

14. Solodovnikov V.V., Filimonov A.B., Filimonov N.B. Analiz kompensatsionnogo podkhoda k sintezu sistem upravleniya [Analysis of compensatory approach to the synthesis of control systems], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 1979, No. 2, pp. 27-32.
15. Solodovnikov V.V., Filimonov N.B. Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [The dynamic quality of automatic control systems]. Moscow: MVTU im. N.E. Baumana, 1987, 84 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Н. Лебедев.

**Филимонов Александр Борисович** – Московский государственный университет приборостроения и информатики; e-mail: filimon\_ab@mail.ru; 107996, г. Москва, ул. Стромынка, 20; тел.: +79032929125; кафедра компьютерных информационно-управляющих систем; д.т.н.; профессор.

**Филимонов Николай Борисович** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; e-mail: nbfilimonjv@mail.ru; 119991, Москва, ГСП-2, Ленинские горы; тел.: +79165147102; кафедра физико-математических методов управления; д.т.н.; профессор.

**Filimonov Aleksandr Borisovich** – Moscow State University of Measurements and Information; e-mail: filimon\_ab@mail.ru; 20, Stromynka street, Moscow, 107996, Russia; phone: +79032929125; the department of computer information-control systems; dr. of eng. sc.; professor.

**Filimonov Nikolay Borisovich** – M.V. Lomonosov Moscow State University; e-mail: nbfilimonov@mail.ru; Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; phone: +79165147102; the department of physics and mathematical methods of control; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 519.283

**К.В. Андреев, Е.Я. Рубинович**

### **УПРАВЛЕНИЕ БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТЫ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ ПРИ УГЛОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА ПОДВИЖНОЙ ЦЕЛЬЮ**

*Рассматривается задача построения траектории полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА), выполняющего наблюдение за подвижной целью по угломерной информации. В качестве наблюдений в каждый момент времени выступают углы азимута и возвышения цели. Построение траектории полета осуществляется с использованием карты рельефа местности. Рассмотрены два сценария. В первом – цель движется вдоль дороги, которая задается в трехмерном пространстве однопараметрической кривой. Второй случай предполагает свободное движение цели вдоль поверхности Земли, которая допускает двухпараметрическое описание. Для обоих сценариев приведены уравнения фильтра Калмана для фильтрации угловых наблюдений при условии, что параметризация является натуральной и кусочно-гладкой. Суть управления БПЛА состоит в изменении углов рысканья и тангажа. Решение задачи основано на применении принципа Максимиума Л.С. Понтрягина, с помощью которого задача оптимального управления на отрезке  $t \in [0; T]$  с фиксированным временем  $T$  сводится к краевой задаче с граничными условиями на обоих концах траектории (при  $t = 0$  и при  $t = T$ ). Полученная двухточечная задача решается численным методом. При движении цели вдоль однопараметрической линии дороги объема получаемой информации оказывается достаточно для того, чтобы точность оценки была высокой, а траектория полета БПЛА не оказывала существенного влияния на точность оценивания и являлась близкой к прямой линии. В случае движения цели вдоль двухпараметрической поверхности Земли (рассмотрены сценарии пересечения целью холма или балки) БПЛА осуществляет маневр путем изменения как угла рысканья, так и угла тангажа.*

*БПЛА; фильтр Калмана; оптимальное управление.*

K.V. Andreev, E.Ya. Rubinovich

## UAV GUIDANCE WHEN TRACKING A GROUND MOVING TARGET WITH BEARING-ONLY MEASUREMENTS AND DIGITAL ELEVATION MAP SUPPORT

*UAV trajectory optimization problem for bearing-only measurements with digital elevation map support is considered. UAV performs both azimuth and elevation angles measurements. Two possible scenarios are considered: moving with constant velocity target along a road and on the Earth surface described by digital elevation map. UAV is assumed to fly with constant velocity and with pitch and yaw angles taken as control function. The first scenario utilizes a road parameterization as a single-parameter curve. The second scenario uses two parameters to describe the Earth surface. Kalman filter equations are written for both scenarios under assumption that parameterized road and Earth surface are continuous and piecewise smooth functions. The problem solution is based on Pontryagin's maximum principle. Using this principle, an optimum control problem is reduced to two-point boundary problem with boundary conditions given at  $t = 0$  and  $t = T$ , where the mission time  $T$  is fixed and then solved numerically. When target moves along a single-parameter road curve, the received information amount is enough to get precise target motion parameters estimate and trajectory choice doesn't affect the estimation precision. The most interesting case is a target moving along Earth surface. In this scenario the UAV performs maneuvers both with pitch and yaw control angles.*

*UAV; Kalman filter; optimal control.*

**Введение.** Слежение за подвижной целью с помощью угломерной информации [1–3] требует от мобильного наблюдателя выполнения некоторых маневров, иначе цель может оказаться ненаблюдаемой [4, 5]. В этом случае извлечение дополнительной сопутствующей информации, например, при помощи использования карты местности, может оказаться крайне полезным, причем как на этапе фильтрации угловых наблюдений [6], так и на этапе планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Карты местности при планировании траектории БПЛА используются в основном для формирования опасных для полета областей [7]. Задача состоит в построении (в режиме реального времени) допустимой траектории полета БПЛА, позволяющей минимизировать ошибки оценок элементов движения цели (ЭДЦ).

Рассмотрены два сценария слежения. В первом – цель движется по единственной дороге и не может ее покинуть. Во втором – цель движется вдоль (некоторым образом параметризованной) гладкой поверхности Земли.

Предполагается, что между БПЛА и целью всегда имеется линия прямой видимости [8], потому что точность определения углов азимута и возвышения, по которым строится оценка ЭДЦ, постоянна в течение всего полета, поскольку отношение сигнал-шум изменяется незначительно [9, 10]. В отличие от многих работ, посвященных планированию траекторий БПЛА [11, 12], будем рассматривать не дискретное, а непрерывное время, что существенно упрощает применение теории оптимального управления.

**Движение вдоль дороги. Постановка задачи.** Пусть цель движется вдоль некоторой кусочно-гладкой кривой в трехмерном пространстве с натуральной параметризацией  $\tau$

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 + \xi(\tau) \\ \eta = \eta_0 + \eta(\tau) \\ \zeta = \zeta_0 + \zeta(\tau) \end{cases}$$

и не имеет возможности покинуть заданную траекторию (движение в горах). Тогда для определения ЭДЦ достаточно в каждый момент времени иметь оценку параметра  $\tau$  и его производной по времени  $\dot{\tau}$ , что задает оценку линейной скорости движения цели вдоль дороги.

Определим систему координат  $OXYZ$ , в которой плоскость  $OXY$  – касательная к поверхности Земли, а ось  $OZ$  направлена вертикально вверх. Начало  $O$  такой системы координат свяжем с точкой нахождения БПЛА. Пусть БПЛА управляется посредством изменений углов рысканья  $\beta = \beta(t)$  и тангажа  $\gamma = \gamma(t)$  в зависимости от времени при неизменном значении величины скорости  $V$  полета. В этом случае относительные координаты цели  $(x, y, z)$  в системе отсчета  $OXYZ$ , связанной с БПЛА, задаются системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = \xi_\tau \dot{\tau} - V \cos \beta \cos \gamma \\ \dot{y} = \eta_\tau \dot{\tau} - V \cos \beta \sin \gamma, \\ \dot{z} = \zeta_\tau \dot{\tau} - V \sin \beta \end{cases}$$

где  $\xi_\tau, \eta_\tau$  и  $\zeta_\tau$  – производные  $\xi, \eta, \zeta$  по  $\tau$ , соответственно. Относительные координаты цели являются функциями времени и зависят как от параметризации дороги, т.е. от  $\xi, \eta, \zeta$ , так и от выбранных управлений  $\beta$  и  $\gamma$ . Точные значения углов азимута и возвышения задаются вектор-функцией наблюдений  $\phi = \phi(t) = (\phi^A(t), \phi^E(t))'$  (здесь и далее индекс «штрих» означает транспонирование) относительных координат  $(x, y, z)$  цели, где компоненты

$$\phi^A(t) = \text{atan} \frac{y(t)}{x(t)}, \quad \phi^E(t) = \text{atan} \frac{z(t)}{\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}}.$$

В процессе наблюдений к точным значениям  $\phi^A$  и  $\phi^E$  добавляется помеха – белый шум заданной интенсивности.

Запишем теперь уравнения расширенного (линеаризованного) фильтра Калмана [13] в непрерывном времени [14] для оценки  $\hat{\rho} = \hat{\rho}(t)$  вектор-столбца  $\rho = \rho(t) = (\tau, \dot{\tau})'$  ЭДЦ, определяемой матрицей ковариации  $\mathbf{P} = \mathbf{P}(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\rho}}{dt} &= \mathbf{F}\hat{\rho} + \mathbf{P}\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}(\phi - \mathbf{H}\hat{\rho}), \\ \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{F}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{F}' + \mathbf{C}\mathbf{Q}\mathbf{C}' - \mathbf{P}\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{P}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{F}$  описывает линейную динамику ЭДЦ, т.е.  $\dot{\rho} = \mathbf{F}\rho$ . В предположении, что цель движется равномерно вдоль дороги,  $\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ . Матрица  $\mathbf{H}$  представляет собой линеаризованную (в окрестности текущей оценки относительных координат цели) функцию наблюдений  $\phi = \phi(t)$ , матрица  $\mathbf{R}$  – ковариацию наблюдений. В случае маневрирующей цели матрица  $\mathbf{Q}$  задает интенсивность случайного броуновского процесса, моделирующего манёвры цели.

Произведем линеаризацию наблюдений, обозначив  $r_f = \sqrt{x^2 + y^2}$  и  $r_s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ . Для этого распишем полные производные наблюдений по параметру  $\tau$

$$\frac{d\phi^A}{d\tau} = \phi_\tau^A = \frac{x\eta_\tau - y\xi_\tau}{r_f^2}, \quad \frac{d\phi^E}{d\tau} = \phi_\tau^E = \frac{r_f^2\zeta_\tau - 2z(x\xi_\tau + y\eta_\tau)}{2r_s^2r_f}$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \phi_\tau^E \\ \phi_\tau^A \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{xx} & 0 \\ 0 & q_{vv} \end{pmatrix}$$

и произведем умножение матриц в уравнении Риккати (1) для матрицы ковариации

$$\begin{aligned} \mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} &= \begin{pmatrix} (\phi_\tau^A)^2\sigma_A^{-2} + (\phi_\tau^E)^2\sigma_E^{-2} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{P}\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{P} &= \begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xv} \\ p_{xv} & p_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xv} \\ p_{xv} & p_{vv} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} p_{xx}^2 & p_{xx}p_{xv} \\ p_{xx}p_{xv} & p_{vv}^2 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Задача оптимального управления ставится в непрерывном времени на фиксированном отрезке  $t \in [0; T]$  и формулируется следующим образом. Среди всех допустимых управлений  $\beta(t)$  и  $\gamma(t)$  выбрать такие, для которых при экстраполяции оценки  $\hat{\rho}(0)$  в силу уравнения  $\dot{\rho} = \mathbf{F}\rho$ ,  $t \in [0; T]$ , след матрицы ковариации  $\hat{\mathbf{P}}(T)$  в конечный момент времени был бы минимальным.

**Решение задачи.** Для решения поставленной задачи применим принцип максимума Л.С. Понтрягина [15, 16]. Следуя принципу максимума, построим сопряженную систему дифференциальных уравнений. Для этого предварительно запишем соответствие между фазовыми переменными системы и сопряженными переменными:

$$\{p_{xx}, p_{xv}, p_{vv}, x, y, z\} \rightarrow \{\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6\}.$$

В соответствии с введенными обозначениями, гамильтониан системы имеет вид

$$H = \psi_1(2p_{xv} + q_{xx} - p_{xx}^2 h) + \psi_2(p_{vv} - p_{xx} p_{xv} h) + \psi_3(q_{vv} - p_{xv}^2 h) + \psi_4(\xi_\tau \dot{t} - V \cos \beta \cos \gamma) + \psi_5(\eta_\tau \dot{t} - V \cos \beta \sin \gamma) + \psi_6(\zeta_\tau \dot{t} - V \sin \beta).$$

Далее, поскольку производные  $\xi_\tau$ ,  $\eta_\tau$  и  $\zeta_\tau$  зависят только от параметра  $\tau$ , то сопряженная система дифференциальных уравнений принимает представление

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = h(2p_{xx}\psi_1 + p_{xv}\psi_2) \\ \dot{\psi}_2 = -2\psi_1 + h(p_{xx}\psi_2 + 2p_{xv}\psi_3) \\ \dot{\psi}_3 = -\psi_2 \\ \dot{\psi}_4 = (p_{xx}^2\psi_1 + p_{xx}p_{xv}\psi_2 + p_{xv}^2\psi_3)h'_x \\ \dot{\psi}_5 = (p_{xx}^2\psi_1 + p_{xx}p_{xv}\psi_2 + p_{xv}^2\psi_3)h'_y \\ \dot{\psi}_6 = (p_{xx}^2\psi_1 + p_{xx}p_{xv}\psi_2 + p_{xv}^2\psi_3)h'_z \end{cases}$$

Вычислим теперь входящие в правую часть частные производные  $h'_{\{x,y,z\}} = \frac{\partial h}{\partial \{x,y,z\}}$  по относительным координатам цели. Для этого продифференцируем  $\phi_\tau^A$  и  $\phi_\tau^E$  по координатам  $x, y, z$  с учетом того, что  $\frac{dr_*}{dj} = \frac{j}{r_*}$ , где  $r_*$  – любой из  $r_f$  или  $r_s$ ,

a  $j$  – любой из  $x, y, z$ . Для  $\phi_\tau^A$  имеем

$$\frac{\partial \phi_\tau^A}{\partial x} = \frac{(y^2 - x^2)\eta_\tau + 2xy\xi_\tau}{r_f^4}, \quad \frac{\partial \phi_\tau^A}{\partial y} = -\frac{(x^2 - y^2)\xi_\tau + 2xy\eta_\tau}{r_f^4}, \quad \frac{\partial \phi_\tau^A}{\partial z} = 0.$$

Производные  $\phi_\tau^E$  по координатам задаются следующими выражениями.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_\tau^E}{\partial x} &= \frac{x(3r_f^2 + z^2)(2z(x\xi_\tau + y\eta_\tau) - r_f^2\zeta_\tau)}{2r_s^4 r_f^3} + \frac{x\zeta_\tau - z\xi_\tau}{r_s^2 r_f} \\ \frac{\partial \phi_\tau^E}{\partial y} &= \frac{y(3r_f^2 + z^2)(2z(x\xi_\tau + y\eta_\tau) - r_f^2\zeta_\tau)}{2r_s^4 r_f^3} + \frac{y\zeta_\tau - z\eta_\tau}{r_s^2 r_f} \\ \frac{\partial \phi_\tau^E}{\partial z} &= \frac{z(2z(x\xi_\tau + y\eta_\tau) - r_f^2\zeta_\tau)}{r_s^4 r_f} - \frac{x\xi_\tau + y\eta_\tau}{r_s^2 r_f} \end{aligned}$$

Получив все необходимые частные производные, находим

$$h'_{\{x,y,z\}} = \frac{2\phi_\tau^E}{\sigma_E^2} \frac{\partial \phi_\tau^E}{\partial \{x,y,z\}} + \frac{2\phi_\tau^A}{\sigma_A^2} \frac{\partial \phi_\tau^A}{\partial \{x,y,z\}}.$$

Оптимальное управление определяется из условия максимума гамильтониана по управлению

$$\max_{\beta, \gamma} \{\psi_4(\xi_\tau \dot{t} - V \cos \beta \cos \gamma) + \psi_5(\eta_\tau \dot{t} - V \cos \beta \sin \gamma) + \psi_6(\zeta_\tau \dot{t} - V \sin \beta)\},$$

что дает следующую программу управления.

$$\begin{aligned} \sin \beta &= -\frac{\psi_6}{\sqrt{\psi_4^2 + \psi_5^2 + \psi_6^2}}, & \cos \beta &= \frac{\sqrt{\psi_4^2 + \psi_5^2}}{\sqrt{\psi_4^2 + \psi_5^2 + \psi_6^2}}, \\ \sin \gamma &= -\frac{\psi_5}{\sqrt{\psi_4^2 + \psi_5^2}}, & \cos \gamma &= -\frac{\psi_4}{\sqrt{\psi_4^2 + \psi_5^2}}. \end{aligned}$$

Условия трансверсальности определены для сопряженных переменных на правом конце (на левом конце все переменные имеют заданные начальные условия)

$$\psi_{1,3}^f = -1; \quad \psi_{2,4,5,6}^f = 0.$$

Оценка элементов скоростей важнее оценки координат цели, потому с помощью нормировочных коэффициентов в качестве единицы скорости выбран метр в секунду, а в качестве единицы длины рассматривается километр.

**Движение вдоль поверхности Земли. Постановка и решение задачи.** Зададим форму рельефа Земли кусочно-гладкой поверхностью с натуральной параметризацией

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 + \xi(\tau_1, \tau_2) \\ \eta = \eta_0 + \eta(\tau_1, \tau_2), \\ \zeta = \zeta_0 + \zeta(\tau_1, \tau_2) \end{cases}$$

Предполагается, что цель движется по этой поверхности с постоянной скоростью  $v = (\dot{\tau}_1, \dot{\tau}_2)$  без маневров. В этом случае динамика относительных координат цели задается уравнениями

$$\begin{cases} \dot{x} = \xi_{\tau_1} \dot{\tau}_1 + \xi_{\tau_2} \dot{\tau}_2 - V \cos \beta \cos \gamma \\ \dot{y} = \eta_{\tau_1} \dot{\tau}_1 + \eta_{\tau_2} \dot{\tau}_2 - V \cos \beta \sin \gamma, \\ \dot{z} = \zeta_{\tau_1} \dot{\tau}_1 + \zeta_{\tau_2} \dot{\tau}_2 - V \sin \beta \end{cases}$$

а вектор  $\rho(t) = (\tau_1, \tau_2, \dot{\tau}_1, \dot{\tau}_2)'$  ЭДЦ и его оценка  $\hat{\rho}(t)$  имеют размерность 4.

В общем виде расширенный фильтр Калмана для оценки ЭДЦ равномерно и прямолинейно движущейся цели описан в Приложении А. Для рассматриваемого нами случая приведем далее аналитические вычисления производных, необходимых при построении фильтра и сопряженной системы дифференциальных уравнений. Отметим предварительно, что матрицу ковариации из (1) для дальнейших вычислений удобно записать в блочном виде:

$$\hat{P}(t) = \begin{pmatrix} P_x & P'_{xv} \\ P_{xv} & P_v \end{pmatrix}, P_x = \begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xy} \\ p_{xy} & p_{yy} \end{pmatrix}, P_v = \begin{pmatrix} p_{v_x v_x} & p_{v_x v_y} \\ p_{v_x v_y} & p_{v_y v_y} \end{pmatrix}, P_{xv} = \begin{pmatrix} p_{xv_x} & p_{xv_y} \\ p_{xv_y} & p_{xv_y} \end{pmatrix}.$$

Далее, значения производных  $\xi_{\tau_i}, \eta_{\tau_i}$  и  $\zeta_{\tau_i}$  переменных  $\xi, \eta, \zeta$  по  $\tau_i$  находятся из имеющегося описания рельефа местности. Для построения уравнений расширенного фильтра Калмана (Приложение А) необходимо линеаризовать функции наблюдения в окрестности текущей оценки координат. Для этого вычисляются производные по  $\tau_i$

$$\phi_{\tau_i}^A = \frac{x\eta_{\tau_i} - y\xi_{\tau_i}}{r_f^2}, \quad \phi_{\tau_i}^E = \frac{r_f^2 \zeta_{\tau_i} - 2z(x\xi_{\tau_i} + y\eta_{\tau_i})}{2r_s^2 r_f}.$$

Элементы матрицы  $H_{xx}$  имеют вид (Приложение А)

$$h_{\{1,3\}} = \left(\phi_{\tau_{\{1,2\}}}^A\right)^2 \sigma_A^{-2} + \left(\phi_{\tau_{\{1,2\}}}^E\right)^2 \sigma_E^{-2}, \quad h_2 = \phi_{\tau_1}^A \phi_{\tau_2}^A \sigma_A^{-2} + \phi_{\tau_1}^E \phi_{\tau_2}^E \sigma_E^{-2}.$$

Для вывода уравнений сопряженной системы (Приложение Б) необходимы частные производные по  $x, y, z$  функций  $h_{\{1,2,3\}}, \phi_{\tau_i}^A$  и  $\phi_{\tau_i}^E$ . Вычисления дают

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{\{1,3\}}}{\partial \{x, y, z\}} &= 2 \frac{\phi_{\tau_{\{1,2\}}}^A}{\sigma_A^2} \frac{\partial \phi_{\tau_{\{1,2\}}}^A}{\partial \{x, y, z\}} + 2 \frac{\phi_{\tau_{\{1,2\}}}^E}{\sigma_E^2} \frac{\partial \phi_{\tau_{\{1,2\}}}^E}{\partial \{x, y, z\}} \\ \frac{\partial h_2}{\partial \{x, y, z\}} &= \frac{1}{\sigma_A^2} \left( \phi_{\tau_1}^A \frac{\partial \phi_{\tau_2}^A}{\partial \{x, y, z\}} + \frac{\partial \phi_{\tau_1}^A}{\partial \{x, y, z\}} \phi_{\tau_2}^A \right) + \frac{1}{\sigma_E^2} \left( \phi_{\tau_1}^E \frac{\partial \phi_{\tau_2}^E}{\partial \{x, y, z\}} + \frac{\partial \phi_{\tau_1}^E}{\partial \{x, y, z\}} \phi_{\tau_2}^E \right) \\ \frac{\partial \phi_{\tau_i}^A}{\partial x} &= \frac{(y^2 - x^2)\eta_{\tau_i} + 2xy\xi_{\tau_i}}{r_f^4}, \quad \frac{\partial \phi_{\tau_i}^A}{\partial y} = -\frac{(x^2 - y^2)\xi_{\tau_i} + 2xy\eta_{\tau_i}}{r_f^4}, \quad \frac{\partial \phi_{\tau_i}^A}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \phi_{\tau_i}^E}{\partial x} &= \frac{x(3r_f^2 + z^2)(2z(x\xi_{\tau_i} + y\eta_{\tau_i}) - r_f^2 \zeta_{\tau_i})}{2r_s^4 r_f^3} + \frac{x\zeta_{\tau_i} - z\xi_{\tau_i}}{r_s^2 r_f}, \\ \frac{\partial \phi_{\tau_i}^E}{\partial y} &= \frac{y(3r_f^2 + z^2)(2z(x\xi_{\tau_i} + y\eta_{\tau_i}) - r_f^2 \zeta_{\tau_i})}{2r_s^4 r_f^3} + \frac{y\zeta_{\tau_i} - z\eta_{\tau_i}}{r_s^2 r_f}, \\ \frac{\partial \phi_{\tau_i}^E}{\partial z} &= \frac{z(2z(x\xi_{\tau_i} + y\eta_{\tau_i}) - r_f^2 \zeta_{\tau_i})}{r_s^4 r_f} - \frac{x\xi_{\tau_i} + y\eta_{\tau_i}}{r_s^2 r_f}. \end{aligned}$$

**Примеры траекторий полета.** Ниже приводятся траектории БПЛА полученные численным методом, в котором последовательно решается сначала система дифференциальных уравнений для фазовых переменных, потом – для сопряженных к ним переменных [17]. На каждом шаге выбирается оптимальное программное управление, получаемое из имеющихся решений систем.

Рассмотрим сначала случаи движения цели вдоль дороги: а) для серпантина и б) для дороги с единственным поворотом (рис. 1). Скорость цели во всех случаях – 72 км/ч, скорость БПЛА – 180 км/ч. Наблюдения поступают с частотой 10 Гц и точностью  $\sigma_A = 26$  и  $\sigma_E = 78$  мрад для углов азимута и возвышения соответственно. Начальное удаление БПЛА от цели составляет 20 км, начальная высота полета – 1 км, время выполнения миссии  $T$  равно 240 сек. Начальная оценка координат и скорости строится на основании первых десяти наблюдений методом наименьших квадратов [7]. Моделирование показывает, что траектория полета (рис. 2) практически не оказывает влияния на точность оценки ЭДЦ. Это объясняется тем, что цель всегда наблюдаема и движение ограничено вдоль одной единственной линии. При этом точность определения координат составляет единицы метров, а оптимальная траектория близка к прямой линии.

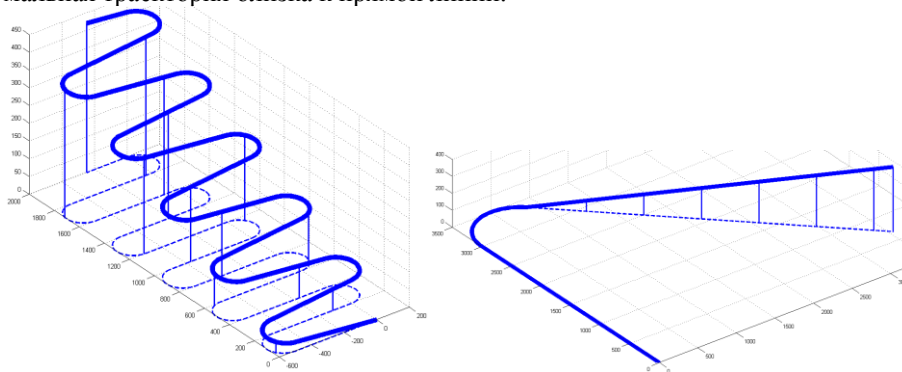


Рис. 1. Примеры карты дорог: а) серпантин (слева) и б) прямая дорога с поворотом и подъемом (справа)

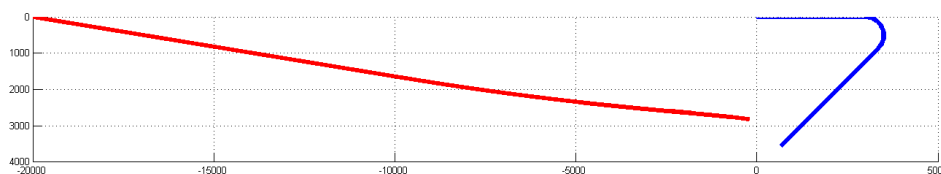


Рис. 2. Траектория полета БПЛА для второго участка дороги. Вид сверху

Наиболее интересный случай представляет собой движение цели вдоль двухпараметрической поверхности Земли. Рассмотрим цель, пересекающую овраг или хребет. Пусть профиль оврага или хребта представляет собой поверхность треугольной призмы. Скатy призмы образуют подъем или спуск с наклоном 15 %, а длина каждого ската составляет 1500 м. Цель движется под углом 45 градусов к направлению спуска или подъема. Предполагается, что БПЛА имеет начальную высоту 5 км и параметры движения – из предыдущего сценария моделирования.

Траектории полета БПЛА и движения цели представлены на рис. 4. Поскольку размерность оцениваемого вектора ЭДЦ равна 4, то траектория полета оказывает существенное влияние на точность получаемых оценок. Для сравнения, при

движении БПЛА вдоль прямой линии в направлении начальной точки движения цели, значение функционала (след матрицы ковариации ошибок оценивания ЭДЦ) имеет втрое большее значение за то же время миссии. БПЛА выполняет манёвры как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной. При этом слежение за целью, двигающейся вдоль оврага, сопровождается подъемом БПЛА на большую (по сравнению с хребтом) высоту, поскольку в противном случае наблюдение угла возвышения будет нести меньшую информацию о координатах цели.

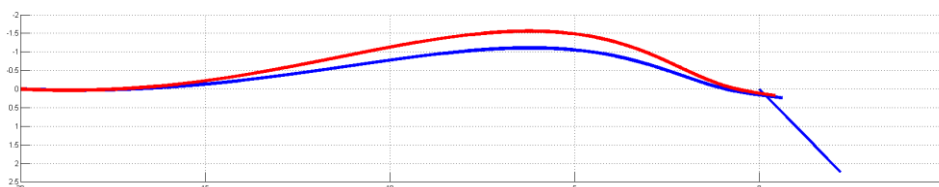


Рис. 3. Пример траектории полета БПЛА при движении цели вдоль балки и холма. Вид сверху. Красным цветом отмечена траектория для случая балки, синим – хребта

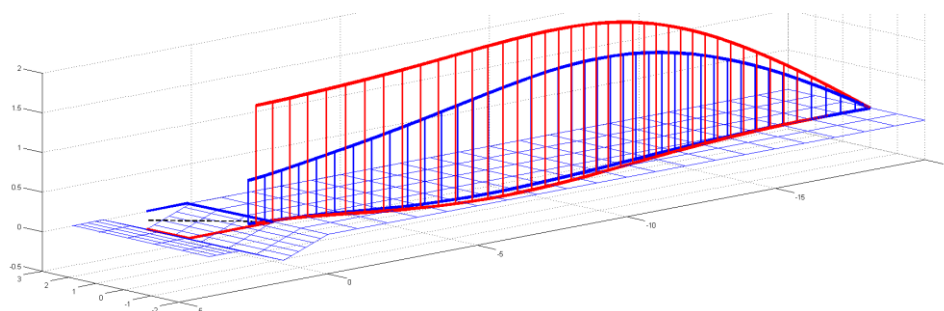


Рис. 4. Пример траектории полета БПЛА при движении цели вдоль балки и холма. Изометрическая проекция. Вертикальные отрезки связывают траекторию полета БПЛА и ее проекцию на горизонтальную плоскость

В качестве количественной меры точности оценки координат принят арифметический корень следа **координатной части** матрицы ковариации ( $\Delta\rho$ ), а в качестве точности оценки скоростей – ее **скоростной части** ( $\Delta v$ ).

Сценарий	$\Delta v$ [м/с]	$\Delta\rho$ [м]
Пересечение хребта	0.38	27.5
Пересечение оврага	0.42	33.2

**Выводы.** Получены уравнения динамики элементов матрицы ковариации ошибок оценивания при определении координат и скорости подвижной цели, осуществляющей движение вдоль дороги с известной геометрией и вдоль двухпараметрической поверхности Земли. В работе рассмотрен случай равномерного прямолинейного движения цели в предположении натуральной параметризации дорог и поверхностей. В случае отказа от натуральной параметризации возможен учет характеристик проходимости местности. Для построения поверхностей можно использовать общедоступные карты высот [18, 19], затем воспользоваться триангуляцией Делоне. При достаточно гладких траекториях (см. рис. 4) для построения траектории полета в реальном масштабе времени можно воспользоваться субоп-

тимальным методом, предложенном в [20] – представить оптимальное управление рядом Фурье по некоторой системе ортогональных функций и свести задачу оптимизации управления к задаче математического программирования, а именно: поиска минимума функционала как функции коэффициентов при первых базисных функциях ряда Фурье.

При большом объеме информации о возможном движении цели (в случае движения вдоль дороги) оптимизация траектории не дает существенного выигрыша по сравнению с простейшим сближением с целью, в то время как при движении цели вдоль поверхности, благодаря маневрам БПЛА, можно обеспечить трехкратный выигрыш по точности оценивания в сравнении с полетом вдоль прямой линии.

**Приложение А. Расширенный фильтр Калмана для слежения за равномерно и прямолинейно движущейся целью.** Пусть имеется  $n$  синхронных каналов наблюдения за координатами (но не скоростями), точность наблюдений в каждом канале равна  $\sigma_i$ . Запишем  $n \times 4$  линеаризованную матрицу наблюдений:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} f_1^x & f_1^y & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n^x & f_n^y & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где  $f_i^j$  – линейные члены функции наблюдения в  $i$ -м канале наблюдений за  $j$ -й координатой цели. Пусть начальная матрица ковариации наблюдений имеет диагональный вид. Тогда матрица  $\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}$  размера  $4 \times 4$  имеет вид:

$$\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} = \begin{pmatrix} f_1^x & \cdots & f_n^x \\ f_1^y & \cdots & f_n^y \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1^{-2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_n^{-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1^x & f_1^y & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n^x & f_n^y & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{xx} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{0}$  – нулевая клетка размера  $2 \times 2$ , а матрица  $\mathbf{H}_{xx}$  имеет вид:

$$\mathbf{H}_{xx} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \begin{pmatrix} (f_i^x)^2 & f_i^x f_i^y \\ f_i^x f_i^y & (f_i^y)^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2 & h_3 \end{pmatrix}.$$

Запишем систему дифференциальных уравнений динамики элементов матрицы ковариации фильтра Калмана в блочном виде:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{P}}_x & \dot{\mathbf{P}}'_{xv} \\ \dot{\mathbf{P}}'_{xv} & \dot{\mathbf{P}}_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{xv} + \mathbf{P}'_{xv} - \mathbf{P}_x \mathbf{H}_{xx} \mathbf{P}_x & \mathbf{P}_v - \mathbf{P}_x \mathbf{H}_{xx} \mathbf{P}'_{xv} \\ \mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{xv} \mathbf{H}_{xx} \mathbf{P}_x & -\mathbf{P}_{xv} \mathbf{H}_{xx} \mathbf{P}'_{xv} \end{pmatrix}$$

Выполнив стандартные процедуры по перемножению матриц, получим систему дифференциальных уравнений для элементов  $\mathbf{P}$ :

$$\begin{cases} \dot{p}_{xx} = 2p_{xv_x} - p_{xx}^2 h_1 - 2p_{xx} p_{xy} h_2 - p_{xy}^2 h_3 \\ \dot{p}_{xy} = p_{xv_y} + p_{v_x y} - p_{xx} p_{xy} h_1 - (p_{xy}^2 + p_{xx} p_{yy}) h_2 - p_{xy} p_{yy} h_3 \\ \dot{p}_{yy} = 2p_{v_y y} - p_{xy}^2 h_1 - 2p_{xy} p_{yy} h_2 - p_{yy}^2 h_3 \\ \dot{p}_{v_x v_x} = -p_{xv_x}^2 h_1 - 2p_{v_x y} p_{xv_x} h_2 - p_{v_x y}^2 h_3 \\ \dot{p}_{v_x v_y} = -p_{xv_y} p_{xv_x} h_1 - (p_{v_y y} p_{xv_x} + p_{xv_y} p_{v_x y}) h_2 - p_{v_y y} p_{v_x y} h_3 \\ \dot{p}_{v_y v_y} = -p_{xv_y}^2 h_1 - 2p_{v_y y} p_{xv_y} h_2 - p_{v_y y}^2 h_3 \\ \dot{p}_{xv_x} = p_{v_x v_x} - p_{xv_x} p_{xx} h_1 - (p_{v_x y} p_{xx} + p_{xv_x} p_{xy}) h_2 - p_{v_x y} p_{xy} h_3 \\ \dot{p}_{xv_y} = p_{v_x v_y} - p_{xv_y} p_{xx} h_1 - (p_{v_y y} p_{xx} + p_{xv_y} p_{xy}) h_2 - p_{v_y y} p_{xy} h_3 \\ \dot{p}_{v_x y} = p_{v_x v_y} - p_{xv_x} p_{xy} h_1 - (p_{v_x y} p_{xy} + p_{xv_x} p_{yy}) h_2 - p_{v_x y} p_{yy} h_3 \\ \dot{p}_{v_y y} = p_{v_y v_y} - p_{xv_y} p_{xy} h_1 - (p_{v_y y} p_{xy} + p_{xv_y} p_{yy}) h_2 - p_{v_y y} p_{yy} h_3 \end{cases}$$



**Приложение Б. Сопряженная система дифференциальных уравнений для элементов матрицы ковариации.** Для применения принципа максимума Понтрягина необходимо построить сопряженную систему дифференциальных уравнений. Примем следующее сопоставление сопряженных и фазовых переменных.

$p_{xx}: \psi_1; p_{xy}: \psi_2; p_{yy}: \psi_3; p_{v_x v_x}: \psi_4; p_{v_x v_y}: \psi_5; p_{v_y v_y}: \psi_6; p_{xv_x}: \psi_7; p_{xv_y}: \psi_8; p_{v_x y}: \psi_9; p_{v_y y}: \psi_{10}.$

Гамильтониан задаётся в виде скалярного произведения фазовых скоростей и сопряженных переменных  $H = \psi \cdot \dot{P}$  [4], потому выпишем отдельно ту часть скалярного произведения, в которой участвуют элементы матрицы ковариации ( $h_i$  определены выше):  $H_{\psi P} = -Ah_1 - Bh_2 - \Gamma h_3 + \Delta$ , где обозначено

$$A = p_{xx}^2 \psi_1 + p_{xx} p_{xy} \psi_2 + p_{xy}^2 \psi_3 + p_{v_x v_x}^2 \psi_4 + p_{xv_x} p_{v_x v_y} \psi_5 + p_{v_x v_y}^2 \psi_6 + p_{xv_x} p_{xv_y} \psi_7 + p_{xv_y} p_{v_x y} \psi_8 + p_{v_x y} p_{v_y y} \psi_9 + p_{v_y y}^2 \psi_{10}$$

$$B = 2p_{xx} p_{xy} \psi_1 + (p_{xy}^2 + p_{xx} p_{yy}) \psi_2 + 2p_{xy} p_{yy} \psi_3 + 2p_{v_x v_y} p_{xv_x} \psi_4 + (p_{v_x y} p_{xv_x} + p_{xv_y} p_{v_x y}) \psi_5 + 2p_{v_x y} p_{xv_y} \psi_6 + (p_{v_x y} p_{xx} + p_{xv_x} p_{xy}) \psi_7 + (p_{v_x y} p_{xx} + p_{xv_y} p_{xy}) \psi_8 + (p_{v_x y} p_{xy} + p_{xv_x} p_{yy}) \psi_9 + (p_{v_x y} p_{xy} + p_{xv_y} p_{yy}) \psi_{10}$$

$$\Gamma = p_{xy}^2 \psi_1 + p_{xy} p_{yy} \psi_2 + p_{yy}^2 \psi_3 + p_{v_x v_x}^2 \psi_4 + p_{v_x y} p_{v_x v_y} \psi_5 + p_{v_y y}^2 \psi_6 + p_{v_x y} p_{xv_x} \psi_7 + p_{v_x y} p_{xv_y} \psi_8 + p_{v_x y} p_{v_y y} \psi_9 + p_{v_y y} p_{v_y y} \psi_{10}$$

$$\Delta = 2p_{xv_x} \psi_1 + (p_{xv_y} + p_{v_x y}) \psi_2 + 2p_{v_x y} \psi_3 + p_{v_x v_x} \psi_7 + p_{v_x v_y} (\psi_8 + \psi_9) + p_{v_x y} \psi_{10}$$

Тогда сопряженная система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = h_1 (2p_{xx} \psi_1 + p_{xy} \psi_2 + p_{xv_x} \psi_7 + p_{xv_y} \psi_8) + h_2 (2p_{xy} \psi_1 + p_{yy} \psi_2 + p_{v_x y} \psi_7 + p_{v_y y} \psi_8) \\ \dot{\psi}_2 = h_1 (p_{xx} \psi_2 + 2p_{xy} \psi_3 + p_{xv_x} \psi_9 + p_{xv_y} \psi_{10}) + \\ + h_2 (2p_{xx} \psi_1 + 2p_{xy} \psi_2 + 2p_{yy} \psi_3 + p_{xv_x} \psi_7 + p_{xv_y} \psi_8 + p_{v_x y} \psi_9 + p_{v_y y} \psi_{10}) \\ + h_3 (2p_{xy} \psi_1 + p_{yy} \psi_2 + p_{v_x y} \psi_7 + p_{v_y y} \psi_8) \\ \dot{\psi}_3 = h_2 (p_{xx} \psi_2 + 2p_{xy} \psi_3 + p_{xv_x} \psi_9 + p_{xv_y} \psi_{10}) + h_3 (p_{xy} \psi_2 + 2p_{yy} \psi_3 + p_{v_x y} \psi_9 + p_{v_y y} \psi_{10}) \\ \begin{cases} \dot{\psi}_4 = -\psi_7 \\ \dot{\psi}_5 = -\psi_8 - \psi_9 \\ \dot{\psi}_6 = -\psi_{10} \end{cases} \\ \dot{\psi}_7 = h_1 (2p_{xv_x} \psi_4 + p_{xv_y} \psi_5 + p_{xx} \psi_7 + p_{xy} \psi_9) + h_2 (2p_{v_x y} \psi_8 + p_{v_y y} \psi_9 + p_{xy} \psi_7 + p_{yy} \psi_9) - 2\psi_1 \\ \dot{\psi}_8 = h_1 (p_{xv_x} \psi_5 + 2p_{xv_y} \psi_6 + p_{xx} \psi_8 + p_{xy} \psi_{10}) + h_2 (p_{v_x y} \psi_5 + 2p_{v_y y} \psi_6 + p_{xy} \psi_8 + p_{yy} \psi_{10}) - \psi_2 \\ \dot{\psi}_9 = h_2 (2p_{xv_x} \psi_4 + p_{xv_y} \psi_5 + p_{xx} \psi_7 + p_{xy} \psi_9) + h_3 (2p_{v_x y} \psi_4 + p_{v_y y} \psi_5 + p_{xy} \psi_7 + p_{yy} \psi_9) - \psi_2 \\ \dot{\psi}_{10} = h_2 (p_{xv_x} \psi_5 + 2p_{xv_y} \psi_6 + p_{xx} \psi_8 + p_{xy} \psi_{10}) + h_3 (p_{v_x y} \psi_5 + 2p_{v_y y} \psi_6 + p_{xy} \psi_8 + p_{yy} \psi_{10}) - 2\psi_3 \end{cases}$$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Stansfield R.G.* Statistical Theory of DF Fixing // Journal on Institution of Electrical Engineers. – Part IIIA: Radiocommunication. – 1947. – Vol. 94. – P. 762-770.
2. *Koks D.* Numerical Calculations for Passive Geolocation Scenarios // Australian Government DoD: Defense Science and Technology Organization. – 2007. – RR-0319.
3. *Peach N.* Bearings-only Tracking Using a Set of Range-Parameterized Extended Kalman Filters // IEEE Proc. of Control Theory and Applications. – 1995. – Vol. 142 (1). – P. 73-80.
4. *Aidala V.J., Nardone S.C.* Observability Criteria For Bearings-Only Target Motion Analysis // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1981. – Vol. AES-17, No 2. – P. 162-166.
5. *Bar-Shalom Y.* Tracking and Data Fusion: A Handbook of Algorithms – YBS-Press, 2011.
6. *Pannetier B., Benameur K., Nimier V., Rombaut M.* VS-IMM Using Road Map Information for a Ground Target Tracking // In Proc. of 8-th Conference on Information Fusion – 2005. – Vol. 1.

7. Oland E., Kristiansen R. Collision and terrain avoidance for UAVs using the potential field method // In Proc. of IEEE Aerospace Conference – 2-9 March 2013. – P. 1-7.
8. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice – IEEE Press, 1996.
9. Adamy D.L. EW 103: Communications Electronic Warfare – Artech House radar series, 2009.
10. Godara L.C. Smart Antennas – Taylor & Francis, Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series. 2014.
11. Liu P.T. An Optimum Approach in Target Tracking with Bearing Measurements // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1988. – Vol. 56. – P. 205–214.
12. Gong, K.F., Hammel, S.E., Hilliard, E.J., Liu, P.T. Optimal Observer Motion For Localization with Bearing Measurements // Computers & Mathematics with Applications. – 1989. – Vol. 18. – P. 171-180.
13. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of basic Engineering. – 1960. – Vol. 82, № 1. – P. 35-45.
14. Липцер П.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
15. Лётов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука, 1969. – 359 с.
16. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука. 1975. – 530 с.
17. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 240 с.
18. Open Digital Elevation Model (OpenDEM). URL: [www.opendem.info](http://www.opendem.info).
19. CIGAR CSI, SRTM 90 m Digital Elevation Database. URL: <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>.
20. Davidson P., Oshman Y. Optimization of Observer Trajectories for Bearings-only Target Localization // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1999. – Vol. 35. – P. 892-902.

## REFERENCES

1. Stansfield R.G. Statistical Theory of DF Fixing, *Journal on Institution of Electrical Engineers*, Part IIIA: Radiocommunication, 1947, Vol. 94, pp. 762-770.
2. Koks D. Numerical Calculations for Passive Geolocation Scenarios, *Australian Government DoD: Defense Science and Technology Organization*, 2007, RR-0319.
3. Peach N. Bearings-only Tracking Using a Set of Range-Parameterized Extended Kalman Filters, *IEEE Proc. of Control Theory and Applications*, 1995, Vol. 142 (1), pp. 73-80.
4. Aidala V.J., Nardone S.C. Observability Criteria For Bearings-Only Target Motion Analysis, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, Vol. AES-17, No 2, pp. 162-166.
5. Bar-Shalom Y. Tracking and Data Fusion: A Handbook of Algorithms – YBS-Press, 2011.
6. Pannetier B., Benameur K., Nimier V., Rombaut M. VS-IMM Using Road Map Information for a Ground Target Tracking, *In Proc. of 8-th Conference on Information Fusion*, 2005, Vol. 1.
7. Oland E., Kristiansen R. Collision and terrain avoidance for UAVs using the potential field method, *In Proc. of IEEE Aerospace Conference – 2-9 March 2013*, pp. 1-7.
8. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice – IEEE Press, 1996.
9. Adamy D.L. EW 103: Communications Electronic Warfare – Artech House radar series, 2009.
10. Godara L.C. Smart Antennas – Taylor & Francis, Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series. 2014.
11. Liu P.T. An Optimum Approach in Target Tracking with Bearing Measurements, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1988, Vol. 56, pp. 205–214.
12. Gong, K.F., Hammel, S.E., Hilliard, E.J., Liu, P.T. Optimal Observer Motion For Localization with Bearing Measurements, *Computers & Mathematics with Applications*, 1989, Vol. 18, pp. 171-180.
13. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of basic Engineering*, 1960, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45.
14. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов [Statistics of random processes]. Moscow: Nauka, 1974, 696 p.
15. Лётов А.М. Динамика полета и управление [Flight dynamics and control]. Moscow: Nauka, 1969, 359 p.
16. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем [Elements of the theory of optimal systems]. Moscow: Nauka. 1975, 530 p.

17. Chernous'ko F.L., Banichuk N.V. Variatsionnye zadachi mekhaniki i upravleniya. Chislennye metody [Variational problems of mechanics and control. Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1973, 240 p.
18. Open Digital Elevation Model (OpenDEM). Available at: [www.opendem.info](http://www.opendem.info).
19. CIGAR CSI, SRTM 90 m Digital Elevation Database. Available at: <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>.
20. Davidson P., Oshman Y. Optimization of Observer Trajectories for Bearings-only Target Localization, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, Vol. 35, pp. 892-902.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Е.П. Маслов.

**Рубинович Евгений Яковлевич** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: [rubinvch@ipu.rssi.ru](mailto:rubinvch@ipu.rssi.ru); 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: +74953349111; зам. директора по научной работе; д.т.н.; профессор.

**Андреев Кирилл Владимирович** – ООО «Телум». г. Москва, территория инновационного центра «Сколково»; e-mail: [andreev@ranberry.net](mailto:andreev@ranberry.net); 117570, г. Москва, ул. Днепропетровская, 37; тел.: +79160430721; старший инженер отдела исследований; аспирант.

**Rubinovich Evgeny Yakovlevich** – Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences; e-mail: [rubinvch@ipu.rssi.ru](mailto:rubinvch@ipu.rssi.ru); 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953349111; deputy director on R&D; dr. of eng. sc.; professor.

**Andreev Kirill Vladimirovich** – Telum LLC, Skolkovo innovation center, Moscow; e-mail: [andreev@ranberry.net](mailto:andreev@ranberry.net); 37, Dnepropetrovskaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +79160430721; senior research engineer; postgraduate student.

УДК 004.5

**А.Л. Ронжин, Р.М. Юсупов**

### **МНОГОМОДАЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ\***

*Рассматриваются особенности проектирования многомодальных пользовательских интерфейсов к мобильным робототехническим комплексам, обеспечивающих восприятие и контекстный анализ текущей окружающей обстановки и взаимодействие с неподготовленными конечными пользователями. При проектировании пользовательского интерфейса автоматизированного рабочего места оператора-профессионала для промышленной или специального назначения информационно-управляющей системы в основу берутся зарегламентированные способы и сценарии функционирования системы. В случае проектирования многомодальных интерфейсов основными проблемами являются вариативность естественных сигналов неподготовленного пользователя и способов передачи информации, а также гетерогенность программно-аппаратного обеспечения мобильных интеллектуальных роботизированных устройств. Целью работы является применение многомодальных интерфейсов, обрабатывающих естественные для человека способы коммуникации (речь, жесты, движения тела, головы, рукописные наброски, направление взгляда, мимика и др.), для обеспечения интуитивно понятного взаимодействия между пользователями и интеллектуальными мобильными робототехническими системами гражданского и специального назначения. Наличие естественного способа взаимодействия сейчас является не менее важным свойством системы, чем ее функциональные возможности. Также следует учесть, что физические ограничения и личные предпочтения пользователей оказывают*

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Актуальные проблемы робототехники», РФФИ (проект № 13-08-0741-а).