

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОПРОВОЖДАЮЩЕГО СЛЕЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ С ПОДВИЖНОГО ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ

Е. И. Ярмошевич, Е. Е. Михайлова

*Федеральный государственный научно-исследовательский испытательный центр радиоэлектронной борьбы и оценки эффективности снижения заметности МО РФ
Воронежский государственный университет*

Проведена оценка эффективности сопровождающего слежения за движущимся объектом с подвижного пункта управления по вероятности выхода прицельной марки прибора наблюдения за контуры объекта от времени прерывания зрительного контакта с объектом, составляющего часть общего времени сопровождения объекта до минимальной дальности сближения с ним пункта управления. Вероятность выхода прицельной марки определялась по результатам моделирования процесса слежения как условная вероятность выхода прицельной марки при условии отсутствия срывов слежения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сопровождающее слежение человеком оператором объекта с подвижного пункта управления является распространенной операцией: при оценке положения предметов, окружающих движущегося человека, при оценке положения встречного транспортного средства относительно строительной оси автомобиля, при ручной стыковке космических аппаратов, при идентификации транспортных средств на автомобильных дорогах с помощью пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов и т.п. В [1, 2] синтезирована модель двигательной системы оператора и выполнена оценка эффективности сопровождающего слежения с неподвижного пункта управления (ПУ) при прерывании визуальной информации.

Существенным отличием сопровождающего слежения с подвижного ПУ является наличие нелинейных зависимостей между параметрами управления ПУ, параметрами траектории ПУ и параметрами модели двигательной системы человека-оператора.

В связи с этим, целью работы является оценка основных параметров модели двигательной системы человека-оператора и характеристик контура сопровождения объекта, а также оценка вероятности выхода прицельной марки прибора наблюдения за контур объекта при сближении ПУ и сопровождаемого объекта. В данной работе на основе синтезированной модели [1] формируются оценки параметров траекто-

рии линии визирования объекта при условии жесткой связи линии визирования объекта и вектора дальности ПУ-сопровожаемый объект.

Известно, что человек-оператор управляет прицельной маркой по азимуту и углу места практически независимо [3]. Поэтому будем рассматривать слежение только по азимуту.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Пусть в поле зрения визира человек-оператор наблюдает движущийся объект с распределением эффективной яркости $S(x, y)$ (далее по тексту — яркость), траектория которого задана вектором $\vec{\lambda}(t)$, подлежащим измерению. Зависимость яркости объекта от его положения относительно зрительной оси учитывается функцией пространственной (угловой) чувствительности зрительной системы $G(x)$. Сигнал наблюдения $r(x, y, t)$ представим в следующем виде

$$r(x, y, t) = G(x - \vec{\lambda}(t))S(x - \vec{\lambda}(t), y) + n(x - \vec{\lambda}, y, t), \quad (1)$$

где $\langle n(x - \lambda, y, t)n(x - \lambda + \Delta x, y + \Delta y, t + \tau) \rangle = 0.5N(\lambda)\delta(x - \Delta x, y - \Delta y)\delta(\tau)$ — корреляционная функция пространственно-временного белого шума зрительной системы $n(x - \lambda, y, t)$ в точке $x = \lambda$; $N(\lambda)$ — односторонняя спектральная плотность локально-однородного шума.

Для сопровождающего слежения с подвижного ПУ траекторию объекта относительно прицельной марки подвижного прибора наблюдения можно задать следующей системой стохастических дифференциальных уравнений [4]:

Достаточно общей моделью траектории объекта $\hat{\lambda}(t) = (\varphi, \mathbf{v})^T$ является модель в виде стохастического дифференциального уравнения [4]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} &= \frac{-2\dot{R}}{R} \mathbf{v} + \frac{v_{\text{ПУ}}}{R} \cos(\varphi - \theta_{\Gamma}) \dot{\theta}_{\Gamma} + \frac{v_{\text{Ц}}}{R} \cos(\varphi - \alpha) \dot{\alpha}, \quad (2) \\ \langle \varphi(0) \rangle &= \varphi_0, \quad \langle \mathbf{v}(0) \rangle = \mathbf{v}_0, \quad d_{\varphi}(0) = d_{\varphi}, \quad d_{\mathbf{v}}(0) = d_{\mathbf{v}}, \end{aligned}$$

где φ — угол визирования объекта, θ_{Γ} — направление вектора скорости ПУ, α — курсовой угол объекта, $v_{\text{ПУ}}$ — скорость ПУ, $v_{\text{Ц}}$ — скорость объекта, R — дальность «объект—ПУ». Начальные условия в системе (2) являются гауссовскими величинами с заданными математическими ожиданиями и дисперсиями.

Измеряемыми зрительной системой оператора величинами являются угол и угловая скорость линии визирования объекта относительно прицельной марки прибора наблюдения.

При моделировании предполагалось, что закон управления вектором угловой скорости ПУ является законом пропорциональной навигации с навигационной постоянной, равной 3:

$$\dot{\theta}_{\Gamma} = \frac{3\dot{R}\mathbf{v}}{v_{\text{ПУ}}}$$

Для проведения моделирования процесса сопровождающего слежения объекта с подвижного ПУ необходимо определить вид коэффициента передачи модели двигательной системы оператора на основе решения системы (2). В общем случае решение системы (2) получают либо методами аналогового моделирования, либо численными методами. Для оценки вида коэффициента передачи модели двигательной системы в контуре слежения рассматривается случай, когда $\cos(\varphi - \theta_{\Gamma}) \rightarrow 1$. Для этого случая система (2) упрощается и ее можно привести к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} &= \frac{-2\dot{R}}{R} \mathbf{v}, \quad (3) \\ \langle \varphi(0) \rangle &= \varphi_0, \quad \langle \mathbf{v}(0) \rangle = \mathbf{v}_0, \quad d_{\varphi}(0) = d_{\varphi}, \quad d_{\mathbf{v}}(0) = d_{\mathbf{v}}. \end{aligned}$$

Тогда система уравнений для оценок $\hat{\varphi}$ и $\hat{\mathbf{v}}$ будет иметь вид [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\varphi}} &= \hat{\mathbf{v}} + D_{11} \frac{\partial F}{\partial \hat{\varphi}}, \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}} &= c\hat{\mathbf{v}} + D_{21} \frac{\partial F}{\partial \hat{\varphi}}, \quad (4) \\ \langle \hat{\varphi}(0) \rangle &= \varphi_0, \quad \langle \hat{\mathbf{v}}(0) \rangle = \mathbf{v}_0, \quad c = -\frac{\dot{R}}{R}. \end{aligned}$$

Дисперсии D_{ij} ошибок измерения $\hat{\varphi}$ и $\hat{\mathbf{v}}$ определяются из следующей системы:

$$\begin{aligned} \dot{D}_{11} &= 2D_{21} + D_{11}^2 \frac{\partial^2 F}{\partial \hat{\varphi}^2}, \\ \dot{D}_{21} &= cD_{21} + D_{22} + D_{21}D_{11} \frac{\partial^2 F}{\partial \hat{\varphi}^2}, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\dot{D}_{22} = 2cD_{22} + D_{21}^2 \frac{\partial^2 F}{\partial \hat{\varphi}^2},$$

$$D_{11}(0) = d_{\varphi}, \quad D_{21}(0) = D_{12}(0) = 0, \quad D_{22}(0) = d_{\mathbf{v}}.$$

В линейном приближении для $\frac{\partial F}{\partial \hat{\varphi}}$ на отрезке времени Δt таком, что $c(\Delta t) \approx \text{const}$, коэффициент передачи квазиоптимального фильтра $K_{\varphi\hat{\varphi}}(p, t)$ определяется аналогично [1]:

$$K_{\varphi\hat{\varphi}}(p, t) = \frac{k_y(T_2 p + 1)}{p(T_{\Phi} p + 1)}, \quad (6)$$

где

$$T_2 = \frac{T_1 T_{\Phi}}{T_1 + T_{\Phi}}, \quad T_1 = \frac{D_{11}}{D_{21}}, \quad T_{\Phi} = \frac{1}{c(\Delta t)},$$

$$k_y = D_{21} a(T_1 + T_{\Phi}), \quad \left\langle \frac{\partial F}{\partial \hat{\varphi}} \right\rangle = a(\varphi - \hat{\varphi}).$$

В (6) параметр a , входящий в коэффициент усиления k_y , определяется характеристиками зрительной системы оператора и системы управления движениями рук [1].

Оценка параметров модели оператора и расчет вероятности выхода прицельной марки прибора наблюдения за контуры объекта проводились на трехмерной модели сопровождения равнояркого объекта в форме параллелепипеда с размерами: $3.5 \times 5 \times 2.5$ м³ и типовыми значениями контраста 0.012...0.5 на равноярком фоне с яркостью 100 нт. Высота полета подвижного ПУ принималась равной 100 м. При этом предполагалось, что коэффициент передачи оператора (6) стационарен для отрезков времени ~0.1 с, равных времени обработки зрительной информации [1].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости коэффициента усиления оператора от контраста для типового значения углового увеличения прибора наблюдения $\Gamma = 3^{\times}$, начальных дальностей сопровождения 1000 и 3000 м, конечной дальности, равной 300 м. Из приведенной зависимости следует, что коэффициент

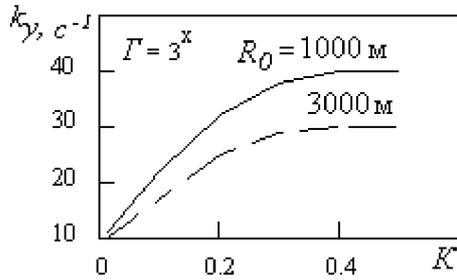


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления модели оператора от видимого контраста объекта при увеличении прибора наблюдения $\Gamma = 3^x$ и начальных дальностей слежения R_0

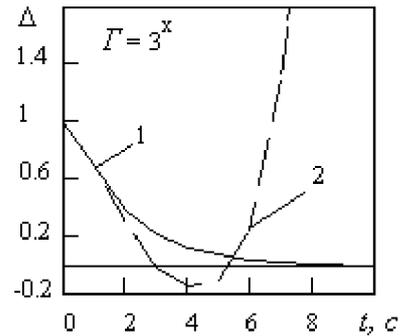


Рис. 2. Переходные характеристики контура слежения по ошибке сопровождения для увеличения прибора наблюдения $\Gamma = 3^x$. Кривая 1 соответствует контрастам 0.5...0.1, кривая 2 — пороговому контрасту, равному 0.012

усиления можно считать линейным для контрастов, больших 0.3.

На рис. 2 приведены переходные характеристики контура слежения для контрастов 0.5...0.1 (кривая 1) и порогового контраста, равного 0.012 (кривая 2). Из приведенных зависимостей следует, что при пороговом контрасте наблюдается срыв сопровождения.

На рис. 3 представлены усредненные зависимости вероятности выхода прицельной марки за контур объекта от времени нарушения зрительного контакта с объектом для скоростей движения объекта, равных 2, 5, 10 м/с, и времени сопровождения, изменяющегося в пределах 3...9 с, контраста объекта, равного 0.5, курсовые углы скорости объекта выбирались такими, для которых начальный угловой размер объекта был равен 10 угл. мин. Скорость ПУ принималась равной 300 м/с, длина и ширина непросматриваемых участков местности изменялась от 10 до 25 м. При нарушении зрительного контакта с объектом сопровождение объекта осуществлялось путем запоминания угловой скорости линии визирования оператором или экстраполятором [2]. Вероятность выхода прицельной марки за контур объекта определялась как условная вероятность по отношению числа благоприятных событий к общему числу событий без срывов сопровождения. Из приведенных зависимостей следует, что с уменьшением скорости объекта вероятность выхода за контуры объекта увеличивается с 0.2 до 0.8 при изменении скорости объекта от 10 до 2 м/с, при этом время прерывания зрительного контакта составило от 1.8 до 5.5 с.

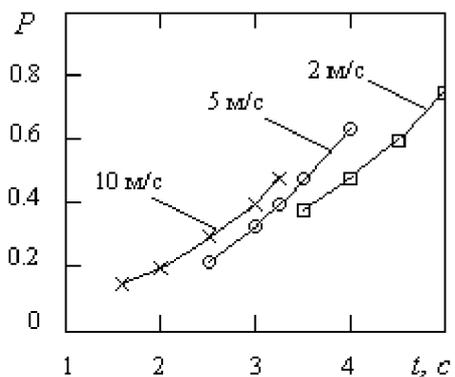


Рис. 3. Вероятность выхода прицельной марки за контур объекта в зависимости от времени нарушения зрительного контакта с объектом для скоростей движения объекта, равных 2, 5, 10 м/с, и времени сопровождения, изменяющегося в пределах 3...9 с

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определен вид коэффициента передачи двигательной системы оператора. Показано, что коэффициент передачи является нелинейным нестационарным звеном. Показано, что для отрезков времени, равных времени обработки зрительной информации (0.1 с) и контрастов, больших 0.3, при минимальной дальности окончания сопровождения, равной 300 м, коэффициент передачи можно считать линейным стационарным звеном.

Моделирование процесса сопровождения объекта с подвижного ПУ показало, что вероятность выхода прицельной марки прибора наблюдения за контур объекта существенно

зависит от относительной скорости движения объекта и пункта управления. При уменьшении скорости объекта на непросматриваемых участках местности вероятность выхода прицельной марки прибора наблюдения за контур объекта возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярмошевич Е.И. Передаточная функция человека-оператора, осуществляющего слежение, адаптивная к условиям наблюдения / Е. И Ярмошевич, Е. Е Михайлова // Информационно-измерительные управляющие системы. — 2006. — № 12. — С. 56—60.

2. Ярмошевич Е.И. Эффективность адаптивной к изменяющимся условиям наблюдения модели человека-оператора, осуществляющее визуальное сопровождение объекта. / Е. И Ярмошевич, С. В. Утемов, Е. Е Михайлова // Информационно-измерительные управляющие системы. — 2006. — № 12. — С. 53—55.

3. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей

системы. М.: Наука. 1981. 288 с.

4. Максимов М.В., Меркулов В.И. Радиоэлектронные следящие системы. М.: Радио и связь, 1990. — 256 с.

5. Шеридан Т.Б., Ферелл У.Р. Системы человек — машина. М.: Машиностроение. 1980. 400 с.

6. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина. 1966. 349 с.

7. Баблицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. М.: Радио и связь. 1982. 264 с.

8. Ярмошевич Е.И. Модель сигналов в первичном отделе зрительно-двигательной системы человека. Межвуз. НТК. (24—25 ноября 2004 г.) Тезисы докл. Воронеж: ВИРЭ. 2004. С. 111—112.

9. Справочная книга по светотехнике. М.: Энергоатомиздат. 1982. 472 с.

10. Михайлова Е.Е., Ярмошевич Е.И. Потенциальная точность оценки координат объекта зрительной системой человека. Межвуз. сб. научн. трудов «Математическое обеспечение ЭВМ» — Воронеж: ВГУ. 2002. С. 117—120.

*Статья принята к опубликованию
25 декабря 2006 г.*