

© Полтавский А.В.
Poltavskiy A.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

OPTIMIZATION OF THE CHARACTERISTICS OF COHERENT OBJECT DETECTION SYSTEMS BASED ON THE IMITATION MODELING

Аннотация. Предлагается один из подходов в задачах формирования обликочных характеристик сложным организационно-техническим системам (ОТС) на ранней стадии их разработки. В качестве ОТС рассматривается математическая модель информационно-измерительной и управляющей системы (ИУС) комплекса с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) двойного назначения (ДН), необходимая для проведения структурно-параметрической оптимизации и оценки характеристик объектов КБЛА ДН известными алгоритмическими процедурами неградиентного случайного поиска (НСП).

Annotation. Presented is one of the approaches in problems of shaping of describing characteristics for complex organizational and technical systems at an earlier stage of development. As one of these systems is considered the mathematical model of a complex with an unmanned air vehicle with twofold purpose, necessary for executing a structural and parametrical optimization of organizational and technical systems objects with algorithmic procedures on the basis of the method of non-gradient

Ключевые слова. Комплекс с БЛА, состав, структура, система.

Key words. UAV complex, composition, weaponry.

Введение

Методы автоматизированного случайного поиска в задачах поиска и идентификации математических моделей в современных ОТС и, в том числе комплексах с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА), находят широкое применение, особенно на ранней стадии предварительного проектирования. Разработка математических моделей функционирования КБЛА является ключевой задачей исследователя, работающего в области обоснования перспектив развития авиационной техники и требований к ней. Исследования данных моделей, как правило, проводятся путем имитационного моделирования и лабораторных испытаний. В практике научных исследований и оптимизации реальных и «модельных» динамических систем применяют функцию потерь $\ell(Y, Y_T)$ [1,2,3], которая в таких задачах часто является недифференцируемой и поэтому в этих случаях находит широкое применение метод неградиентного случайного поиска (НСП), впервые разработанный академиком РАН Д.И. Гладковым в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. Наряду с достаточно развитыми методами (например, в Институте проблем управления Российской академии наук – ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова) координатно-

параметрической оптимизации и с распределенными параметрами, автоматизированные процедуры случайного поиска НСП находят научно-практическое применение на различных этапах испытаний и в типах задач в оптимизации динамических систем, которые условно можно разделить на два основных класса. Первый класс оптимизируемых задач – это задачи, связанные с оптимизацией параметров динамической системы, второй – это задачи, связанные с оптимизацией решений (модельными звеньями). В данной работе приводится решение для первой оптимизационной задачи применительно к информационно-измерительным управляющим системам обнаружения и захвата объекта-цели в заданной структуре бортового комплекса управления (БКУ) имитационной модели КБЛА. Аналогичное решение для системы захвата объекта-цели в ИУС было получено профессором И.Е. Казаковым аналитически на основе исследования уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского [2].

Постановка задачи

Представим модель динамической системы процесса наведения высокоманевренного беспилотного ле-

Полтавский Александр Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник ИПУ РАН, тел. 334-84-79.

Poltavskiy Alexander – Ph.D., senior scientist, senior scientist, Institute of control sciences of RAS, tel. 334-84-79.

тательного аппарата (БЛА) на объект-цель в горизонтальной плоскости структурой кинематических уравнений в земной системе координат (ЗСК) в виде [3,6]

$$\begin{aligned} \dot{D} &= V_{ц} \cos(v - \varphi_{ц}) - V_{н} \cos(v - \varphi_{н}); \\ \dot{v} &= (V_{н} \sin(v - \varphi_{н}) - V_{ц} \sin(v - \varphi_{ц})) / D; \\ \dot{\varphi}_{н} &= k \left| \dot{D} \right| \dot{v}; \\ \psi_{п.ц} &= v - \varphi_{н}. \end{aligned} \quad (1)$$

где D – вектор дальности от БЛА до объекта-цели;

$V_{ц}$ – вектор скорости объекта-цели;

$V_{н}$ – вектор скорости БЛА;

v – угол ориентации вектора дальности;

$\varphi_{ц}$ – угол ориентации вектора скорости объекта-цели;

$\varphi_{н}$ – угол ориентации вектора скорости БЛА;

k – навигационный коэффициент,

$\psi_{п.ц}$ – угол пеленга объекта-цели (в работе рассматривается горизонтальная плоскость наведения высокоманевренного БЛА на объект-цель (рис.2)).

В классах созданных блоков математических моделей (рис.1) компьютерной среды разработки многоцелевых КБЛА, в структурах автоматизированной ИУС

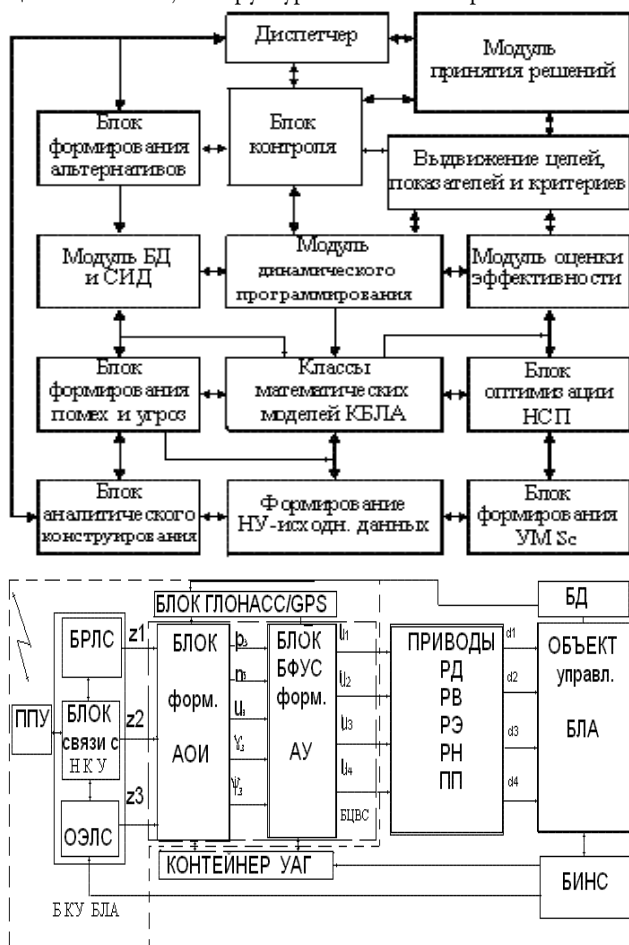


Рис.1. Схема компьютерной среды управления разработкой КБЛА и структуры ИУС бортового комплекса управления (БКУ)

объектов-целей БКУ БЛА, в составе интегрированной бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС), бортовой радиолокационной станции (БРЛС) и оптико-электронной станции (ОЭЛС), входящих в общую схему автоматизированного моделирования объектов КБЛА, установлена система целеуказания (СЦУ) и захвата объекта-цели (СЗО), представленная динамической моделью из основных звеньев [5,6]

$$F(x) = K_1 \sin(x); \quad W_1(p) = \frac{K_2}{Tp+1}, \quad W_2(p) = \frac{K_3}{p}, \quad (2)$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты усиления в системе захвата БКУ БЛА;

$F(x)$ – нелинейная характеристика дискриминатора;

$W_1(p)$ – передаточная функция усилителя и фильтра;

$W_2(p)$ – передаточная функция исполнительного устройства;

T – постоянная СЗО БЛА.

После несложных преобразований [3] уравнения модели (2), описывающих процесс захвата объекта-цели СЗО в БКУ [6], представляют зависимости как

$$\begin{aligned} X_1 &= \psi_{п.ц} - \hat{\psi}_{п.ц}; \\ u &= K_1 \sin(\psi_{п.ц} - \hat{\psi}_{п.ц} + \xi_1); \\ TM + M &= K_2(u + \xi_2), \quad \dot{\hat{\psi}}_{п.ц} = K_3 M, \end{aligned} \quad (3)$$

где X_1 – рассогласование между углом пеленга объекта-цели и его оценкой;

ξ_1 и ξ_2 – учтенные в моделировании помехи, принятые белыми гауссовыми шумами с интенсивностями G_1 и G_2 соответственно,

$\hat{\psi}_{п.ц}$ – оценка угла пеленга объекта-цели в БКУ [6].

Требуется найти оптимальные параметры K_1, K_2, T , входящие в систему (2). Все остальные элементы системы нам известны. Критерием оптимизации в СЗО принимаем максимум вероятности захвата объекта-цели $P_{\max}(\theta)$, в котором событием θ является условие захвата уклоняющегося по курсу объекта на дальностях в диапазоне $D_{\max} \dots D_{\min}$.

Захват объекта СЗО происходит при попадании рассогласования X_1 в интервал $[-\alpha, \alpha]$.

Параметры идентификации $S_{C1} = [K_1, K_2, T]^T$ модели СЗО [6] $S_{C2} = A_v$, входящие в блочную управляющую матрицу $S_C = \begin{bmatrix} S_{C1} \\ S_{C2} \end{bmatrix}$, находим по условию максимума

критерия $P(\theta) = \max P(\theta | S_o)$, с учетом принимаемых структур в имитационном моделировании (3) [2]

$$\begin{aligned} P(\theta | S_o) &= \max_{A_v, S_{C1}} F(S_{C1}, A_v), \quad F(S_{C1}, A_v) = \\ &= \frac{P(A_v | \theta) f_{\theta}(S_{C1} | \theta, A_v)}{P(A_v) f_v(S_{C1} | A_v)}, \quad (v = \overline{1, N}), \end{aligned}$$

где S_{Cl} – матрица искоемых параметров;

A_v – событие (выбираемая модель из баз данных (БД)), состоящее в появлении v -го сочетания элементов управляющей матрицы S_c ;

$f_\theta(\cdot)$ – плотность вероятности события θ и события A_v ;

$f_v(\cdot)$ – плотность вероятности события A_v ;

$P(A_v)$ – вероятность появления события A_v ;

$P(A_v|\theta)$ – условная вероятность появления события A_v .

В модели системы обнаружения БКУ для определения интегрального показателя вероятности правильного обнаружения объекта принята математическая зависимость [6]

$$P_{обн}(D) = 1 - \exp\left[-\frac{(D_{max} - D)^2}{2a^2}\right],$$

где D_{max} – максимальная дальность обнаружения объекта-цели; $a = \chi \cdot V_{ц} (1 - e^{-\tau})$ – параметр; χ – коэффициент, определяемый расчетным путем; τ – среднее время цикла поиска объекта-цели. В расчетах и в оценке показателя D_{max} в радиолокационном (РЛ) диапазоне длин волн ИУС используется формула $D = D_{max}^{(RL)} \exp[-0,115\xi D]$ [6], где ξ – коэффициент затухания радиоволн в атмосфере. Например, исходной моделью для оценки показателя D_{max} в микроволновом спектре при моноимпульсной локации

объекта принята зависимость $D_{max} \leq \left[\frac{G_t A_t \sigma E_t}{(4\pi)^2 c^2 N_0} \right]$, в которой G_t – коэффициент усиления антенны; A_t – площадь апертуры; N_0 – спектральная плотность белого гауссова шума; σ – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объекта-цели. Для расчетов основных характеристик ИУС и показателя D_{max} в инфракрасном (ИК) диапазонах электромагнитных длин волн (рис.2) применялась формула в виде [6]

$$D_{max}^{(ИК)} = \sqrt{\frac{S_{об} S_{ц} \tau_{об} \cos \alpha \cos \varphi k_{ан} \epsilon_{ц} D^* K \sigma_1 T_{ц} [Z(\frac{\lambda_2}{\lambda_m}) - Z(\frac{\lambda_1}{\lambda_m})]}{\pi \sqrt{q_{ин}} \Delta f m}} \quad (4)$$

где $S_{об}$ – площадь входного зрачка прибора обнаружения ИУС;

$S_{ц}, \tau_{об}$ – площадь объекта излучения и коэффициент пропускания излучения объективом;

$\cos \alpha, \cos \varphi$ – косинусы углов ориентации прибора ИУС и объекта наблюдения;

$k_{ан}$ – коэффициент анализатора изображения;

$K, \sigma_1, T_{ц}$ – коэффициент использования потока излучения от объекта-цели, постоянная Стефана-Больцмана и температура наблюдаемого объекта-цели;

$q_{ин}, \Delta f$ – площадь приемника излучения (ПИ) и ширина полосы пропускания усилителя прибора обнаружения объекта-цели;

$\Delta Z(\cdot)$ – окно наблюдаемого излучения от объекта-цели;

D^* – обнаружительная способность ИК прибора (в ОЭЛС) БКУ.

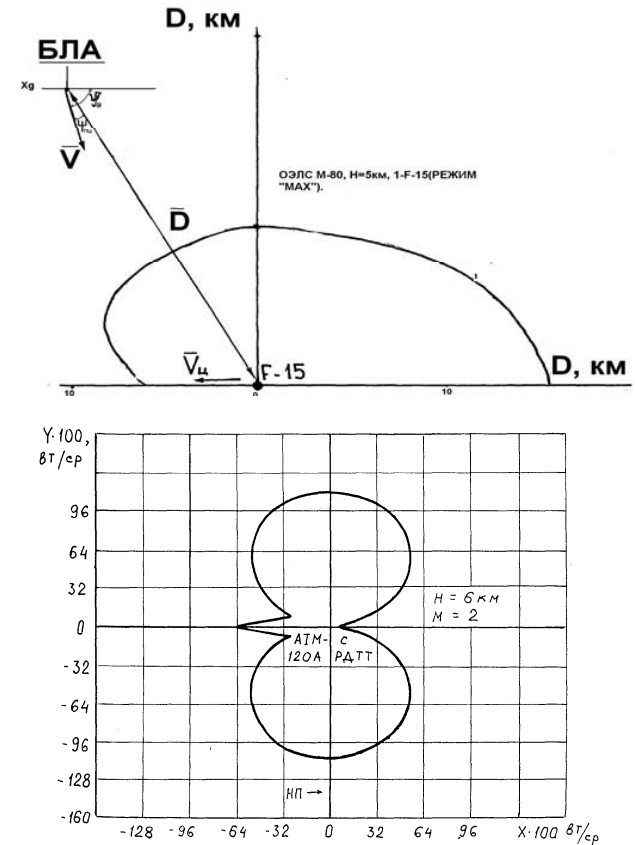


Рис.2. Расчетные зависимости дальности захвата ИК прибора БЛА объекта типа F15 и индикатриса излучения высокоманевренного БЛА АИМ-120А в ИУС

В приведенной выше расчетной формуле определенные трудности вызывает расчет коэффициента использования потока излучения K , который находим из выражения

$$K = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} ((M_{ελ}) / (M_{ελmax})) S_{λ} \tau_a dλ / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (M_{ελ}) / (M_{ελmax}) dλ \quad (5)$$

в котором значения $M_{ελ}$ – спектральная плотность энергетической светимости объекта-цели; $S_{λ}, \tau_a$ – спектральная чувствительность ПИ в модели ОЭЛС высокоманевренного БЛА и коэффициент пропускания атмосферой излучения наблюдаемого объекта-цели [6].

Для практических подсчетов коэффициента K ИУС БКУ предлагается использовать в БЦВМ зависимости массива экспонент $\exp K^*(\mu) = f(\exp K^*(\mu))$ [6].

Математическая модель для исследования и расчета показателя распознавания образов-сигналов от объекта-цели в ИУС БКУ перспективных БЛА достаточно описана в работах [5,6], поэтому данный показатель в этой работе будем считать известным.

Метод решения задачи параметрической оптимизации ИУС в структурах БКУ

Выбор метода исследования в оптимизационных задачах динамических систем является ответственным этапом для разработчика [1,2]. На данный период развития авиационной техники [5] широко используются при решении задач идентификации и оптимизации различных динамических систем автоматизированные процедуры НСП (схема решения задачи оптимизации модели СЗО процедурами НСП показана на рис.3). В задачах структурно-параметрической оптимизации динамических систем процедурами НСП принята функция потерь [2]

$$\ell(Y, Y_T) = \begin{cases} \ell_1, & \text{при } \bar{\theta}(Y, Y_T); \\ 0, & \text{при } \theta(Y, Y_T), \end{cases} \quad (6)$$

в которой ℓ_1 – величина потерь; Y_T – требуемый вектор выходных сигналов ОСЗ; Y – реальный выходной сигнал системы; $\theta(Y, Y_T)$ – событие, состоящее в том, что при данной конкретной реализации входного сигнала X ИУС реализация выходного сигнала Y удовлетворяет требованию близости к желаемому (требуемому ЛПР) Y_T .

Условное среднее значение функции потерь (6) будет равно [2]

$$M[\ell(Y, Y_T)|S_c] = \ell_1 [1 - P(\theta(Y, Y_T)|S_c)], \quad (7)$$

где $P(\theta(Y, Y_T)|S_c)$ – вероятность события $\theta(Y, Y_T)$ при данных фиксированных значениях элементов управляющей матрицы S_c , связанной с управляющими звеньями системы.

За критерий оптимальности в структурно-параметрической оптимизации ИУС динамической системы процедурами НСП принимается минимальное условное среднее значение функции потерь (6). Из (7) видно, что при любых значениях ℓ_1 справедливо [2, 5]

$$\rho(S_o) = M[\ell(Y, Y_T)|S_o] = \max_{S_c \in \Omega_c} P(\theta(Y, Y_T)|S_c), \quad (8)$$

где S_o – оптимальная управляющая матрица;

Ω_c – допустимая область поиска.

В соответствии с критерием (8) оптимизации системы процедурами НСП называется критерием максимума вероятности события θ , которое отображает цель задачи оптимизации в (3). Критерий (8) является достаточно универсальным при параметрической оптимизации детерминированных и стохастических (линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных) систем и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к системе [2].

В результате решения задачи оптимизации динамической системы процедурами НСП определяются оптимальные значения для параметров S_o в СЗО, удовлетворяющие критерию максимума вероятности события $\theta(Y, Y_T)$, непосредственно связанные условием захвата

объекта-цели [2,5]. Два основных определяющих условия, обеспечивающие максимальную эффективность случайного поиска процедурами НСП в совместной оптимизации параметров и решений (модели для параметров S_{c1} и модели для СЗО A_v) в принятой модели ИУС БКУ, запишем как [2, 5, 6]

$$\begin{aligned} \forall S_{c1} \in \Omega_1, \forall A_v \in \Omega_2 : f(S_{c1} | A_v) &= \\ &= f_\theta(S_{c1} | \theta(Y, Y_T), A_v); \\ \forall A_v \in \Omega_2 : P(A_v) &= P(A_v | \theta(Y, Y_T)). \end{aligned} \quad (9)$$

При этом свидетельством возможности повышения эффективности поиска может быть нарушение хотя бы одного из этих равенств. Процесс адаптации ненаправленного случайного поиска основан на сближении функции $f(S_{c1} | A_v)$ с $f_\theta(S_{c1} | \theta(Y, Y_T), A_v; n)$ и вероятностей $P(A_v)$ с вероятностями $P(A_v | \theta(Y, Y_T))$, ($v = \overline{1, N_p}$); основой для такого сближения будет следующее выражение:

$$\begin{aligned} f(S_{c1} | A_v; n+1) &= f_\theta(S_{c1} | \theta(Y, Y_T), A_v; n); \\ P(A_v; n+1) &= P(A_v | \theta(Y, Y_T); n). \end{aligned} \quad (10)$$

Практически в задачах оптимизации моделей СЗО используются условия [2,5]

$$\begin{aligned} m_c = (A_v; n+1) &= m_\theta(A_v; n); \\ K_c = (A_v; n+1) &= K_\theta(A_v; n), \end{aligned}$$

в которых $m_c = (A_v; n+1)$ – условное апостериорное математическое ожидание

$$m_c = (A_v; n+1) = \int_{\Omega_2} S_{c1} f(S_{c1} | A_v; n+1) dS_{c1}; \quad (11)$$

$m_\theta = (A_v; n)$ – условное априорное математическое ожидание

$$m_\theta = (A_v; n) = \int_{\Omega_1} S_{c1} f_\theta(S_{c1} | \theta(Y, Y_T), A_v; n) dS_{c1}; \quad (12)$$

$K_c = (A_v; n+1)$ – условная апостериорная корреляционная матрица

$$\begin{aligned} K_c = (A_v; n+1) &= \int_{\Omega_1} [S_{c1} - m_c(A_v; n+1)] \times \\ &\times [S_{c1} - m_c(A_v; n+1)]^T f(S_{c1} | A_v; n+1) dS_{c1}; \end{aligned}$$

$K_\theta = (A_v; n)$ – условная априорная корреляционная матрица

$$\begin{aligned} K_\theta = (A_v; n) &= \int_{\Omega_1} [S_{c1} - m_\theta(A_v; n)] \times \\ &\times [S_{c1} - m_\theta(A_v; n)]^T f_\theta(S_{c1} | \theta(Y, Y_T), A_v; n) dS_{c1}; \end{aligned} \quad (13)$$

где Ω_1, Ω_2 – области всех возможных параметров и решений исследуемой системы.

Матрица апостериорных значений параметров системы в общем случае формируется как

$$\begin{aligned} S_{c1}(A_v; n+1) &= m_s(A_v; n+1) + \Gamma(A_v; n+1)S_{\Gamma 1}; \\ (v = \overline{1, N_p}), \end{aligned} \quad (14)$$

в которой $S_{\Gamma 1}$ – матрица случайных величин с равными

нулю математическими ожиданиями и единичными дисперсиями (отображение модели см. на рис.3)

$$m_c = (A_v; n + 1) = m_\theta(A_v; n); \quad (15)$$

$$\Gamma(A_v; n + 1)\Gamma^T(A_v; n + 1) = K_\theta(A_v; n),$$

где Γ – треугольная матрица коэффициентов, получаемых путем решения уравнений вида

$$\sum_{p=1}^j \gamma_{ip}(A_v; n + 1)\gamma_{ip}(A_v; n + 1) = K_{ij}^{(0)}(A_v; n);$$

$$\gamma_{ip}(A_v; n + 1) = 0 \rightarrow j > i(v = \overline{1, N_p}).$$

Обобщенная схема ненаправленного случайного поиска оптимальных параметров и решений в моделях ИУС БКУ в многофункциональных КБЛА показана на рис.3.

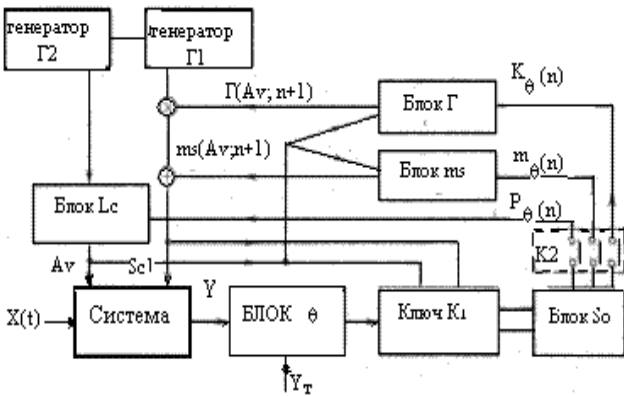


Рис.3. Схема решения задачи оптимизации модели СЗО процедурами НСП

Проведение имитационного моделирования ИУС в структурах БКУ

Модели и программа предназначены для определения методом статистических испытаний дальности обнаружения, распознавания и захвата N_z объектов-целей, активной радиолокационной системой с заданной вероятностью, прикрываемых N_p постановщиками помех (ПП) из вынесенной точки при различной мощности ПП и тактической ситуации (принимаемые условия применения ИУС в БКУ) [3,6].

Идентификаторы моделирования радиолокационного канала СЗО объектов БКУ

Для выполнения расчетов в блок-программу вводятся следующие исходные данные:

$D_k, D_{ц}, D_{nn}$ – модули векторов дальности целей, ПП (м);

$V_k, V_{ц}, V_{nn}$ – модули векторов скорости координатора, целей, ПП (м/с);

S_{MO} – математическое ожидание ЭПР (m^2);

D_A, S_A – диаметр и эффективная площадь антенны (м, m^2);

L – длина волны зондирующего сигнала (м);

P – средняя мощность передатчика (Вт);

G, G_n – коэффициенты направленного действия антенн и передатчика ПП;

N – спектральная плотность мощности шумового сигнала (Вт/Гц);

$T_s, T_{\text{бто}}$ – постоянные времени формирующих фильтров (с);

Q – параметр скважности зондирующего сигнала;

P_z – вероятность захвата объекта-цели в структуре ИУС.

Математическое описание имитационной модели СЗО в структурах БКУ

В алгоритмы случайного поиска включены следующие основные компоненты [6,9]:

Модель определения кинематических рассогласований источника отраженного сигнала и источника шумового сигнала помехи относительно оси пеленгатора объекта-цели описывается в программном средстве ИУС как

$$R_{iji} = R_{iji} + V_{iji} \Delta t, \quad i = \overline{1, N_z};$$

$$R_{nijk} = R_{nijk} + V_{nijk} \Delta t, \quad k = \overline{1, N_p};$$

$$R_{kji} = R_{kji} + V_{kji}, \quad i = \overline{1, 3};$$

$$R_{kzji} = R_{kzji} - R_{njk}, \quad R_{knjk} = R_{njk} - R_{kji};$$

$$\Delta_{uzi} = R_{kzi3} / R_{kzi1}; \quad \Delta_{uyi} = R_{kzi2} / R_{kzi1};$$

$$\Delta_{m2k} = R_{knk,3} / R_{knk,1}; \quad \Delta_{myk} = R_{knk,2} / R_{knk,1}.$$

Модель определения угловых отклонений направления прихода когерентного сигнала от направления максимума парциальной диаграммы направленности (ДН) описывается в программном комплексе ИУС уравнениями вида

$$Q_{1ui(nnk)} = \sqrt{(\Delta_{ui(nnk)} y - Q_o)^2 + (\Delta_{ui(nnk)} - Q_o)^2};$$

$$Q_{2ui(nnk)} = \sqrt{(\Delta_{ui(nnk)} y - Q_o)^2 + (\Delta_{ui(nnk)} + Q_o)^2};$$

$$Q_{3ui(nnk)} = \sqrt{(\Delta_{ui(nnk)} y + Q_o)^2 + (\Delta_{ui(nnk)} + Q_o)^2};$$

$$Q_{4ui(nnk)} = \sqrt{(\Delta_{ui(nnk)} y + Q_o)^2 + (\Delta_{ui(nnk)} - Q_o)^2}.$$

Модель для парциальной ДН по напряжению описывается функцией [9]

$$F(Q) = \frac{\sin \frac{\pi D_A Q}{\lambda}}{\frac{\pi D_A Q}{\lambda}}.$$

Суммарная ДН для отраженного сигнала от объекта-цели и сигнала помехи определяется четырьмя парциальными ДН по формуле

$$F_{\Sigma i(nn)} = \sum_{i=1}^n F_i(Q).$$

Радиолокационные сигналы в ИУС БКУ моделиру-

ются известным методом для комплексной огибающей [6].

В соответствии с данным методом модуль огибающей определяется из формулы

$$U_{\Sigma} = \frac{\sqrt{P \cdot G \cdot S_{\text{ц}} \cdot S_A}}{4\pi R_{\text{к-ц}}^2} F_{\Sigma_{\text{ц}}},$$

где: $S_{\text{ц}}$ – флуктуирующая ЭПР объекта-цели, описывается экспоненциальной функцией распределения плотностей вероятности, которая в достаточной степени исследована в работах [3,9].

Сигнал, формируемый энергией активного ПП для суммарного канала в имитационном моделировании структур ИУС, определяется следующим выражением:

$$U_{\Sigma_{\text{м}}} = \frac{\sqrt{N \cdot G_{\text{н}} \cdot S_A \cdot \Delta F_{\text{с}}}}{\sqrt{\pi \cdot 4 \cdot R_{\text{к-ц}}^2}} F_{\Sigma_{\text{м}}}.$$

Захват объекта-цели в программе определяется по индикаторной функции $C(H)$, как превышение некоторого порога H , определяемого отношением отраженного сигнала от цели и суммы внутреннего шума приемника и сигнала ПП на входе приемника как

$$H = \frac{U_{\Sigma}^2}{U_{\text{шн}}^2 + U_{\Sigma}^2}; \quad C(H) = \begin{cases} 1, & H > H_{\text{кр}}; \\ 0, & H \leq H_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (16)$$

Управляющим вектором в решении исходной задачи параметрической оптимизации процедурами НСП для выбранной модели системы захвата БКУ БЛА является

$$S_{\text{с}} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ T \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Требуется оптимизировать управляющий вектор вида

$$S_{\text{о}} = \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

При решении задачи оптимизации ИУС определяется область поиска $\Omega_{\text{с}}^0$ для априорных значений вектора $S_{\text{с}}$, которая содержит и оптимальный вектор $S_{\text{о}} \rightarrow S_0 \in \Omega_{\text{с}}^0$ (область $\Omega_{\text{с}}^0$ является начальной при поиске параметров процедурами НСП выбранной модели СЗО $A_{\text{в}}$ в БКУ). Априорное распределение управляющего вектора $S_{\text{с}}$ для значений моментов в имитационной модели ИУС структур БКУ задавалось как [2]

$$M_{S_0} = \begin{pmatrix} m_{s1} \\ m_{s2} \\ m_{s3} \end{pmatrix}; \quad K_{S_0} = \begin{pmatrix} D_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & D_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & D_{s3} \end{pmatrix}.$$

Наблюдение значений для оптимального вектора $S_{\text{о}}$ в имитационном моделировании процесса захвата объекта-цели происходило при $D_{\text{макс}} = 10\text{км}$; $\Psi_{\text{макс}} = 60\text{град}$; $V_{\text{ц}} = 100\text{м/с}$; $V_{\text{н}} = 100\text{м/с}$; $D_{\text{мин}} = 8\text{км}$; $\alpha = 2,5\text{град}$, $n_{\text{ц}} = 2\text{ед}$; $T_3 = 0,1\text{с}$; $K_3 = 4,8$; $G_1 = 1,7 \cdot 10^{-4}\text{рад}^2$; $G_2 = 1,1 \cdot 10^{-6}\text{В}^2$;

$d\Psi_{\text{макс}}/dt = 0,15\text{ рад/с}$. На рис. 4 графически отображен процесс автоматизированной «настройки» управляющего вектора в имитационном моделировании и решения задачи оптимизации параметров принятой модели СЗО БКУ в контуре управления процедурами случайного поиска НСП.

Решение задачи оптимизации параметров модели СЗО в разработанной авторской компьютеризированной среде имитационного моделирования БКУ (получено в НИР «Комплекс - 1» ИПУ РАН), уже при $n = 30$ сеансах наблюдалась устойчивость процесса случайного поиска оптимальных параметров вариантов значений моментов (см. рис.4)

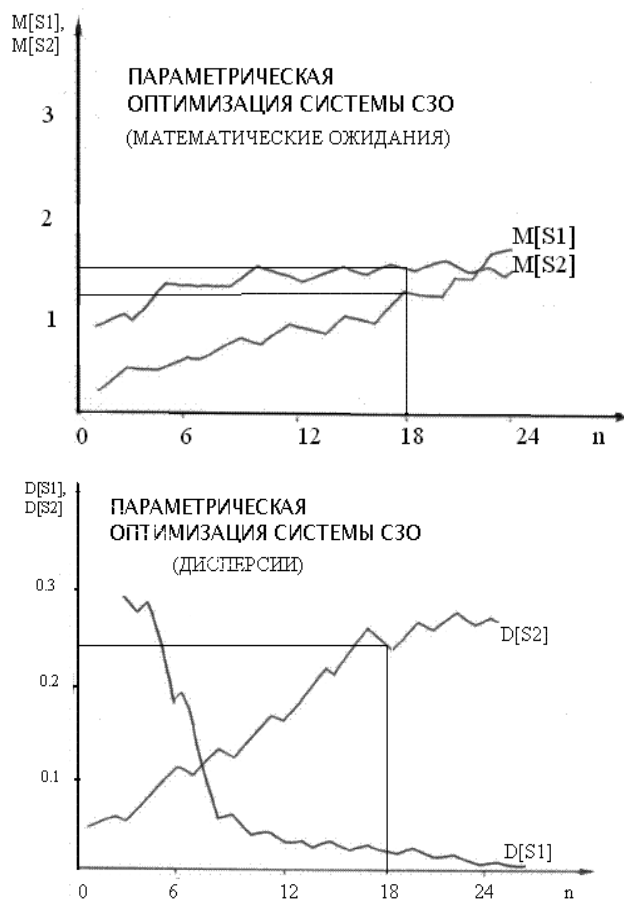


Рис.4. Схематизация процесса случайного поиска параметров в СЗО БКУ

Окончанием случайного поиска процедурами НСП в автоматизированной среде принята мера приращения матрицы математических ожиданий параметров в модели СЗО

$$\frac{1}{n_p} \sum_{i=0}^{n_p} \left| \frac{H_{n_y-i} - H_{n_y-i-1}}{H_{n_y-i}} \right| \leq C^*,$$

где H_{n_y-1} – норма матрицы M на n_{y-1} -м сеансе поиска; n_p – интервал усреднения;

C^* – заданное число, характеризующее стационарность процесса случайного поиска.

На рис.5 показаны результаты имитационного моделирования процесса наведения БЛА на объект-цель с определением основного показателя – вероятности захвата цели СЗО в зависимости от времени и интенсивности белого шума Q . Устойчивость процесса захвата объекта-цели в БКУ наблюдается в течение 1сек радиолокационного канала СЗО.

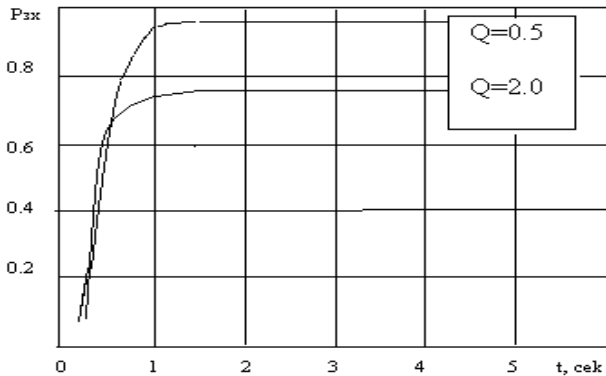


Рис.5. Результаты имитационного моделирования процесса захвата объекта СЗО

Заключение

Результатом случайного поиска значений оптимальных параметров в модели системы захвата объекта-цели ИУС являлось устойчивость их наблюдаемых значений на каждом успешном сеансе поиска уже после 18 реализаций, что свидетельствует о правильном определении априорных границ области поиска Ω_c^0 . Априорная об-

ласть поиска, как правило, задается из физических соображений ЛППР и является экспертно-эвристической, что влияет на длительность и устойчивость процесса случайного поиска. Определение априорных границ нахождения параметров и выбор адекватной математической модели системы оказывает существенное влияние на весь процесс задачи параметрической оптимизации и скорости ее решения. Наряду с оптимизацией управляющих параметров в модели СЗО, автоматизированные процедуры НСП позволяют выбирать и управляющие звенья (соответствующие решения, связанные с выбором альтернативных моделей из БД). Предлагаемая схема совместной оптимизации параметров и решений процедурами НСП бортового комплекса управления БЛА [1,2,5] приведена на рис.3, находящаяся в общем контуре технологического управления разработкой перспективных объектов КБЛА (рис.1). Компьютерный информационно-управляющий комплекс принятия решений на основе аналитико-имитационных моделей КБЛА и адаптивных процедур НСП могут дать не только оптимальные решения, но и указать на меру конкурентноспособности по сравнению с другими решениями (проектами моделей новых систем и их подсистем). Не включенные в событие θ требования учитываются при формировании окончательного мнения о решениях модельного синтеза и проектировании ЛППР. Аналогичный подход в оптимизации математических моделей на ранней стадии предпроектных испытаний создаваемых объектов КБЛА предлагается и для других имитаторов подсистем [1,2,5,6].

Литература

1. Кульба В.В., Микрин Е.Н., Павлов Б.В., Платонов В.Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов. // Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.-М.: Наука, 2006.-579с.
2. Казаков И.Е., Гладков Д.И. Методы оптимизации стохастических систем. -М.: Наука, 1987.
3. Полтавский А.В. Модель адаптивной системы управления беспилотным ЛА по крену и тангажу // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. №130. С.167-171.
4. Полтавский А.В. Управление безопасностью движения БЛА // Датчики и системы. 2008. №9. С. 4-8.
5. Полтавский А.В. Метод и алгоритмы структурного синтеза системы с переменной структурой // Двойные технологии. 2008. №4. С.50-55.
6. Полтавский А.В. Модель измерительной системы в управлении БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009 №10. С.73-77.

Материал поступил в редакцию 29. 11. 2012 г.