

На правах рукописи

Нгуен Куанг Винь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ САМОНАВЕДЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ И МАНЕВРА ОБЪЕКТА ПРИ НАЛИЧИИ
НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальности 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



МОСКВА – 2006

ванов В.А

Актуальность проблемы: Предложено принципиально новое решение задачи самонаведения на маневрирующий объект в условиях композиции случайных воздействий и при наличии нелинейных характеристик в контуре управления. На основе стохастического прогноза движения объекта синтезирован и исследован закон управления, обеспечивающий желаемый вид функции плотности вероятности промаха в этих условиях. Данное исследование является актуальным и дает возможность выявить новые эффекты нелинейных систем, улучшить проектирование систем такого класса, с одной стороны, а с другой, получить новые материалы для исследования и проектирования систем, а также для использования их при подготовке специалистов.

Цель работы: Исследовать влияние нелинейностей в контуре управления системы самонаведения летательного аппарата (ЛА) при учете сложного воздействия окружающей среды и маневра объекта, Разработать закон управления, обеспечивающий высокую точность наведения в этих условиях. Закон управления должен обеспечить плотность вероятности промаха, близкую к нормальной при наличии нелинейности в контуре управления. Решение задачи должно быть проведено при учете случайных воздействий, вызванных шумами измерений, флуктуацией отраженных сигналов и маневром объекта.

Методы исследования: В работе использовались методы теории оптимального управления, методы теории вероятностей и математической статистики, метод статистических испытаний Монте-Карло, методы статистической динамики нелинейных систем.

Научная новизна: На защиту выносятся:

- ❖ Исследование прохождения композиции случайных сигналов через нелинейную систему самонаведения ЛА на маневрирующий объект;
- ❖ Исследования точности и устойчивости самонаведения с учетом нелинейностей в контуре управления. Исследование точности и устойчивости самонаведения с прогнозом движения объекта;
- ❖ Синтез и исследование закона управления нелинейной системой, обеспечивающий минимум среднего квадрата сигнала на входе нелинейности типа ограничения зоны линейности измерения угловой скорости линии визирования.
- ❖ Результаты анализа и выработка ограничений по применению методов статистической линеаризации.

Внедрение результатов: Материалы диссертации использованы в исследованиях по НИР «Разработка и исследование метода наведения на маневрирующий объект при стохастическом прогнозе его движения и при учете нелинейностей в контуре управления», проведенных на кафедре «Системы автоматического управления» МГТУ им. Баумана, а также в

учебном процессе по специальности «Системы управления летательными аппаратами».

Апробация работы: Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XXX академических чтениях по космонавтике (Москва, 2006), на седьмом международном симпозиуме “Интеллектуальные системы (INTELS '2006)” (Краснодар, 2006).

Публикации: Основное содержание работы изложено в 2 статьях, в одном научно-исследовательском отчете по НИР № Госрегистрации 01200602466 и в трудах XXX академических чтений по космонавтике и седьмого международного симпозиума “Интеллектуальные системы (INTELS '2006)”.

Структура диссертации: Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 34 наименований. Основная часть работы составляет 153 страниц машинописного текста и содержит 86 рисунков.

ОСНОВНЫЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрены особенности исследования точности нелинейных систем самонаведения на маневрирующий объект, структура системы самонаведения, типы нелинейностей, критерии оценки точности самонаведения, сформулированы цель работы, актуальность, её научная новизна, внедрение результатов, апробация и структура диссертации.

Рассмотрена математическая модель кинематического звена и связь между кинематическими параметрами и углами, измеряемыми головкой самонаведения, как это показано на рисунке 1.

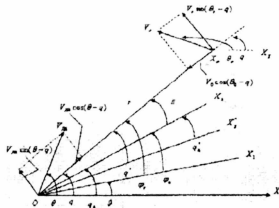


Рис. 1. Кинематическая схема самонаведения

где: q - угол наклона линии визирования; $\dot{q}$ - угловая скорость линии визирования; $V_{\text{ЛА}}$, $V_{\text{Ц}}$, θ , $\theta_{\text{Ц}}$ - соответственно скорости и углы наклона траектории ЛА и объекта; r - модуль вектора дальности; $\dot{r}$ - его производная, пропорциональная скорости сближения ЛА и объекта.

Кинематические уравнения, которые характеризуют изменение направления и величины вектора дальности, имеют вид:

$$\dot{r} = V_{\text{Ц}} \cos(\theta_{\text{Ц}} - q) - V_{\text{ЛА}} \cos(\theta - q); \quad r\dot{q} = V_{\text{Ц}} \sin(\theta_{\text{Ц}} - q) - V_{\text{ЛА}} \sin(\theta - q).$$

Величина промаха $h(t)$, характеризует точность попадания в объект и вычисляется по формуле

$$h(t) = \frac{\dot{q}(t)r^2(t)}{\sqrt{(\dot{q}r)^2 + \dot{r}^2(t)}} \approx \frac{\dot{q}(t)r^2(t)}{\dot{r}} \quad (1)$$

Структурная схема системы самонаведения представлена на рисунке 2:

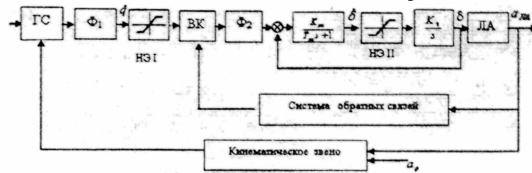


Рис. 2. Функциональная схема системы самонаведения

где: ГСН – головка самонаведения; ВК – выработка команды управления; Φ_1, Φ_2 – фильтры; $a_{\text{нн}}$ – нормальное ускорение объекта; $a_{\text{лан}}$ – нормальное ускорение ЛА; δ и $\dot{\delta}$ – угол и угловая скорость поворота руля соответственно; $\frac{K_{\text{рн}}}{T_{\text{рн}}s+1}$ и $\frac{K_2}{s}$ – передаточные функции элементов рулевого привода: усилителя и исполнительного устройства, соответственно.

Нелинейность I (НЭ I) вводится из соображений прочности для ограничения максимальной маневренности летательного аппарата. Уровень ограничения управляющего сигнала подбирается так, чтобы при полете ЛА в режиме максимального скоростного напора нормальная перегрузка не превышала бы определенной предельной величины.

Нелинейность II (НЭ II) имитирует ограничение скорости рулевого привода, которое выбирается, исходя из обеспечения желаемой полосы пропускания рулевого привода при действии случайного сигнала на его входе. Уравнение нелинейного звена типа "Ограничение"

$$y = g(x) = \begin{cases} -L & \text{при } x < -h \\ \text{tg}(\varphi)x & \text{при } -h \leq x \leq h \\ L & \text{при } x > h \end{cases} \quad (2)$$

В первой главе приведены типы случайных процессов, методы математического описания случайных воздействий на систему, прохождение случайных сигналов через нелинейную динамическую систему, функции плотности вероятности ошибки.

Кинематическая схема задачи приведена на рисунке 3.



Рис. 3. Кинематическая схема задачи

где: $V_{\text{цн}}$ и $V_{\text{лан}}$ – нормальные скорости объекта и ЛА, соответственно.

Уравнения движения ЛА относительно номинальной линии визирования будут иметь вид:

$$\dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = x_3 - a_y; \dot{x}_3 = -\left(\frac{1}{T_{ЛА}}\right)x_3 + \left(\frac{1}{T_{ЛА}}\right)u, \quad (3)$$

где x_1 - смещение ЛА относительно траектории объекта, перпендикулярное номинальной линии визирования; a_y - боковое ускорение объекта, которое изменяется по синусоидальному закону;

$x_2 = V_{ЛАН} - V_{ЦН}$; $x_3 = a_{ЛА}$ - боковое ускорение ЛА;

$T_{ЛА}$ - аэродинамическое запаздывание ЛА.

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 σ_v^2 - дисперсия ошибки определения скорости сближения.

В процессе сближения с целью происходит непрерывное измерение угловой скорости линии визирования - $\dot{q}$.

$$\text{Принимается, что } |\dot{q}| \leq 1 \text{ и поэтому } \dot{q}(t) = \frac{x_1}{V(t_f - t)^2},$$

где t_f - время окончания процесса наведения.

Измеряемые сигналы подвержены случайным помехам и уравнение измерений имеет вид:

$$Z = \frac{x_1}{V(t_f - t)^2} + v, \text{ где } v = \xi_1 + \xi_2 - \text{случайный процесс с заданной}$$

интенсивностью $\sigma_{\xi_1}^2 + \sigma_{\xi_2}^2 e^{-a|v|}$ и нулевым математическим ожиданием.

Состояние системы описывается дифференциальным уравнением вида:

$\dot{x} = Ax + Bu + w$, а уравнение измерений в векторной форме можно записать следующим образом: $Z = Hx + v$,

$$\text{где: } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ЛА}} \end{bmatrix}; \quad B = [0 \quad 0 \quad 1]^T; \quad H = \begin{bmatrix} \frac{1}{V(t_f - t)^2} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$w = [0 \quad A_w \sin(\Omega_w t + \varphi) \quad 0]^T$ - вектор входных возмущений, обусловленный маневром цели с синусоидальной нормальной перегрузкой.

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

$$J = M \left[x^T(t_f) F x(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} B^T u^2 dt \right], \quad (4)$$

где β - выбирается так, чтобы выполнилось ограничение на управление и матрица F имеет вид элементарной матрицы E_{11} .

Задача оптимального наведения ЛА на маневрирующий объект решена методом динамического программирования с использованием фильтра Калмана для оценивания вектора состояния системы.

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:

$$\text{Оптимальное управление имеет вид: } u_k = -E_k \hat{x}_k \quad (5)$$

при $E_k = (\beta + B_k^T S_{k+1} B_k)^{-1} B_k^T S_{k+1} A_k$, где симметричная матрица S_k - решение рекуррентного уравнения

$$S_k = A_k^T S_{k+1} A_k - A_k^T S_{k+1} B_k (\beta + B_k^T S_{k+1} B_k)^{-1} B_k^T S_{k+1} A_k \quad (6)$$

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

Во второй главе: Рассмотрены анализ точности и устойчивости систем самонаведения с учетом нелинейностей в контуре.

- Влияние ограничения угловой скорости $\dot{q}$ линии визирования

Моделирование задачи сближения ЛА с объектом проводилось для трех случаев:

1. Объект движется прямолинейно и равномерно, на систему измерения ЛА действует помеха в виде белого шума со спектральной плотностью:

$$S_{\xi_1}(\omega) = \frac{1}{2\pi} c_{\xi_1}^2, \quad (7)$$

где $c_{\xi_1}^2$ - уровень спектральной плотности.

2. Объект движется прямолинейно и равномерно. На систему наблюдения действует сигнал, как и в первом случае и сигнал, вызванный флуктуацией отраженного от объекта сигнала. Спектральная плотность будет иметь вид:

$$S_{\xi_1 + \xi_2}(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\xi_2}^2 \alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{1}{2\pi} c_{\xi_1}^2, \quad (8)$$

3. Объект совершает маневр с синусоидальным нормальным ускорением. Сигнал, отраженный от объекта, содержит флуктуационную помеху ξ_2 и присутствует белый шум ξ_1 в процессе измерения. Спектральная плотность сигнала:

$$S(\omega) = \frac{\pi A_o^2}{2} [\delta(\omega + \Omega_o) + \delta(\omega - \Omega_o)] + \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\xi_2}^2 \alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{1}{2\pi} c_{\xi_1}^2, \quad (9)$$

где: A_o – амплитуда маневра объекта.

Функция распределения вероятности суммы сигналов, воздействующих на устройство наблюдения системы управления, имеет вид:

$$W(\dot{q}) = \frac{1}{tg^2(\varphi) \sigma_{\xi_1} \pi \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_o}{(r_0 - Vt)} t\right)^2 - \left(\frac{a_o}{(r_0 - Vt)} t\right)^2}} \exp\left(-\frac{\xi_1^2}{2tg^2(\varphi)\sigma_{\xi_1}^2} - \frac{\alpha(\dot{q} - \xi_1)^2}{tg(\varphi)}\right) d\xi_1$$

$$+ \lambda \int_{-\infty}^{\infty} (S_{41}\delta(y-a) - S_{42}\delta(y+a)) d\xi_1 \quad \text{при } (y \in [-a, a] \cap [-A_o, A_o])$$

и $W(\dot{q}) = 0$ при $(y \notin [-a, a] \cap [-A_o, A_o])$. (10)

где $\sigma = \sqrt{\sigma_{\xi_1}^2 + \sigma_{\xi_2}^2}$; $S_{41} = \int_{\min(\sigma, A_o)}^{\infty} \left(\frac{1}{\sigma_{\xi_1} \sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma_{\xi_1}^2}) + \alpha \exp(-\alpha x) \right) dx$;

$$S_{42} = \int_{-\infty}^{\max(-\sigma, -A_o)} \left(\frac{1}{\sigma_{\xi_1} \sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma_{\xi_1}^2}) + \alpha \exp(-\alpha x) \right) dx.$$

Анализ результатов моделирования линейной системы показывает, что с маневром объекта, имеющим синусоидальное нормальное ускорение, плотность вероятности промаха $p(h)$ имеет вид бимодального распределения (см. рис. 4).

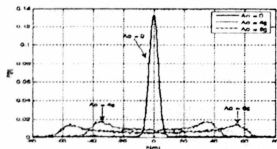


Рис. 4. Распределение вероятности промаха в точке встречи при отсутствии нелинейности.

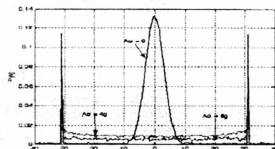


Рис. 5. Плотность вероятности промаха в точке встречи при наличии нелинейности.

Плотности вероятности промаха для тех же перегрузок объекта при наличии ограничения угловой скорости линии визирования имеет вид, показанный на рис. 5. Из рисунка видно, что плотность вероятности размывается в пределах зоны линейности и увеличивается вероятность граничных значений величины промаха, что согласуется с результатами теоретического анализа (10). Из рисунка видно также, что уменьшается вероятность попадания в диапазон $\pm 20m$ по сравнению с линейной системой $R_n=0,28$; $R_n=0,2$.

- Влияние ограничения скорости рулевого привода $\dot{\delta}$ и угла поворота руля δ

Нелинейная система при учете ограничения угловой скорости отклонения рулей задана структурной схемой рис. 6,

При учете этого ограничения, мы получим:

$$D_x = \frac{K_y^2 \cdot c^2}{2T(T \cdot K_y \cdot K^{(2)}(m_x, D_x) \cdot K_c + 1)}, \quad (11)$$

$$K^{(2)}(D_x) = \Phi\left(\frac{a}{\sqrt{2D_x}}\right), \quad (12)$$

где D_x -дисперсия сигнала на входе нелинейности, а $K^{(2)}$ - эквивалентный линейный коэффициент усиления.

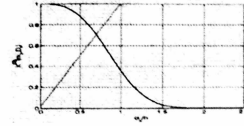
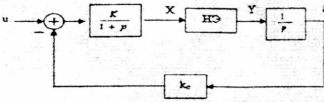


Рис. 6. Нелинейный рулевой привод с жесткой обратной связью.

Рис. 7. Зависимость эквивалентного коэффициента усиления от ошибки.

По формуле (11) и (12) построен график зависимости эквивалентного коэффициента усиления $K^{(2)}(m_x, D_x)$ от ошибки σ_x/h (см. рис. 7). Из графика получим: $K^{(2)}(m_x, D_x) \approx 0,7$; $T_{\text{экв.}} = 0,018$ с; $T_{\text{линейное}} = 0,0125$ с и можем определить дисперсию рассматриваемой выходной координаты-углы поворота рулей δ :

$$D_\delta = \frac{K^{(2)}K_y}{K_c(\alpha + K_cK_yK^{(2)})}D_{\xi 2}.$$

Функцию плотности вероятности можно представить в виде:

$$W(\dot{q}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}D_\delta} \exp\left(-\frac{(\dot{q} - m_\delta)^2}{2D_\delta^2}\right) = \frac{K_c(\alpha + K_cK_yK^{(2)})}{\sqrt{2\pi}K_yK^{(2)}D_{\xi 2}} \exp\left[-\frac{\left(\dot{q} - \frac{1}{K_c}C_{\xi 2}\right)^2}{2\left(\frac{K^{(2)}K_y}{K_c(\alpha + K_cK_yK^{(2)})}D_{\xi 2}\right)^2}\right]$$

Плотность вероятности $p(\delta)$ при ограничении скорости рулевого привода $-80 < \delta < 80$ град/с показано на рисунке 8 и плотность вероятности $p(\delta)$ при том же ограничении на рисунке 9.

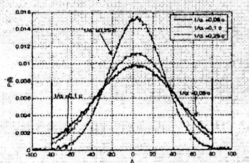


Рис. 8. Распределение вероятности $p(\delta)$ при ограничения скорости рулевого привода $-80 < \delta < 80$ град/с.

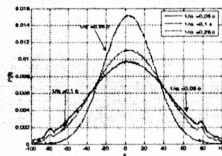


Рис. 9. Распределение вероятности $p(\delta)$ при ограничении рулевого привода $-80 < \delta < 80$ град/с.

Анализ результатов моделирования показывает, что плотность вероятности $p(\delta)$ в пределах зоны линейности остается близкой к нормальной, однако появляется систематическое отклонение δ из-за ограничения располагаемой перегрузки объекта управления. Однако анализ

результатов моделировании угла поворота руля δ показывает, что его плотность вероятности близка к нормальной.

Исследование точности работы рулевого привода методом статистической линеаризации показало, что дисперсия угла поворота руля близка к дисперсии, определенной статистическим моделированием (2000 реализаций): $\sigma_{\text{стат. л.}} \approx 20,3$ град; $\sigma_{\text{стат. мод.}} \approx 27,5$ град.

- Влияние ограничения угловой скорости линии визирования и ограничения скорости рулевого.

С учётом вышесказанного график плотности вероятности промаха в точке встречи при наличии ограничения угловой скорости линии визирования и ограничения скорости рулевого привода приведен на рис. 10.

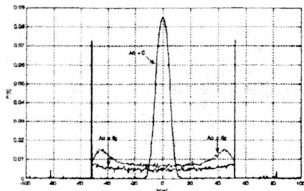


Рис 10. Распределение вероятности промаха в точке встречи при наличии ограничения угловой скорости линии визирования и ограничения скорости рулевого привода.

Исследование точности самонаведения при одновременном учете ограничения угловой скорости линии визирования и угловой скорости рулевого привода и маневра объекта показало, что плотность вероятности промаха сохраняет вид бимодального распределения, однако, увеличивается вероятность промаха на граничных значениях зоны линейности. Применение метода статистической линеаризации не имеет смысла.

В третьей главе Приведены результаты исследования структуры линейного корректирующего звена, для двух задач:

- Определение характеристики корректирующего звена, обеспечивающего минимальное значения сигнала на входе нелинейного элемента.

- Определение характеристики корректирующего звена, обеспечивающего минимум средней квадратичной ошибки при заданных коэффициентах ошибки воспроизведения регулярной составляющей сигнала и при ограничении среднего квадратичного значения сигнала на входе нелинейного элемента.

Исследовано влияние нелинейного элемента на точностные характеристики систем самонаведения при воздействиях, содержащих регулярную составляющую и помеху в виде случайной функции времени.

Исследованы возможности синтеза корректирующего звена в системе самонаведения, обеспечивающего минимум среднего квадрата случайного сигнала на входе нелинейности элемента НЭ I. Для случая чисто случайного

сигнала и смести регулярного и случайного сигналов получены передаточные функции корректирующих звеньев.

В четвертой главе рассмотрена задача 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 флюктуации отраженного сигнала) можно представить как процесс Тейла-Вейджа. Это процесс аналитически записывается как:

$$\begin{aligned} J(t) &= a_1(t) + \varepsilon(t), \\ a_1(t) &= a_1(t-1) + a_2(t), \\ a_2(t) &= a_2(t-1) + \varepsilon_2(t) \end{aligned} \quad (13)$$

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 $\sigma_{\varepsilon_1}^2$ и $\sigma_{\varepsilon_2}^2$ и независимыми друг от друга.

Пусть в момент времени t необходимо сделать прогноз $J_{np}(t)$ величины $J_{np}(t + \tau_{np})$; $\hat{a}_1(t); \hat{a}_2(t)$, где τ_{np} - интервал времени прогноза.

В момент времени $t + \tau_{np}$, значение прогноза запишем

$J_{np}(t) = \hat{a}_1(t) + \tau_{np} \hat{a}_2(t)$, где $\hat{a}_1(t), \hat{a}_2(t)$ - текущие оценки коэффициентов адаптивного полинома первого порядка, которые определяются следующим образом: $\hat{a}_1(t) = \alpha_1 J(t) + (1 - \alpha_1)(\hat{a}_1(t-1) + \hat{a}_2(t-1))$; (14)

$$\hat{a}_2(t) = \alpha_2 (\hat{a}_1(t) - \hat{a}_1(t-1)) + (1 - \alpha_2) \hat{a}_2(t-1); 0 < \alpha_2, \alpha_1 < 1. \quad (15)$$

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

$$\alpha_1 = \frac{2d}{1+d}; \quad \alpha_2 = d;$$

$$d = \sqrt{\left(-\frac{1}{8}\chi^2 + \frac{1}{2}\chi\sqrt{1 + \frac{1}{16}\chi^2}\right)}; \quad \chi^2 = \frac{\sigma_{\varepsilon_2}^2}{\sigma_{\varepsilon_1}^2}; \quad D(1) = \frac{1+d}{1-d}\sigma_{\varepsilon_1}^2.$$

Общие формулы прогнозирования значения J_{np} в интервале времени прогноза модели (10) будут:

$$\hat{a}_1(t) = \hat{a}_1(t-1) + \hat{a}_2(t-1) + \alpha_1 e_1(t-1), \quad (16)$$

$$\hat{a}_2(t) = \hat{a}_2(t-1) + \alpha_1 \alpha_2 e_1(t-1), \quad (17)$$

$$J_{np}(t) = -\hat{a}_1(t) + \tau_{np} \hat{a}_2(t). \quad (18)$$

Ошибка прогноза, сделанного в момент t на τ_{np} шагов будет:

$$e_{np}(t) = J(t + \tau_{np}) - J_{np}(t). \quad (19)$$

и дисперсия ошибки прогноза

$$D_{\epsilon}(\tau_{np}) = M[e^2(t)] = [1\tau_{np}] \{ \Psi \Theta \Psi^T + \\ + \Pi \Psi \Theta \Psi^T \Pi^T + \Pi^2 \Psi \Theta \Psi^T (\Pi^T)^2 + \dots \} \begin{bmatrix} 1 \\ \tau_{np} \end{bmatrix} + \sigma_{\epsilon 1}^2 + \sigma_{\epsilon 2}^2 \sum_{i=1}^{np} i^2, \quad (20)$$

где симметричные матрицы Θ , Π и Ψ имеют вид соответственно:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \sigma_{\epsilon 1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\epsilon 2}^2 \end{bmatrix}; \quad \Pi = \begin{bmatrix} 1-\alpha_1 & 1-\alpha_1 \\ -\alpha_1\alpha_2 & 1-\alpha_1\alpha_2 \end{bmatrix}; \quad \Psi = \begin{bmatrix} \alpha_1 & -(1-\alpha_1) \\ \alpha_1\alpha_2 & -(1-\alpha_1\alpha_2) \end{bmatrix}.$$

После некоторых преобразований получим результат

$$D_{\epsilon}(\tau_{np}) = \Lambda_{11} + 2\tau_{np}\Lambda_{12} + \tau_{np}^2\Lambda_{22} + \sigma_{\epsilon 1}^2 + \sigma_{\epsilon 2}^2 \sum_{i=1}^{np} i^2, \quad (21)$$

$$\text{где } \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{12} & \Lambda_{22} \end{bmatrix} \quad - \text{ решение уравнения в виде матрицы}$$

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

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 (13), где обозначим $\dot{q}(t) = J(t)$ – угловая скорость линии визирования; $\epsilon_1(t)$ – белый шум, воздействующий на систему наблюдения с дисперсией $D_{\epsilon 1} = \sigma_{\epsilon 1}^2$; $\epsilon_2(t)$ – флюктуационная помеха в виде белого шума с дисперсией $D_{\epsilon 2} = \sigma_{\epsilon 2}^2$; $a_1(t)$ – приведенная угловая скорость линии визирования.

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

$$a_1(t_n) = \sum_{k=1}^{n_e} \dot{q}_{a_q}(t_k) = \sum_{k=1}^{n_e} \frac{a_q(t_k)}{(r_{o,np} - Vt_k)} t_k, \text{ где } r_{o,np} - \text{ дальность ЛА - объект,}$$

вычисленная в момент времени начала прогнозирования; n_e – число, определяемое из практических соображений. Для следующих исходных данных при решении задачи прогнозирования:

- Дисперсии белого шума, обусловленного случайными воздействиями на процесс излучения $D_{\epsilon 1} = \sigma_{\epsilon 1}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ (рад}^2/\text{с}^2\text{)}$.

- Дисперсии флюктуаций, обусловленных колебаниями ЛА и объекта в процессе наведения $D_{\epsilon 2} = \sigma_{\epsilon 2}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ (рад}^2/\text{с}^2\text{)}$.

Результаты оценки плотности вероятности угловой скорости линии визирования для различных интервалов времени прогнозирования (см. рис. 11.) показали, что эта плотность вероятности имеет вид близкий к нормальному. Однако, как видно на рис. 12. поведение ЛА на траектории является периодическим, но не чисто синусоидальным из-за ограничения угловой скорости линии визирования. Поэтому при решении задачи прогноза необходимо учитывать высокие частоты, т.е.

$$\dot{q}(t) = \sum_{i=1}^n \dot{q}_{i\max} \sin i\omega t = g_1 \sin \omega t + g_2 \sin 2\omega t + g_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (22)$$

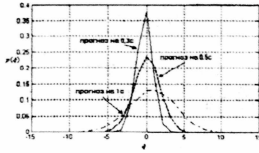


Рис. 11. Плотность вероятности угловой скорости линии визирования при различных интервалах времени прогнозирования.

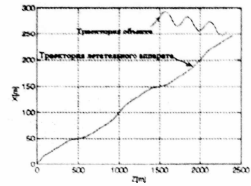


Рис. 12. Процесс наведения ЛА по прогнозируемой траектории движения объекта.

Поэтому для увеличения точности прогноза целесообразно учитывать не только первую гармонику колебания, но и более высокие гармоники. Тогда в нелинейном случае можно улучшить оценку прогноза и ошибку прогноза по алгоритму Тейла-Вейджа для сигнала (22).

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 управления на интервале времени прогнозирования $\tau_{пр}$ с целью получения плотности вероятности промаха в точке встречи в этом случае.

Уравнение (3) при условии, что нормальное ускорение объекта a_y 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

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2; \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3; \dot{\hat{x}}_3 = \left(\frac{1}{T_{ЛА}} \right) \hat{x}_3 + \left(\frac{1}{T_{ЛА}} \right) u \quad (23)$$

Начальное состояние в момент времени управления ЛА с прогнозом $\tau_{пр}$ имеет вид: $x_1(t_{пр}) = 0$; $x_2(t_{пр}) = 0$. (24)

Из критерия оптимальности (4) и вида матрицы F конечное условие в момент окончания процесса наведения ЛА будет: $\hat{x}_2(t_f) = 0$; $\hat{x}_3(t_f) = 0$.

Управление, минимизирующее функционал (2) будет иметь вид:

$$u(t) = -\frac{\tau^2}{2\beta T_{ЛА}} \hat{x}_1(t) + \frac{1}{\tau^2} \left(\tau + \frac{\tau^2}{2T_{ЛА}} - 3T_{ЛА} \right) \hat{x}_2(t) + \frac{1}{\tau} (2T_{ЛА} - \tau) \hat{x}_3(t) - a_0. \quad (25)$$

Синтезированный закон управления определяется на основе оценки компонент вектора состояния $\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \hat{x}_3(t)$, оставшегося интервала времени управления τ , также времени запаздывания реакции ЛА $T_{ЛА}$. Моделирование процесса самонаведения в соответствии с законом управления (25) для различных временных интервалов прогноза дало следующие плотности вероятности промаха, показанные на рис. 13.

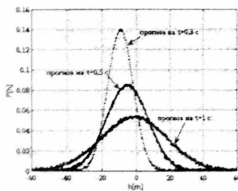


Рис. 13. Плотность вероятности промаха для различных интервалах времени прогнозирования $\Delta t = 4g$.

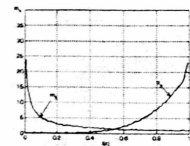


Рис. 14. Изменения среднего значения и среднеквадратичного значения отклонения ошибки наведения от времени прогнозирования.

Эти плотности вероятности близки к нормальной, т.к. величины асимметрии и эксцесса составляют: $\zeta = 0,12$; $0,18$ и $0,25$, а коэффициентами эксцесса $\gamma = 1,4$; $2,1$ и $3,2$ в отличие от бимодальной плотности, полученной без использования прогноза (см. рис. 4). Однако, мода этих плотностей вероятности смещается от нуля с уменьшением времени прогноза. Это происходит потому, что располагаемой перегрузки ЛА недостаточно для исправления отклонения. Существует оптимальное время прогноза, как это видно на рисунке 14, т.е. $\tau_{\text{пр. опт}} \approx 0,55$ с. На этом рисунке видно, что с увеличением времени прогноза дисперсия промаха увеличивается, а среднее значение промаха уменьшается. Плотность распределения вероятности промаха $p(h)$ при управлении ЛА на объект по прогнозируемому значению $\dot{q}(t)$ на различных интервалах времени прогноза и ограничении угловой скорости линии визирования равно 4 град/с и $\Delta t = 4g$ показана на рис. 15. Здесь плотность вероятности в пределах линейной зоны близка нормальной, на границах зоны имеют место дельта-функции.

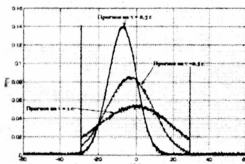


Рис. 15. Плотность вероятности промаха для различных интервалов времени прогнозирования при наличии ограничения угловой скорости линии визирования.

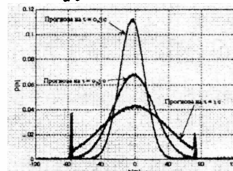


Рис. 16. Плотность вероятности промаха на различных интервалах времени прогнозирования при наличии ограничения скорости рулевого привода.

В случае прогнозирования на интервале времени $\tau_{\text{пр}} = 0,3$ с, дисперсия промаха, хотя и меньше, но среднее значение промаха сдвигается от значения нуля больше, чем в линейном случае из-за уменьшения добротности контура управления при наличии нелинейности и при воздействии случайных процессов. Это возникает из-за недостаточности располагаемой перегрузки ЛА при малом интервале времени

прогнозирования. Сравнительный анализ точности самонаведения линейной системы (рис. 13) и системы с ограничением угловой скорости линии визирования при прогнозировании движения объекта (см. рис. 15) показывает, что в нелинейной системе в зоне линейности НЭ I плотность вероятности промаха близка к нормальной, однако на границах зоны линейности существуют дельта-функции с весом усеченных частей плотности вероятности из-за наличия нелинейности. Изменяется также среднее значения промаха в зависимости от интервала прогноза.

В пятой главе приводятся результаты экспериментального исследования процессов самонаведения.

- Анализ плотности вероятности промаха ЛА при самонаведении на маневрирующий объект при наличии ограничения линии визирования показал, что вероятность малых промахов уменьшается в пределах линейной зоны ограничения, а на границах зоны имеют место δ -функции с весом усеченных частей плотности. С уменьшением зоны линейности увеличивается вероятность больших промахов. Плотность вероятности промаха отлична от нормальной (см. рис. 5).

- Анализ плотности вероятности промаха ЛА при самонаведении на маневрирующий объект при различных временах прогноза, при наличии ограничения угловой скорости линии визирования (см. рис. 15) показал, что плотность вероятности в пределах зоны линейности остается близкой к нормальной. Однако при больших временах прогноза вероятность больших промахов возрастает. Увеличивается также среднее значение промаха при малом времени прогноза по сравнению с линейной системой из-за уменьшения добротности контура управления.

- Анализ результатов моделирования процесса самонаведения ЛА на объект при различных временах прогноза, при наличии ограничения угловой скорости руля (см. рис. 16) показал, что плотность вероятности промаха остается близкой к нормальной, за исключением больших времен прогноза, когда эта плотность имеет δ -функции. На основании анализа результатов моделирования процесса самонаведения ЛА на маневрирующий объект при наличии нелинейностей в контуре управления и прогноза движения объекта управления метод является весьма эффективным. Результаты анализа точности различных вариантов решения задачи самонаведения сведены в таблицу 1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведено аналитическое исследование плотности вероятности сигнала угловой скорости линии визирования после прохождения через нелинейный элемент при различных уровнях шумов измерений, флуктуаций отраженного от объекта сигнала и амплитуд нормальной перегрузки объекта.

2. Исследованы плотности вероятности промаха только при учете ограничения угловой скорости линии визирования и только при учете угловой скорости поворота руля. Показано, что в первом случае вероятность попадания в диапазон ± 20 м уменьшается по сравнению с линейной системой, а на границах зоны линейности имеют место δ -функции с весом усеченных частей распределения. Во втором случае показано, что плотность вероятности поворота руля близка к нормальной.

3. Исследование точности самонаведения при одновременном учете ограничения угловой скорости линии визирования и угловой скорости рулевого привода показало, что плотность вероятности промаха сохраняет вид бимодального распределения, однако, увеличивается вероятность промаха на граничных значениях зоны линейности. Применение метода статистической линеаризации не имеет смысла.

4. Определены характеристики корректирующего звена, обеспечивающего минимальное значение сигнала на входе нелинейного элемента. Определены также характеристики корректирующего звена, обеспечивающего минимум средней квадратичной ошибки при заданных коэффициентах ошибки воспроизведения регулярной составляющей сигнала и при ограничении среднего квадратичного значения сигнала на входе нелинейного элемента. Исследованы возможности синтеза корректирующего звена в системе самонаведения, обеспечивающего минимум среднего квадрата случайного сигнала на входе нелинейности НЭ I для случаев чисто случайного сигнала и смести регулярного и случайного сигналов. Получены передаточные функции корректирующих звеньев для общих случаев.

5. Синтезирован закон оптимального управления по оцениваемым координатам вектора состояния системы на интервале времени прогнозирования траектории объекта. Синтезированный закон управления обеспечивает управление ЛА при сближении с объектом в случае маневра объекта с синусоидальной нормальной перегрузкой и устраняет бимодальное распределение ошибки наведения. Плотность распределения вероятности ошибки наведения – значения промаха в точке встречи ЛА с объектом имеет вид, близкий к нормальному и вероятностные характеристики полученного распределения (среднее значение, среднеквадратичное отклонение и их доверительный интервал и доверительная вероятность) являются приемлемыми.

6. Исследовано влияние ограничения угловой скорости линии визирования на точность самонаведения при синтезированном законе управления при различных временах прогноза. Показано, что в интервале линейной зоны плотность вероятности промаха близка к нормальной, а на границах линейной зоны имеют место дельта-функции с весом усеченных

частей плотности. Увеличивается среднее значение промаха. Однако, средние характеристики промаха остаются в допустимых пределах.

7. Анализ плотности вероятности промаха ЛА при самонаведении на маневрирующий объект при наличии ограничения угловой скорости линии визирования показал, что вероятность малых промахов по сравнению с линейной системой уменьшается в пределах линейной зоны ограничения, а на границах зоны имеют место вероятности типа δ -функции с весом усеченных частей плотности. С уменьшением зоны линейности увеличивается вероятность больших промахов. При самонаведении на маневрирующий объект при временах прогноза $\tau_{пр}=0,3$ с; $\tau_{пр}=0,5$ с; $\tau_{пр}=1,0$ с, при наличии ограничения угловой скорости линии визирования показал, что плотность вероятности в пределах зоны линейности остается близкой к нормальной. Однако при больших временах прогноза вероятность больших промахов возрастает. Увеличивается также среднее значение промаха при малом времени прогноза по сравнению с линейной системой из-за уменьшения добротности контура управления.

8. Анализ плотности вероятности угла поворота руля при наличии ограничения угловой скорости поворота при уровнях ограничения $-60 < \delta < 60$ град/с; $-80 < \delta < 80$ град/с; $-100 < \delta < 100$ град/с показал, что она имеет вид, близкий к нормальному. Это означает, что для анализа точности работы рулевого привода можно использовать методы статистической линеаризации.

9. Анализ результатов моделирования процесса самонаведения ЛА на объект при временах прогноза $\tau_{пр}=0,3$ с; $\tau_{пр}=0,5$ с; $\tau_{пр}=1,0$ с и при наличии ограничения угловой скорости руля показал, что плотность вероятности промаха остается близкой к нормальной, за исключением больших времен прогноза, когда эта плотность имеет δ -функции. При наличии ограничения угловых скоростей линии визирования и поворота руля плотность вероятности промаха остается близкой к нормальной. Однако, увеличивается среднее значения промаха. При больших временах прогнозирования плотность вероятности имеет δ -функции с весом усеченных частей плотности. На основании анализа результатов моделирования процесса самонаведения ЛА на маневрирующий объект при наличии нелинейностей в контуре управления и с прогнозом движения объекта можно утверждать, что рассмотренный метод самонаведения весьма эффективен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа точности и устойчивости самонаведения ЛА на маневрирующий объект при наличии нелинейностей в контуре управления и при прогнозе движения объекта следует, что метод самонаведения весьма эффективен и может быть использован при проектировании систем управления, работающих при сложных воздействиях окружающей среды.

Наиболее предпочтительным при реализации является алгоритм, обеспечивающий минимум среднего квадрата случайного сигнала на входе нелинейности в контуре управления.

Таблица 1.

Изменения среднего и среднеквадратичного значений промаха при маневре объекта.

		$A_0 = 2$	$A_0 = 4g$	$A_0 = 6g$	Вид распределения	
Линейная система	Без прогноза	$m_0=0,17111$ $\sigma_0=49,726$	$m_0=0,35667$ $\sigma_0=25,969$	$m_0=0,69465$ $\sigma_0=11,888$	Бимодальный	
	С прогнозом	$m_0=0,055346$ $\sigma_0=24,446$	$m_0=0,11232$ $\sigma_0=14,92$	$m_0=0,20531$ $\sigma_0=8,3635$	Нормальной	
Нелинейная система при ограничении $q=4$ град/с.	Без прогноза	$m_0=0,16008$ $\sigma_0=55,232$	$m_0=0,30561$ $\sigma_0=28,993$	$m_0=0,50762$ $\sigma_0=13,569$	Бимодальный и δ -функции	
	С прогнозом	$m_0=0,054678$ $\sigma_0=27,154$	$m_0=0,10807$ $\sigma_0=16,582$	$m_0=0,18493$ $\sigma_0=9,3096$	Нормальный и δ -функции	
Нелинейная система при ограничении $\delta=80$ град/с.	Без прогноза	$m_0=0,14588$ $\sigma_0=55,235$	$m_0=0,27015$ $\sigma_0=29,369$	$m_0=0,35619$ $\sigma_0=14,037$	Нормальный и δ -функции	
	С прогнозом	$m_0=0,044453$ $\sigma_0=27,156$	$m_0=0,085226$ $\sigma_0=16,642$	$m_0=0,15185$ $\sigma_0=9,4002$	Нормальный и δ -функции	
Нелинейная система при ограничении $q=4$ град/с и $\delta=80$ град/с.	Без прогноза	$m_0=0,16717$ $\sigma_0=56,476$	$m_0=0,29139$ $\sigma_0=29,84$	$m_0=0,33013$ $\sigma_0=14,551$	Бимодальный и δ -функции	
	С прогнозом	$m_0=0,05979$ $\sigma_0=27,656$	$m_0=0,098086$ $\sigma_0=17,025$	$m_0=0,20222$ $\sigma_0=9,7613$	Нормальный и δ -функции	
Нелинейная система с фильтром по Ньютону	Без прогноза	$m_0=0,16008$ $\sigma_0=57,759$	$m_0=0,29647$ $\sigma_0=31,096$	$m_0=0,53701$ $\sigma_0=15,209$	Бимодальный и δ -функции	
	С прогнозом	$m_0=0,054678$ $\sigma_0=28,173$	$m_0=0,10484$ $\sigma_0=17,539$	$m_0=0,19564$ $\sigma_0=10,155$	Нормальный и δ -функции	

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нгуен Куанг Винь. Статистический анализ точности самонаведения при наличии нелинейностей в контуре управления // Автоматизация и современные технологии – (Москва).-2006.-№ 3.-С. 11-15.

2. Нгуен Куанг Винь. Влияние нелинейностей в контуре управления при самонаведении на маневрирующий объект //Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики. Материалы XXX академических чтений по космонавтике – Москва, Январь 2006 г.- С. 372.

3. Разработка и исследование метода наведения на маневрирующий объект при стохастическом прогнозе его движения и при учете нелинейностей в контуре управления: Отчет о научно-исследовательской работе /МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научн. рук. темы Пупков К.А.. Исполн. Нгуен Куанг Винь, Бобков А.В., Устюжанин А.Д.-№ Гр. 01200602466, № Инв. 0220861142.- Москва, 2006.-75с.

4. Нгуен Куанг Винь. Исследование точности самонаведения в условиях помех и маневра объекта при наличии нелинейностей. международного симпозиума // Интеллектуальные системы (Интелс'2006): Труды VII /Под ред. К.А. Пупкова. - Краснодар, 2006. - С. 230-234.

5. Пупков К.А., Винь Н.К. Анализ точности самонаведения на маневрирующий объект при наличии нелинейностей в контуре управления. //Наукоемкие технологии.-2006-№ 4.

Подписано к печати 05.07.06г.

Объем 1,0 печатный лист.

Тираж 100, Заказ 328

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.