



Борис Борисович Кулаков родился в 1984 г. Студент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области теории автоматического управления.

V.B. Kulakov (b. 1984) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of theory of automatic control.

---

УДК 681.511.4

К. А. Пупков

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ САМОНАВЕДЕНИЕМ**

*Рассмотрена задача интеллектуализации процесса самонаведения летательного аппарата на маневрирующий объект в условиях сложного воздействия окружающей среды. Показано, что при традиционном решении задачи синтеза оптимального управления при синусоидальном маневре объекта имеет место бимодальная плотность вероятности промаха. Разработан метод самонаведения, основанный на прогнозе движения объекта и модифицированном скалярном оценивании состояния летательного аппарата, обеспечивающий нормальную плотность вероятности промаха и приемлемую точность наведения. Метод эффективен и при других видах маневра объекта.*

Интеллектуализированное управление предполагает афферентный синтез цели, прогноз ожидаемых результатов, выработку и исполнение управления, обратную связь по параметрам результата действия [1]. Поскольку самонаведение служит наиболее эффективным способом управления при сближении с каким-либо объектом, целесообразно рассмотреть проблему интеллектуализации этого процесса. Задача самонаведения решается, как правило, в условиях воздействия различного рода помех и маневра объекта, а в качестве метода наведения используется метод пропорциональной навигации, обеспечивающий минимизацию угловой скорости линии визирования “летательный аппарат–объект”. Синтез законов управления осуществляется в этом случае по критерию минимума среднего квадрата промаха в предположении, что закон распределения случайных воздействий нормальный. Решению задачи самонаведения посвящено большое число работ как отечественных, так и зарубежных авторов [2–5].

Однако при маневре объекта типа “змейка” (синусоидальный процесс со случайной фазой) этот критерий и предположение не являются



Рис. 1. Кинематическая схема задачи преследования

адекватными, так как функция плотности вероятности промаха бимодальная, а следовательно, вероятность больших значений промаха выше, чем малых.

Предлагается метод, основанный на линейном прогнозе движения объекта на начальном этапе самонаведения по результатам измерения, и переходе к прогнозу реального положения объекта на конечном участке. Прогноз действительного положения объекта необходим для определения момента перехода на самонаведение при использовании прогнозируемых значений промаха, скорости сближения, дальности и располагаемой перегрузки летательного аппарата (ЛА). Для решения задачи прогнозирования выбраны модель Тейла–Вейджа и алгоритм скалярного оценивания вектора состояния. Показано, что в этом случае функция плотности вероятности промаха близка к нормальной, а его средние значения находятся в допустимых пределах. Показано также, что имеет место оптимальное время прогноза. Разработанный метод самонаведения эффективен и при других видах маневра объекта.

**Постановка задачи.** Кинематическая схема задачи самонаведения приведена на рис. 1; здесь  $V_{Ц}$  — скорость объекта (цели);  $V_{ЛА}$  — скорость ЛА;  $q$  — угол наклона линии визирования;  $r$  — дальность;  $V_{Цн}$  и  $V_{ЛАН}$  — нормальные скорости объекта и ЛА соответственно.

Уравнения движения ЛА относительно номинальной линии визирования имеют вид

$$\dot{x}_1 = x_2; \quad \dot{x}_2 = x_3 - a_{Ц}; \quad \dot{x}_3 = -(1/T_{ЛА})x_3 + (1/T_{ЛА})u, \quad (1)$$

где  $x_1$  — смещение ЛА от траектории перпендикулярно к номинальной линии визирования;  $x_2 = V_{ЛАН} - V_{Цн}$ ;  $x_3 = a_{ЛА}$  — боковое ускорение ЛА;  $T_{ЛА}$  — аэродинамическое запаздывание ЛА;  $u$  — исходный вектор управления;  $a_{Ц}$  — боковое ускорение объекта, которое изменяется по синусоидальному закону.

Измерения угловой скорости линии визирования сопровождаются случайными ошибками, вызванными шумами с корреляционной функцией

$$R_{\xi_1}(\tau) = \sigma_{\xi_1}^2 \delta(\tau)$$

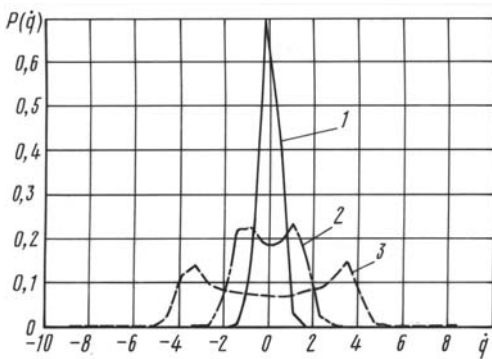


Рис. 2. Плотность вероятности суммы случайной ошибки измерения, флуктуации отраженного сигнала и синусоидального сигнала с равномерно распределенной начальной фазой:

1, 2, 3 –  $A_{ц} = 0$ ; 2g; 4g соответственно

$\Omega_{ц}$  – угловая частота;  $\varphi$  – равномерно распределенная фаза;  $\tau$  и  $\frac{1}{2}A_{ц}^2$  – время и уровень корреляции нормальной перегрузки объекта при маневре.

Плотность вероятности угловой скорости линии визирования  $\dot{q}$  при воздействии суммы сигналов для различных амплитуд маневра приведена на рис. 2.

Начальное состояние является случайным вектором с характеристиками

$$M[x_1(t_0)] = M[x_2(t_0)] = 0; \quad M[x_1^2(t_0)] = 0; \quad M[x_2^2(t_0)] = \sigma_V^2.$$

Здесь  $\sigma_V^2$  – дисперсия ошибки определения скорости сближения. В процессе сближения с объектом происходит непрерывное измерение угловой скорости линии визирования  $\dot{q}$ . Принимается, что  $|\dot{q}| \leq 1$ , и поэтому

$$\dot{q}(t) = \frac{x_1}{V(t_f - t)^2},$$

где  $t_f$  – время окончания процесса наведения.

Измерения подвержены случайным помехам и уравнение наблюдения имеет вид

$$Z = \frac{x_1}{V(t_f - t)^2} + \nu,$$

где  $\nu = \xi_1 + \xi_2$  – случайный процесс с заданной интенсивностью  $\sigma_{\xi_1}^2 + \sigma_{\xi_2}^2 e^{-\alpha|\tau|}$  и нулевым математическим ожиданием;  $V$  – скорость сближения ЛА и объекта.

Состояние системы описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{x} = Ax + Bu + w,$$

и флуктуацией отраженного сигнала, называемой “беганием” блестящей точки, корреляционная функция которой имеет вид

$$R_{\xi_2}(\tau) = \sigma_{\xi_2}^2 e^{-\alpha|\tau|}.$$

Среднее значение и корреляционная функция сигнала, характеризующего маневр объекта, выражаются как

$$M[a_{ц}(t)] = A_{ц} \sin(\Omega_{ц}t + \varphi),$$

$$M[a_{ц}(t)a_{ц}(t+\tau)] = \frac{1}{2}A_{ц}^2 \cos \Omega_{ц}t,$$

где  $A_{ц}$  – амплитуда маневра;

$\tau$  и  $\frac{1}{2}A_{ц}^2$  –

а уравнение измерений в векторной форме можно записать как

$$Z = Hx + \nu,$$

где

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1/T_{\text{ЛА}} \end{bmatrix}; \quad B = [0 \ 0 \ 1]^T;$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{V(t_f - t)^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad w = [0 \ A_{\text{н}} \sin(\Omega_{\text{н}}t + \varphi) \ 0] -$$

вектор входных возмущений, обусловленных маневром объекта с синусоидальной нормальной перегрузкой. Матрица интенсивности такого возмущения имеет вид

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5A_{\text{н}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Критерий оптимальности определяется минимумом математического ожидания бокового отклонения в момент окончания процесса наведения и интегралом от квадрата управления:

$$J = M[x^T(t_f)Fx(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} \beta u^2 dt, \quad (2)$$

где  $\beta$  выбирается так, чтобы выполнилось ограничение на управление:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Дисперсионная матрица  $P_0$  в начальный момент времени запишется в виде

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Задача оптимального наведения ЛА на маневрирующий объект решена методом динамического программирования с использованием фильтра Калмана для оценивания вектора состояния системы [3]. Оценка  $\hat{x}$  вектора состояния в дискретном времени определяется при

использовании фильтра Калмана в виде

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k + K_{k+1} (Z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1,k}),$$

где  $K_k$  — матрица коэффициентов фильтра Калмана

$$K_{k+1} = P_{k+1,k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T + K_{k+1})^{-1},$$

а дисперсионная матрица  $P_{k+1}$  ошибки оценки следует из матричного рекуррентного уравнения

$$P_{k+1,k} = A_k P_k A_k^T + Q;$$

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1,k}$$

и удовлетворяет начальному условию

$$P(t_0) = P_0.$$

Оптимальное управление имеет вид

$$u_k = -E_k \hat{x}_k$$

при

$$E_k = (\beta + B_k^T S_{k+1} B_k)^{-1} B_k^T S_{k+1} A_k,$$

где симметрическая матрица  $S_k$  — решение рекуррентного уравнения

$$S_k = A_k^T S_{k+1} A_k - A_k^T S_{k+1} B_k (\beta + B_k^T S_{k+1} B_k)^{-1} B_k^T S_{k+1} A_k$$

при условии, что в момент окончания процесса наведения  $S(t_f) = F$ .

Ставится задача: исследовать точность процесса самонаведения при различных характеристиках воздействий окружающей среды, маневра объекта и разработать новый метод самонаведения, использующий элементы интеллектуализации этого процесса.

**Результаты исследования.** Анализ точности самонаведения был проведен для трех случаев.

1. Объект движется прямолинейно и равномерно. На систему наблюдения действует помеха в виде белого шума со спектральной плотностью  $S_1(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sigma_{\xi_1}^2$ .

2. Объект движется прямолинейно и равномерно. Система наблюдения подвержена влиянию описанной ранее помехи и воздействию, вызванному флуктуацией отраженного от объекта сигнала.

Спектральная плотность смеси сигналов имеет вид

$$S_2(\omega) = \frac{\sigma_{\xi_2}^2}{\pi} \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{1}{2\pi} \sigma_{\xi_1}^2.$$

3. Объект совершает маневр с синусоидальной нормальной перегрузкой, и на систему наблюдения действует сигнал, как и во втором случае.

Спектральная плотность суммарного сигнала в этом случае будет

$$S_3(\omega) \frac{2\pi A_{\Pi}^2}{4} [\delta(\omega + \Omega_{\Pi}) + \delta(\omega - \Omega_{\Pi})] + \frac{\sigma_{\xi_2}^2}{\pi} \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{1}{2\pi} \sigma_{\xi_1}^2.$$

Оценивалась плотность вероятности  $P(h)$  промаха ЛА относительно объекта  $h = \dot{q} \frac{r^2}{\dot{r}}$ . Исходные данные при исследовании принимались следующими: начальная дальность  $r_0 = 1500$  м, скорость ЛА  $V_{\text{ЛА}} = 1000$  м/с, скорость движения объекта  $V_{\Pi} = 400$  м/с, ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>, максимальное время движения ЛА  $t_{\text{max}} = 3$  с, максимальное ускорение ЛА (максимальное воздействие управления)  $a_{\text{ЛА max}} = \pm 12g$ , максимальное ускорение объекта  $a_{\Pi \text{ max}} = \pm 6g$ , постоянная времени (аэродинамическая) ЛА  $T_{\text{ЛА}} = 0,05$  с. Средняя квадратическая ошибка определения скорости сближения  $\sigma_V = 10$  м/с.

В первых двух случаях плотность вероятности промаха близка к нормальной, а его дисперсия зависит от уровня случайных сигналов  $\xi_1$  и  $\xi_2$ . В третьем случае воздействие на систему наведения ЛА состоит из ошибки измерения угловой скорости линии визирования  $\dot{q}(t) = \xi_1(t) + \xi_2(t)$  и синусоидальной составляющей  $\dot{q}_{a_{\Pi}}(t)$ , вызванной маневром объекта с нормальной перегрузкой  $a_{\Pi}(t) = A_{\Pi} \sin(\Omega_{\Pi} t + \varphi)$ , т. е.

$$\dot{q}(t) = \dot{q}_{a_{\Pi}}(t) + \xi_1(t) + \xi_2(t). \quad (3)$$

Компонент  $\dot{q}_{a_{\Pi}}(t)$  обусловлен маневром объекта и определяется формулой

$$\dot{q}_{a_{\Pi}}(t) = \frac{a_{\Pi}(t)}{r_0 - Vt} t.$$

Плотность вероятности  $\dot{q}_{a_{\Pi}}(t)$  имеет вид [6]

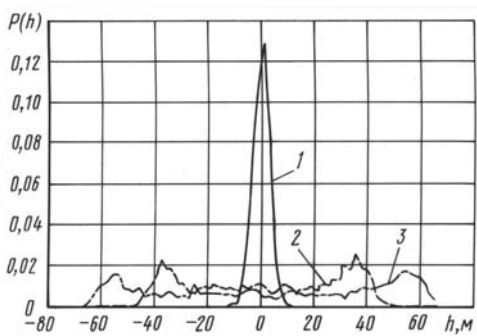
$$W(\dot{q}_{a_{\Pi}}) = \frac{1}{\pi \sqrt{\left(\frac{A_{\Pi}}{r_0 - Vt}\right)^2 - \left(\frac{a_{\Pi}}{r_0 - Vt}\right)^2}} \quad \text{при } |a_{\Pi}| < A_{\Pi};$$

$$W(\dot{q}_{a_{\Pi}}) = 0 \quad \text{при } |a_{\Pi}| > A_{\Pi}.$$

Плотность вероятности суммы сигналов (3) можно представить следующим образом:

$$W(\dot{q}) = \frac{1}{\pi \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-A_{\Pi}}^{A_{\Pi}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_{\Pi}}{r_0 - Vt}\right)^2 - \left(\frac{a_{\Pi}}{r_0 - Vt}\right)^2}} \times$$

$$\times \exp \left[ -\frac{(\dot{q} - \dot{q}_{a_{\Pi}})^2}{2\sigma^2} \right] d\dot{q},$$



**Рис. 3.** Плотность вероятности промаха  $P(h)$ :

1, 2, 3 —  $A_{ц} = 0$ ; 4g; 6g соответственно

где

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\xi_1}^2 + \sigma_{\xi_2}^2}.$$

Анализ результатов моделирования в этом случае показывает, что при увеличении амплитуды нормальной перегрузки объекта, маневрирующего по синусоидальному закону, плотность вероятности промаха имеет вид бимодального распределения, как это показано на рис. 3.

Это означает, что в случае маневра объекта с синусоидальной перегрузкой вероятность малых значений промаха меньше, чем вероятность больших. Это свидетельствует о том, что использование при наведении традиционных методов не обеспечивает желаемых результатов в случае синусоидального маневра объекта и обеспечение критерия минимума среднего квадрата промаха не дает возможности судить о действительном распределении вероятности промаха.

На основе исследований предлагается следующее решение задачи наведения, позволяющее избежать бимодальности плотности вероятности промаха и обеспечить допустимые его средние значения.

На начальном этапе наведения предполагается движение объекта по гипотезе, построенной как среднее синусоидальных маневров по текущим результатам измерений до начала конечного участка. На конечном участке наведение осуществляется в прогнозируемое реальное положение объекта. Переход на такое наведение выполняется, исходя из прогнозируемых значений промаха, дальности, скорости сближения и располагаемой перегрузки ЛА. В этой задаче наведения на маневрирующий объект с синусоидальной перегрузкой, подвергающийся воздействию двух источников случайных процессов, процесс измерений рассматривался как процесс Тейла–Вейджа.

Теперь детально рассмотрим задачу стохастического прогнозирования движения маневрирующего объекта при самонаведении ЛА.

Процесс, полученный при измерении в задаче преследования маневрирующего объекта с синусоидальной нормальной перегрузкой и подвергающегося воздействию двух источников шумов (шумы измерения и флуктуации отраженного сигнала), можно представить как процесс Тейла–Вейджа. Это процесс аналитически записывается как

$$\begin{aligned}
J(t) &= a_1(t) + \varepsilon_1(t); \\
a_1(t) &= a_1(t-1) + a_2(t); \\
a_2(t) &= a_2(t-1) + \varepsilon_2(t),
\end{aligned}
\tag{4}$$

где  $a_1(t)$  — значение уровня исследуемой последовательности  $J$  в момент  $t$ ;  $a_2(t)$  — прирост уровня от момента  $t-1$  к моменту  $t$ ;  $\varepsilon_1(t)$ ,  $\varepsilon_2(t)$  — случайные процессы с нулевым математическим ожиданием, постоянными дисперсиями  $\sigma_{\xi_1}^2$  и  $\sigma_{\xi_2}^2$ .

Пусть в момент времени  $t$  необходимо сделать прогноз  $J_{\tau_{\text{пр}}}(t)$  величин  $J_{\tau_{\text{пр}}}(t + \tau_{\text{пр}})$ ;  $\hat{a}_1(t)$ ;  $\hat{a}_2(t)$ , где  $\tau_{\text{пр}}$  — интервал времени прогноза.

В момент времени  $t + \tau_{\text{пр}}$  прогнозируемое значение запишем как

$$J_{\tau_{\text{пр}}}(t) = \hat{a}_1(t) + \tau_{\text{пр}}\hat{a}_2(t),$$

где  $\hat{a}_1(t)$ ,  $\hat{a}_2(t)$  — текущие оценки коэффициентов адаптивного полинома первого порядка, которые определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\hat{a}_1(t) &= \alpha_1 J(t) + (1 - \alpha_1)(\hat{a}_1(t-1) + \hat{a}_2(t-1)); \\
\hat{a}_2(t) &= \alpha_2(\hat{a}_1(t) - \hat{a}_1(t-1)) + (1 - \alpha_2)\hat{a}_2(t-1); \\
0 < \alpha_1, \quad \alpha_2 < 1.
\end{aligned}$$

Ошибка прогноза в момент  $t$  на одном шаге будет

$$\begin{aligned}
e_1 &= J(t+1) - \hat{a}_1(t) - \hat{a}_2(t) = (a_1(t) + a_2(t) + \varepsilon_1(t+1) + \varepsilon_2(t+1)) - \\
&- \hat{a}_1(t) - \hat{a}_2(t) = (a_1(t) - \hat{a}_1(t)) + (a_2(t) - \hat{a}_2(t)) + \varepsilon_1(t+1) + \varepsilon_2(t+1)
\end{aligned}$$

Следовательно, ошибка прогноза является суммой трех составляющих: ошибки оценки уровня процесса в момент  $t$ , ошибки оценки прироста уровня в момент  $t$  и комбинации случайных составляющих в момент  $t+1$ .

В результате минимизации дисперсии прогноза Тейл и Вейдж получили следующие результаты:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \frac{2d}{1+d}; \quad \alpha_2 = d; \\
d &= \sqrt{-\frac{1}{8}\chi^2 + \frac{1}{2}\chi\sqrt{1 + \frac{1}{16}\chi^2}}; \quad \chi^2 = \sigma_{\varepsilon_2}^2/\sigma_{\varepsilon_1}^2; \\
D(1) &= \frac{1+d}{1-d}\sigma_{\varepsilon_1}^2.
\end{aligned}$$

Общие формулы прогнозирования значения  $J_{\tau_{\text{пр}}}$  в интервале времени прогноза модели (4) будут иметь вид

$$\hat{a}_1(t) = \hat{a}_1(t-1) + \hat{a}_2(t-1) + \alpha_1 e_1(t-1);$$



$$\hat{a}_2(t) = \hat{a}_2(t-1) + \alpha_1 \alpha_2 e_1(t-1);$$

$$J_{\tau_{\text{пр}}}(t) = -\hat{a}_1(t) + \tau_{\text{пр}} \hat{a}_2(t).$$

Ошибку прогноза, сделанного в момент  $t$  на  $\tau_{\text{пр}}$  шагов, можно записать как

$$\begin{aligned} e_{\tau_{\text{пр}}}(t) &= J(t + \tau_{\text{пр}}) - J_{\tau_{\text{пр}}}(t) = \\ &= \left[ a_1(t) + \tau_{\text{пр}} a_2(t) + \sum_{i=1}^{\tau_{\text{пр}}} (\tau_{\text{пр}} - i + 1) \varepsilon_2(t+i) + \varepsilon_1(t + \tau_{\text{пр}}) \right] - \\ &- \hat{a}_1(t) - \tau_{\text{пр}} \hat{a}_2(t) = [a_1(t) - \hat{a}_1(t)] + \tau_{\text{пр}} [a_2(t) - \hat{a}_2(t)] + \varepsilon_1(t + \tau_{\text{пр}}) + \\ &+ \sum_{i=1}^{\tau_{\text{пр}}} (\tau_{\text{пр}} - i + 1) \varepsilon_2(t+i); \end{aligned}$$

а дисперсию ошибки прогноза —

$$\begin{aligned} D_e(\tau_{\text{пр}}) &= M \left[ e_{\tau_{\text{пр}}}^2(t) \right] = [1 \tau_{\text{пр}}] (\Psi \theta \Psi^T + \Pi \Psi \theta \Psi^T \Pi^T + \\ &+ \Pi^2 \Psi \theta \Psi^T (\Pi^T)^2 + \dots) \left[ \tau_{\text{пр}}^1 \right] + \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \sigma_{\varepsilon_2}^2 \sum_{i=1}^{\tau_{\text{пр}}} i^2, \end{aligned}$$

где матрицы  $\theta$ ,  $\Pi$  и  $\Psi$  имеют вид:

$$\theta = \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon_2}^2 \end{bmatrix}; \quad \Pi = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_1 & 1 - \alpha_1 \\ -\alpha_1 \alpha_2 & 1 - \alpha_1 \alpha_2 \end{bmatrix};$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \alpha_1 & -(1 - \alpha_1) \\ \alpha_1 \alpha_2 & -(1 - \alpha_1 \alpha_2) \end{bmatrix}.$$

После некоторых преобразований получим

$$D_e(\tau_{\text{пр}}) = \Lambda_{11} + 2\tau_{\text{пр}} \Lambda_{12} + \tau_{\text{пр}}^2 \Lambda_{22} + \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \sigma_{\varepsilon_2}^2 \sum_{i=1}^{\tau_{\text{пр}}} i^2,$$

где  $\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{12} & \Lambda_{22} \end{bmatrix}$  — решение уравнения

$$\Lambda - \Pi \Lambda \Pi^T = \Psi \theta \Psi^T.$$

Теперь приведем результаты моделирования прогноза изменения угловой скорости линии визирования на основе модели Тейла–Вейджа.

Будем считать, что измеренная последовательность значений угловой скорости линии визирования “ЛА–объект” соответствует уравнению (4), где обозначено:

$\dot{q}(t) = J(t)$  — угловая скорость линии визирования;  $\varepsilon_1(t)$  — белый шум, воздействующий на систему наблюдения с дисперсией  $D_{\xi_1} = \sigma_{\xi_2}^2$ ;  $\varepsilon_2(t)$  — флуктуационная помеха в виде белого шума с дисперсией  $D_{\xi_2} = \sigma_{\xi_2}^2$ ;  $a_1(t)$  — приведенная угловая скорость линии визирования.

Значение  $a_1(t)$  определяется по среднему значению угловой скорости, полученной на выходе измерителя:

$$a_1(t_{n_B}) = \sum_{k=1}^{n_B} \dot{q}_{a_1}(t_k) = \sum_{k=1}^{n_B} \frac{a_{\Pi}(t_k)}{(r_{o.пp} - Vt_k)} t_k,$$

где  $r_{o.пp}$  — дальность линии визирования “ЛА–объект”, вычисленная в момент начала прогнозирования;  $n_B$  — число, определяемое из практических соображений по точности прогноза.

Задачу прогнозирования решали для следующих исходных данных: дисперсия белого шума, обусловленного случайными воздействиями на процесс измерения,

$$D_{\xi_1} = \sigma_{\xi_1}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ рад}^2 / \text{с}^2;$$

дисперсия флуктуаций, обусловленных колебаниями ЛА и объекта в процессе наведения,

$$D_{\xi_2} = \sigma_{\xi_2}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^2 / \text{с}^2.$$

Полученные результаты при прогнозе на 0,3; 0,5 и 1 с приведены на рис. 4, а, б, в соответственно.

На рис. 5 представлена функция плотности вероятности угловой скорости при тех же интервалах прогнозирования.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса для функций плотности вероятности, приведенных на рис. 5, и соответственно для времени прогноза 0,3; 0,5 и 1 с будут равны

$$\xi = 0,0012; \quad 0,018 \quad \text{и} \quad 0,014;$$

$$\gamma = 0,016; \quad 0,092 \quad \text{и} \quad 0,21.$$

При таких значениях коэффициентов можно утверждать, что функции плотности вероятности, приведенные на рис. 5, близки к нормальному распределению, а следовательно, прогнозируемые значения угловой скорости могут быть использованы при синтезе оптимального управления. Теперь на основе прогноза угловой скорости линии визирования “ЛА–объект” как измеряемого сигнала и оценивания вектора состояния системы по алгоритму модифицированного адаптивного скалярного оценивания рассмотрим синтез закона оптимального

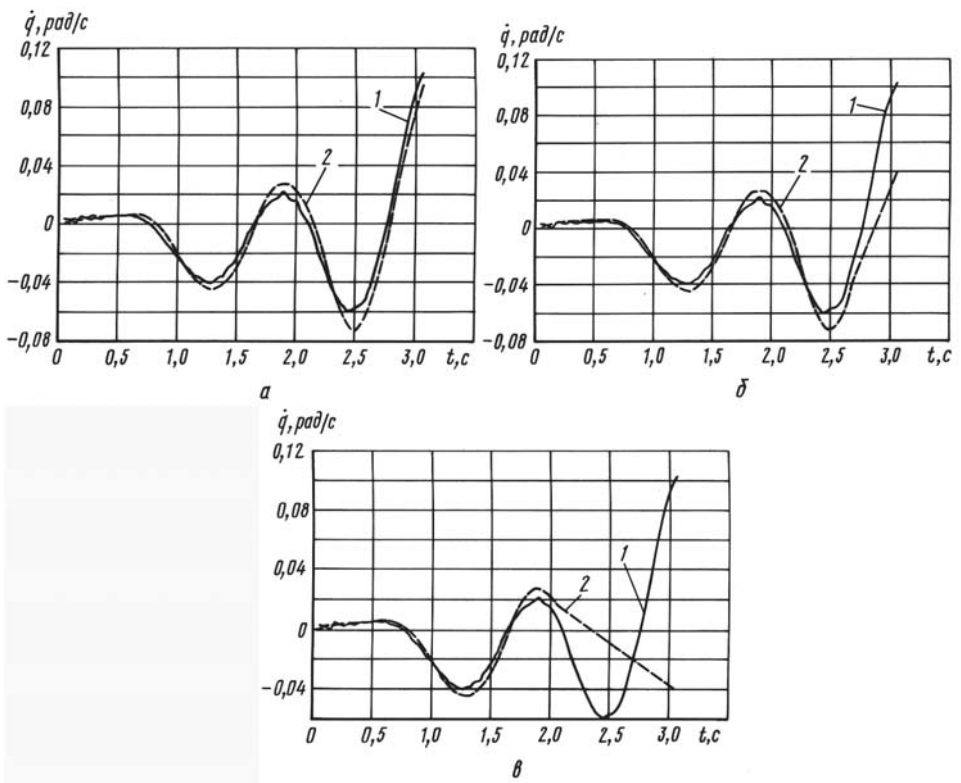


Рис. 4. Угловая скорость (реальная 1) линии визирования “ЛА–объект” и ее прогнозируемое значение (2) для разных интервалов прогнозирования: а – 0,3 с; б – 0,5 с; в – 1 с

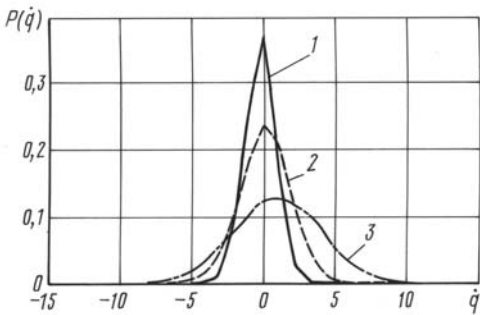


Рис. 5. Плотность распределения вероятности угловой скорости линии визирования “ЛА–объект” для различных интервалов времени прогнозирования при  $A_{ц} = 4g$ : 1, 2, 3 – для 0,3 с; 0,5 с; 1 с

екта  $a_{ц}$  считается входным возмущением и его влияние представлено в оценках координат вектора состояния  $\hat{x}_1$ ,  $\hat{x}_2$  и  $\hat{x}_3$ , можно представить в виде

$$\dot{\hat{x}}_1 = \dot{\hat{x}}_2; \quad \dot{\hat{x}}_2 = \dot{\hat{x}}_3; \quad \dot{\hat{x}}_3 = (1/T_{ЛА})\hat{x}_3 + (1/T_{ЛА})u.$$

управления на интервале времени прогнозирования  $\tau_{пр}$ , обеспечивающего в том числе получение нормального распределения плотности вероятности промаха в точке встречи.

Этот алгоритм синтеза закона оптимального управления на основе прогнозирования траектории объекта рассмотрим с использованием модифицированного скалярного оценивания.

Уравнения (1) при условии, что нормальное ускорение объ-

Начальное состояние в момент времени управления ЛА с прогнозом  $t_{\text{пр}}$  можно записать в виде

$$x_1(t_{\text{пр}}) = 0; \quad x_2(t_{\text{пр}}) = 0.$$

Из критерия оптимальности (2) и матрицы  $F$  получим конечное условие в момент окончания процесса наведения ЛА

$$\hat{x}_2(t_f) = 0; \quad \hat{x}_3(t_f) = 0.$$

Управление, минимизирующее функционал (2), можно записать в виде

$$u = -\frac{\lambda_3}{2\beta T_{\text{ЛА}}},$$

где

$$\lambda_3(t) = \tau^2 \hat{x}_1(t) + \frac{1}{\tau^2} (6\beta T_{\text{ЛА}}^2 - 2\beta T_{\text{ЛА}} \tau - \beta \tau^2) \hat{x}_2(t) + \frac{2}{\tau} (\beta T_{\text{ЛА}} \tau - 2\beta T_{\text{ЛА}}^2) \hat{x}_3(t);$$

$\tau$  — оставшееся время до встречи.

Моделирование процесса самонаведения в соответствии с приведенным алгоритмом дало следующие результаты: плотность вероятности промаха для различных времен прогнозирования  $\tau_{\text{пр}}$  (рис. 6) близка к нормальной; при уменьшении времени прогноза точность попадания в объект увеличивается, однако, появляется среднее значение промаха из-за ограничения располагаемой перегрузки ЛА. Зависимость изменения среднего значения промаха и его среднеквадратичного отклонения от времени прогноза приведена на рис. 7.

Таким образом, синтезированный закон управления обеспечивает плотность вероятности промаха, близкую к нормальной, и желаемую точность наведения.

Этот закон управления содержит элементы интеллектуализации процесса наведения, такие как прогнозирование результатов действия и принятие решения по совокупности оцененных параметров. Кроме того, синтезированный закон управления эффективен и при других видах маневра объекта [7].

В заключение приведем траектории движения ЛА и объекта, когда объект совершает синусоидальный маневр и управление ведется без решения задачи прогнозирования (рис. 8) и при прогнозировании движения объекта (рис. 9). Из анализа траекторий движения ЛА и объекта, показанных на этих рисунках, вытекает, что процесс интеллектуализированного самонаведения явно предпочтителен.

**Выводы.** 1. Проведен статистический анализ точности самонаведения ЛА на маневрирующий объект при случайном воздействии

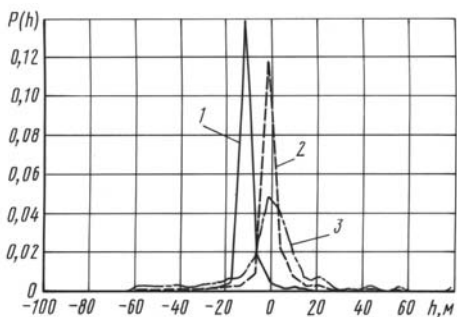


Рис. 6. Плотность вероятности промаха  $p(h)$  для различных значений времени  $\tau_p$  при  $A_{ц} = 4g$ : 1, 2, 3 – см. рис. 5

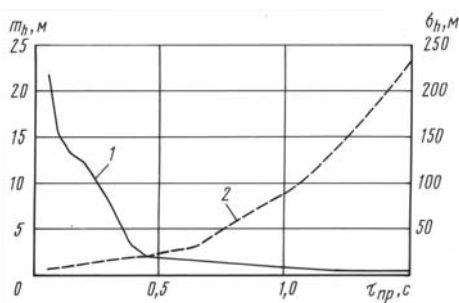


Рис. 7. Изменения среднего значения  $m_h$  (1) и среднеквадратичного отклонения  $\sigma_h$  (2) ошибки наведения по времени прогнозирования

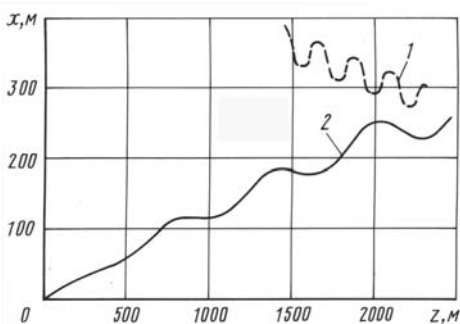


Рис. 8. Траектории движения объекта (1) и ЛА (2); объект совершает маневр с перегрузкой, имеющей синусоидальный закон



Рис. 9. Процесс наведения ЛА по прогнозируемой траектории движения объекта

окружающей среды. Показано, что плотность вероятности промаха является бимодальной.

2. Выявлено, что синтез оптимального управления по критерию минимума среднего квадрата промаха не является адекватным.

3. Предложен новый метод самонаведения, основанный на гипотезе движения объекта на начальном этапе, построенного как среднее синусоидального маневра по текущим измерениям, и использовании прогноза реального положения объекта на конечном этапе. Переход на самонаведение на конечном участке осуществляется на основе оценки прогнозируемого промаха, дальности до объекта, скорости сближения и располагаемой перегрузки ЛА.

4. Решена задача определения плотности вероятности угловой скорости линии визирования на основе прогноза ее поведения методом Тейла-Вейджа. Показано, что плотность вероятности изменения угловой скорости линии визирования близка к нормальной.

5. Разработан алгоритм синтеза оптимального управления на основе прогнозирования траектории движения объекта с использованием

модифицированного скалярного оценивания. Показано, что при реализации такого закона управления плотность вероятности промаха близка к нормальной.

б. Показано, что существует оптимальное время прогноза, определяемое увеличением среднего квадратического значения промаха при увеличении времени прогноза и увеличении среднего значения промаха при уменьшении времени прогноза.

Таким образом, разработан и исследован новый метод интеллектуализированного управления самонаведением на маневрирующий объект в условиях сложного воздействия окружающей среды, обеспечивающий высокую точность наведения.

Метод может быть реализован при создании систем управления, как ЛА, так и динамических объектов различных типов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.
2. Криецкий Е. И. Системы самонаведения. – М.: Машиностроение, 1970. – 236 с.
3. Ким Д. П. Методы поиска и преследование подвижных объектов. – М.: Наука, 1989. – 336 с.
4. Федосов Е. А., Бобронников В. Т., Красильщиков М. Н. Динамическое проектирование систем управления автоматических маневренных летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
5. Питерсон И. Л. Статистический анализ и оптимизация систем автоматического управления. – М.: Сов. радио, 1964. – 248 с.
6. Левин Б. Р. Теория случайных функций и ее применение в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1957. – 496 с.
7. Пупков К. А., Неусыпин К. А., Чонг Данг Хоа. Управление летательным аппаратом при сближении с маневрирующим объектом // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2003. – № 11. – С. 33–40.

Статья поступила в редакцию 25.04.2007

Константин Александрович Пупков родился в 1930 г., окончил в 1954 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки и техники России, действительный член РАЕН. Автор более 200 научных работ в области систем управления летательных аппаратов и других объектов.

K.A. Pupkov (b. 1930) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. RF Honoured Worker of Science and Technology, academician of the Russian Academy of Natural Sciences. Author of more than 200 publications in the field of control systems for flying vehicles and other objects.