ), реализующий алгоритм квазиоптимального оценивания параметров движения наземной цели

$$\hat{X}_{Ц} = \left[\begin{array}{c} \hat{D}_{(g)} \\ \hat{W}_{Ц(g)} \end{array} \right]^T$$

в нормальной «g» системе координат первого порядка комплексирования. Полагается, что в блоке комплексной обработки информации реализованы, наряду с алгоритмом оценивания параметров движения цели, алгоритмы оценивания параметров вращательного и поступательного движения летательного аппарата (ЛА), а возможно и среды [1–3].

Исходные уравнения для параметров движения цели и измерения, на основании которых в рассматриваемом случае строится квазиоптимальный алгоритм оценивания параметров движения наземной цели, имеют следующий вид:

$$\frac{d\bar{X}_{Ц}(t)}{dt} = A_{Ц}(t)\bar{X}_{Ц}(t) - \hat{W}(t);$$

$$\bar{Z}(t) = \bar{\Phi}_{Ц}(\hat{X}_a, \bar{X}_{Ц}) + \bar{N}(t),$$

$$\text{где } \hat{X}_{Ц} = \left[\begin{array}{c} \hat{D}_{(g)} \\ \hat{W}_{Ц(g)} \end{array} \right]; A_{Ц} = \begin{bmatrix} 0 & E \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{W} = \left[\begin{array}{c} \hat{W}_{a(g)} \\ 0 \end{array} \right];$$

$$\bar{Z}_{Ц} = \begin{bmatrix} D \\ \varphi_B \\ \varphi_{\Gamma} \end{bmatrix}; 0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$\bar{N}(t)$ – вектор центрированных гауссовых белых шумов измерения дальности D и углов визирования $\varphi_B, \varphi_{\Gamma}$ цели относительно связанной системы координат с матрицей интенсивностей Q ;

$$\bar{\Phi}_{Ц}(\hat{X}_a, \bar{X}_{Ц}) = \left[\begin{array}{c} D = \sqrt{D_{xg}^2 + D_{yg}^2 + D_{zg}^2} \\ \varphi_B = -\arcsin\left(\frac{\hat{a}_{21}D_{xg} + \hat{a}_{22}D_{yg} + \hat{a}_{23}D_{zg}}{D \cos \varphi_{\Gamma}}\right) \\ \varphi_{\Gamma} = \arcsin\left(\frac{\hat{a}_{31}D_{xg} + \hat{a}_{32}D_{yg} + \hat{a}_{33}D_{zg}}{D}\right) \end{array} \right];$$

Айвазян Сергей Альбертович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России», тел.+7(495)612-24-48;

Львов Андрей Александрович – научный сотрудник, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России»;

Есев Андрей Александрович – кандидат технических наук, начальник отделения, Государственный лётно-испытательный центр имени В.П.Чкалова;

Ткачук Артём Викторович – летчик-испытатель, Государственный лётно-испытательный центр имени В.П.Чкалова.

Aivazyan Sergei – PhD, senior research fellow, FBU «4 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia», tel. +7 (495) 612-24-48;

Lvov Andrey – researcher, FBU "4 CRI Russian Defense Ministry";

Esev Andrey – Ph.D., head of the department, State flight test center Chkalov;

Tkachuk Artem – test pilot, State flight test center Chkalov.

$\widehat{\bar{X}}_a$ – вектор, составленный из оценок элементов $\widehat{a}_{i,j}$, ($i, j = \overline{1,3}$) – матрицы перехода от нормальной системы координат к связанной СК;

$\widehat{\bar{W}}_{(g)}$ – вектор оценок проекций земной скорости ЛА на оси нормальной «г» системы координат;

$\widehat{\bar{X}}_a, \widehat{\bar{W}}_{(g)}$ – определяются с использованием алгоритмов квазиоптимального оценивания параметров вращательного и поступательного движения ЛА, в общем случае входящих в состав блока комплексной обработки информации.

Предполагаются известными вероятностные характеристики $\bar{m}_{x_{II}0}$, $\Theta_{x_{II}0}$ вектора начальных условий $\bar{X}_{II}(t_0)$.

Алгоритм нелинейного квазиоптимального фильтра, построенного на основании вышеприведенных уравнений процесса изменения параметров движения цели и измерения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\widehat{\bar{X}}_{II}(t)}{dt} = A_{II}(t)\widehat{\bar{X}}_{II}(t) - \widehat{\bar{W}}(t) + \\ + B[\bar{Z}_{II}(t) - \bar{\varphi}_{II}(\widehat{\bar{X}}_a, \widehat{\bar{X}}_{II})]; \widehat{\bar{X}}_{II}(t_0) = \bar{m}_{x_{II}0}; \\ B = RC^{*T}Q^{-1}; \\ \frac{dR}{dt} = A_{II}R + RA_{II}^T - BC^*R + G^*; R(t_0) = \Theta_{x_{II}0}, \end{cases}$$

где

$$\bar{\varphi}_{II}(\widehat{\bar{X}}_a, \widehat{\bar{X}}_{II}) = \begin{bmatrix} \widehat{D} = \sqrt{\widehat{D}_{xg}^2 + \widehat{D}_{yg}^2 + \widehat{D}_{zg}^2}; \\ \widehat{\varphi}_B = -\arcsin\left(\frac{\widehat{a}_{21}\widehat{D}_{xg} + \widehat{a}_{22}\widehat{D}_{yg} + \widehat{a}_{23}\widehat{D}_{zg}}{\widehat{D} \cos \varphi_r}\right); \\ \widehat{\varphi}_r = \arcsin\left(\frac{\widehat{a}_{31}\widehat{D}_{xg} + \widehat{a}_{32}\widehat{D}_{yg} + \widehat{a}_{33}\widehat{D}_{zg}}{\widehat{D}}\right). \end{bmatrix}$$

В рассматриваемом примере построения комплексной автоматизированной визирной системы предполагается использование для расчёта оценок параметров движения цели фильтр 1-го порядка комплексирования. Однако в общем случае в этом блоке могут использоваться фильтры различного уровня комплексирования (1-го, 2-го, 3-го и 4-го уровней).

Также предполагается, что ошибки оценивания параметров вращательного и поступательного движения ЛА малы и ими можно пренебречь (в ряде практических случаев это пренебрежение вполне допустимо). Однако в случае необходимости можно построить алгоритм оценивания параметров движения цели, учитывающий эти ошибки. Для этого, используя данные о вероятностных характеристиках этих ошибок, можно построить алгоритм оценивания параметров движения цели как про-

цесса их изменения и измерения с неполностью определенными параметрами [2, 4–10].

Значения углов визирования цели φ_B, φ_r измеряются в процессе сопровождения цели, например, телевизионно-лазерная система (ТЛС) или штурманом-оператором с использованием ЭОВ или РПО. Дальность цели D измеряется лазерным дальномером или определяется угломестным способом по информации о высоте $H, \varphi_B, \varphi_r, \upsilon, \psi, \gamma$.

При прекращении измерений углов визирования цели φ_B, φ_r (в случае срыва сопровождения ТЛС или в промежутках между ручной коррекцией штурманом-оператором) или D (в паузах между импульсами лазерного дальмера) алгоритм МОПДЦ автоматически переходит в состояние экстраполяции соответствующих параметров движения цели или иначе в состояние программного сопровождения цели.

В зависимости от того, каким образом осуществляется измерение модуля вектора дальности цели и углов ее визирования, от того, находится ли система визирования в состоянии сопровождения цели, или произошел срыв сопровождения, или в перерывах между импульсами лазерного дальмера (ЛД), элементы матрицы интенсивности шума измерения вычисляются по следующим формулам:

$$q_{11} = \begin{cases} 1/q_D - \text{при измерении } D \text{ с помощью ЛД;} \\ 0 - \text{при отсутствии измерения } D; \\ 1/q_{D(H)} - \text{при определении } D \\ \text{угломестным способом;} \end{cases}$$

$$q_{22} = \begin{cases} 1/q_{\varphi_{AB}} - \text{при } K_T = 1; \\ 0 - \text{при } K_T = 0, K_M = 0; \\ 1/q_{\varphi_{PB}} - \text{при } K_M = 1; \end{cases}$$

$$q_{33} = \begin{cases} 1/q_{\varphi_{Ar}} - \text{при } K_T = 1; \\ 0 - \text{при } K_T = 0, K_M = 0; \\ 1/q_{\varphi_{Pr}} - \text{при } K_M = 1, \end{cases}$$

где K_T, K_M – битовые переменные, принимающие два значения 0 или 1, соответствующие состоянию ключей $K_T=1$ при автоматическом сопровождении цели с помощью ТЛС, в противном случае $K_T=0; K_M=1$ при программном сопровождении цели в период ручной коррекции (события, состоящие в выполнении равенств $K_T=1, K_M=1$, несовместны);

$q_{\varphi_{AB}}, q_{\varphi_{Ar}}$ – интенсивности погрешностей (принимаемых белыми шумами) автоматического углового сопровождения цели;

$q_{\varphi_{FG}}, q_{\varphi_{FG}}$ – интенсивности погрешностей измерения углов пеленга в режиме ПРС;

$q_D, q_{D(H)}$ – интенсивности погрешностей определения D , соответственно при измерении с помощью лазерного дальномера и угломестным способом.

При обнулении элементов матрицы Q -1: q_{11} или q_{22} , q_{33} и в связи с этим обнулением определенных элементов матрицы B обнуляются элементы вектора $B[\bar{Z}_{\Pi}(t) - \hat{\Phi}_{\Pi}(\hat{X}_a, \hat{X}_{\Pi})]$, соответствующие не измеря-

емым переменным (соответственно D, φ_B, φ_G), и тем самым обеспечивается экстраполяция параметров движения цели и не измеряемых величин D, φ_B, φ_G , вычисляемых по выше записанным формулам. Экстраполируемые значения углов визирования цели φ_B, φ_G при срыве углового сопровождения цели подаются в соответствующую визирную систему, которая находится в состоянии срыва сопровождения, тем самым, обеспечивая программное сопровождение цели.

Литература

1. Военно-технические вопросы высшей математики и математические основы военной кибернетики. Харьков: ВИРТА, 1990. 288 с.
2. Кукушкин ЮА, Богомолов АВ, Ушаков ИБ. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем – М: Новые технологии, 2004. 36 с.
3. Тисенко В.Н. Агрегированные модели в системах испытаний сложных технических объектов. - СПб: Политехника, 1998. 151 с.
4. Фёдоров М.В., Богомолов АВ., Цыганок Г.В., Айвазян С.А. Технология планирования многофакторных экспериментальных исследований и построения эмпирических моделей комбинированных воздействий факторов на операторов эргатических систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 5. С. 44 – 49.
5. Фёдоров М.В., Коломиец Л.В., Богомолов АВ., Мерезко А.Н., Солдатов А.С., Есев А.А. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 5. С. 38 – 41.
6. Щеглов И.Н., Богомолов АВ., Печатнов Ю.А. Исследование влияния репрезентативности обучающей выборки на качество работы методов распознавания образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2002. № 9-10.
7. Макаренко В.Г., Подорожняк АА., Рудаков С.В., Богомолов АВ. Инерциально-спутниковая навигационная система управления транспортными средствами // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 64-71.
8. Кукушкин ЮА, Богомолов АВ, Ушаков ИБ. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии. 2004. № 7. 32 с.
9. Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов АВ. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5. № 1. С. 66-72.
10. Макаренко В.Г., Богомолов АВ., Рудаков С.В., Подорожняк АА. Технология построения инерциально-спутниковой навигационной системы управления транспортными средствами с нейросетевой оптимизацией состава вектора измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 39-44.

Материал поступил в редакцию 19. 06. 2014 г.