

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

А. В. Полтавский¹, А. А. Тюгашев², Н. К. Юрков³

¹ Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ avp57avp@yandex.ru, ² tau797@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегодня наблюдается очередной исторический всплеск для разработок беспилотных летательных аппаратов и моделей для объектов беспилотных авиационных систем. Данные передовые разработки являются инновационными в области беспилотной авиации, они интенсивно развиваются, достаточно стремительно меняют свою структуру и вид, а также совершенствуются блоки для различных систем управления и наведения с расширением функций аппаратно-программного обеспечения, которые связаны непосредственно с выполнением основной функциональной задачи. Как правило, в составе основных блоков для звеньев систем наведения находятся объекты информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), которые также являются составной частью для системы автоматического управления в БЛА. *Материалы и методы.* Необходимость получения объективной оценки технического уровня для этих систем, именно на ранних этапах проектирования, решения ряда задач анализа по подготовке принятия управленческих решений ЛПП приводит разработчиков к более полному учету их оценок с характеристиками и параметрами. Следует отметить, что в печати, научных работах и др., также наблюдается всплеск интересов и всевозможных подходов к решению таких задач, в частности, по выбору структуры и параметров ИИУС. У каждого из этих подходов, методов и моделей к оценкам объектов для ИИУС свои преимущества и свои недостатки, в то же время любое подобное исследование должно подкрепляться экспериментом, как правило, вычислительным. Среди этих методов и множества разных подходов, особенно по структурно-параметрической оптимизации нелинейных, нестационарных и стохастических моделей объектов ИИУС, к сожалению, работ мало. *Результаты и выводы.* В данной статье рассматривается один из подходов к решению структурно-параметрической оптимизации моделей объектов для информационно-измерительной и управляющей системы ИИУС в составе блоков системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом. Подход основан на комплексном использовании алгоритмов имитационного (и компьютерного) моделирования с применением аппарата статистического синтеза и анализа стохастических систем переменной структуры.

Ключевые слова: информационная конструкция, моделирование, система, технический уровень, комплекс беспилотных летательных аппаратов, оптимизация, показатели качества, критерии

Для цитирования: Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 44–55. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-6

OPTIMIZATION OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AN UNMANNED AIRCRAFT

A.V. Poltavskiy¹, A.A. Tyugashev², N.K. Yurkov³

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Samara State Technical University, Samara, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ avp57avp@yandex.ru, ² tau797@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Today, there is another historical surge in the development of unmanned aerial vehicles and many models for unmanned aircraft systems. These developments are advanced in the field of unmanned aviation, they are rapidly changing their structure and appearance, as well as blocks for control and guidance systems with hardware and software for them, which are directly related to the performance of the main task. As a rule, the main

blocks for the guidance systems links contain objects of information-measuring and control systems (IIUS), which are also an integral part of the automatic control system in the UAV. *Materials and methods.* The need to obtain an objective assessment for these systems, namely at the early stages of design, the solution of a number of tasks for analysis for the preparation of management decisions of the LPR, leads developers to a more complete account of their assessments with characteristics and parameters. It should be noted that in the press, scientific papers, etc., there is also a surge of interests and various approaches to solving such problems, in particular, on the choice of the structure and parameters of the IIUS. Each of these approaches and methods for evaluating object models for IIUS has its own advantages and disadvantages, at the same time, any such research should be supported by an experiment, usually computational. Unfortunately, there are few works among these methods and approaches, especially on the structural-parametric optimization of nonlinear, non-stationary and stochastic models of IIUS objects. *Results and conclusions.* This article considers one of the approaches to the solutions of structural-parametric optimization of object models for the information-measuring and control system of the IIUS as part of the units of the automatic control system of an unmanned aerial vehicle. The approach is based on the complex use of simulation (and computer) modeling algorithms for statistical synthesis and analysis of stochastic systems of variable structure.

Keywords: information design, modeling, system, technical level, complex of unmanned aerial vehicles, optimization, quality indicators, criteria

For citation: Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):44–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-6

Введение

В работе рассматривается подход к идентификации и оптимизации моделей для объектов ИИУС в составе блоков системы автоматического управления (САУ) беспилотного воздушного судна (БВС–БЛА) на основе сравнения (сличения) реального выходного сигнала Y с сигналом, который требуется Y_T . По существу, это означает то, что в основу исследований и оптимизации процессов положены признаки, связанные непосредственно с функционированием системы. Следовательно, за качество системы здесь принимается ее эффективность, точнее, условная эффективность. В состав блоков модели и принимаемых ограничений (условий) включаются требования к процессу формирования Y . Требуемый сигнал вида Y_T задается из объективных возможностей (и принимаемых ограничений) и целевого назначения для разрабатываемой системы, как желаемый сигнал Y_T может быть эталоном (т.е. базовым сигналом). Формально связь входного X и выходного Y сигналов производится с помощью некоторого оператора системы ИИУС, обозначим его $A(Y, X; t)$ [1, 2]:

$$Y = A(Y, X; t)X.$$

Информационная система из моделей объектов ИИУС в составе блоков САУ имеет многоуровневое и иерархическое управление (как подчиненность нижестоящих подсистем вышестоящим – характерная особенность иерархии), которое подчинено для достижения главной цели, поставленной перед всей системой. В заданных границах моделирования каждая подсистема и каждый элемент проявляют локальную независимость. Видно, что при заданных характеристиках входного сигнала X характеристики выходного сигнала Y полностью определяются оператором связи $A(Y, X; t)$. При заданных характеристиках Y_T показатель качества системы (как мера близости) будет изменяться при изменении оператора $A(Y, X; t)$, т.е. в заданных условиях работы и при выдвигении требований к системе управлять ее качеством можно осуществлять с помощью оператора $A(Y, X; t)$. Видоизменить информационную конструкцию $A(Y, X; t)$ можно путем замены некоторых управляющих звеньев в ИИУС, которые будем характеризовать управляющей матрицей S_c . Физически элементами матрицы S_c могут быть или численные значения некоторых параметров, или события. Подчеркивая зависимость выходного сигнала системы ИИУС от управляющей матрицы, запишем информационную конструкцию

$$Y(S_c) = A(Y, X, S_c; t)X.$$

Основная задача, стоящая перед объектами для модели ИИУС (и для САУ в БЛА), – управление качеством (сближение Y и Y_T). Чтобы придать отклонениям Y от Y_T свойство измеримости, будем пользоваться функцией потерь $\ell(Y, Y_T)$. Задавая назначение системы Y_T оптимизационным критерием

$$\min \rho = \min M[\ell(Y, Y_T)],$$

могут быть сформулированы ограничения (условия), которые обеспечивают физическую осуществимость оптимальной системы управления БЛА. Оптимизация системы связана с сравнительным анализом для ρ , что потребует проведения многократных опытов, если опытом в компьютерном моделировании назвать совокупность из действий, в результате которых для данной реализации входного сигнала $X(t)$ ставится в соответствие одна реализация выходного сигнала $Y(t)$. Как известно, для опыта нужна реальная система ИИУС и САУ БЛА или адекватная процессам ее модель. Опыт с реальной системой становится целесообразным тогда, когда принципиально необходимо учесть основные конструктивные, а также энергетические и некоторые эксплуатационные особенности системы. Как правило, целью таких подобных опытов является доводка уже готовой системы до состояния наилучшего в смысле принятого критерия качества. Опыты с моделями являются более доступными, более экономичными, а иногда и единственно возможными. К преимуществам моделирования относится также и то, что при этом создается возможность контроля непосредственно за каждым элементом процесса любой сложности. Процесс моделирования ИИУС состоит в создании целой цепочки: системы–аналога и среды–аналога. В основу построения моделей ИИУС и САУ для БЛА, а также описания возможных условий их работы положены «идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях для оригинала и самой модели» [3–5].

Постановка задачи

Описание подхода оптимизации моделей объектов ИИУС БЛА в следующем. Пусть задана динамическая система – ИИУС, на вход которой случайным образом действуют входные сигналы $X_1(U_1; t), X_2(U_2; t), \dots, X_r(U_r; t)$. Сами функции $X_\mu(U_\mu; t)$, ($\mu = \overline{1, r}$) являются случайными функциями времени, а векторные случайные величины U_r характеризуют возможную регулярность функций $X_r(U_r; t)$ (в частном случае функции $X_r(U_r)$ могут и не зависеть от времени). Свойства системы зависят от блочной управляющей матрицы S_c :

$$S_c = \begin{pmatrix} S_{c_1} \\ S_{c_2} \end{pmatrix},$$

где элементами $S_v^{(1)} (v = \overline{1, N_s})$ матрицы $S_{c_1} = \begin{pmatrix} S_1^{(1)} \\ S_2^{(1)} \\ \vdots \\ S_{N_s}^{(1)} \end{pmatrix}$ являются параметры управляющих звеньев системы. Матрица

$$S_{c_2} = \begin{pmatrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \\ \vdots \\ C_M^{(2)} \end{pmatrix}$$

с элементами $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$ – сложные события, они отвечают следующим требованиям:

$$\prod_{i=1}^M C_i^{(2)} = C, P(C) = 1, \sum_{j_i=1}^{n_i} C_{ij_i}^{(2)} = C_i^{(2)}; \prod_{j_i=1}^{n_i} C_{ij_i}^{(2)} = \emptyset; P(\emptyset) = 0 \text{ и } \sum_{j_i=1}^{n_i} P(C_{ij_i}^{(2)}) = 1.$$

Первое требование свидетельствует о совместности событий $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$, второе о том, что каждое из событий $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$ является сложным, а третьему требованию соответствует несов-

местность событий $C_{j_i}^{(2)}(j_i = \overline{1, n_i})$, четвертое говорит о полной группе событий $C_{j_i}^{(2)}(j_i = \overline{1, n_i})$. Задача системы в том, чтобы обеспечить максимум события

$$\theta = \sum_{\mu=1}^r \theta_{\mu}, \quad (1)$$

в котором θ_{μ} – несовместные события, состоящие в выполнении всей совокупности требований, предъявляемых к системе при появлении входных сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. Учитывая несовместность событий θ_{μ} , получим формулу

$$P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}). \quad (2)$$

Данную задачу, связанную с оптимизацией системы, можно решить путем выбора из всех возможных элементов для матрицы S_c , т.е. тех элементов, при которых $S_c = S_o$ [6]:

$$P(\theta) = P(\theta/S_o) = \max. \quad (3)$$

Если зафиксировать таким образом матрицу $S_c = S_o$, то система в среднем по всем сигналам $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ будет обеспечивать максимум вероятности $P(\theta/S_c)$, а сама система при этом будет иметь постоянную структуру. Эффективность по критерию максимального значения вероятности и выполнения требований $P(\theta)$, связанную непосредственно с появлением входного сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ в ИИУС, можно повысить, если в состав ее блоков включить распознающее устройство (прежде всего, алгоритмы и программы), способное отличать входные сигналы $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ непосредственно друг от друга [6]. Покажем это.

При фиксированной матрице $S_c = S_o$ вероятность $P(\theta/S_o) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}/S_o)$, при этом нет еще уверенности, что каждый член из суммы в выражении принимает максимально возможное значение. Само значение $P(\theta)$ может возрасти, если $P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}/S_{\mu_o})$, где $P(\theta_{\mu}/S_{\mu_o})$ – максимально возможная вероятность для события θ при появлении μ -го сигнала на входе системы и оптимальных для данного сигнала значений $S_c = S_{\mu_o}$. Сама же система будет иметь переменную структуру (рис. 1).

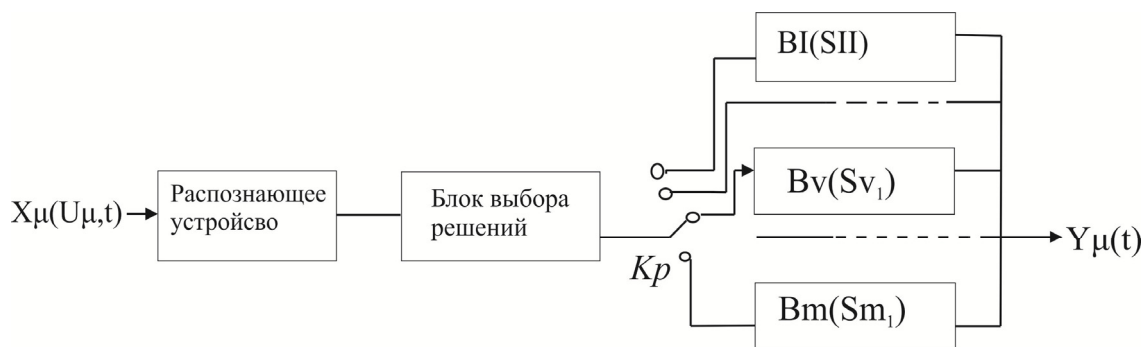


Рис. 1. Схематизация модели системы с переменной структурой

На вход распознающего устройства поступает сигнал $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. В соответствии с образом этого сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ и сигналом блока выбора решений «переключающий» ключ K_p осуществляет подключение непосредственно одного из моделируемых каналов системы. Свойства каналов для ИИУС определяются оператором $B_v(S_{v_1})$, $(v = \overline{1, m})$

$$Sv_1 = \begin{pmatrix} S_{v1}^{(1)} \\ S_{v2}^{(1)} \\ \vdots \\ S_{vN_{sv}}^{(1)} \end{pmatrix},$$

в котором v -е фиксированное значение матрицы S_{c_1} .

Далее рассматриваем идеальный случай, когда распознающее устройство и блок для выбора решений работают без ошибок (условно). Требуется определить $S_{\mu_0} (\mu = \overline{1, r})$, т.е. здесь требуется определить оптимальное решение (как оптимальную матрицу S_{c_2}) и оптимальные параметры подключенного в результате принятого решения канала ИИУС (оптимальную матрицу S_{c_1}) при условии, что на информационный вход действуют сигналы $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$, $(\mu = \overline{1, r})$. Критерием качества в оптимизации будем считать максимум вероятности $P(\theta) = \max [7-9]$.

Решение задачи поиска сигнала в моделях блоков ИИУС

Для решения данной задачи в компьютеризированной среде воспользуемся методом неградиентного случайного поиска (НСП) Д. И. Гладкова. Рассмотрим систему (см. рис. 1). Здесь сама матрица S_{c_2} имеет в качестве своих составных элементов сложные события $C_1^{(2)}$ и $C_2^{(2)}$. На одном из уровней системы ИИУС (примем первый уровень) происходит распознавание сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. При этом фиксируются следующие события: $C_{11}^{(2)}$ – на вход действует сигнал $X_1(U_1, t)$; $C_{12}^{(2)}$ – на вход системы действует сигнал $X_2(U_2; t)$; ..., $C_{1r}^{(2)}$ – на вход системы действует сигнал $X_r(U_r; t)$. На втором уровне системы алгоритмом принимаются решения о подключении определенного канала. При этом здесь происходят следующие события, определяющие состояние системы:

$C_{21}^{(2)}$ – подключен первый канал $B_1(S_{11})$; $C_{22}^{(2)}$ – подключен второй канал $B_2(S_{21})$;

...

$C_{2v}^{(2)}$ – подключен v -й канал $B_v(S_{v_1})$; $C_{2m}^{(2)}$ – подключен m -й канал $B_m(S_{m_1})$.

Матрица S_{c_2} имеет вид

$$S_{c_2} = \begin{pmatrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Свойства матрицы S_{c_2} будут характеризоваться с помощью формулы

$$A_{\mu v} = C_{1\mu}^{(2)} \cdot C_{2v}^{(2)}, \tag{5}$$

где $C_{1\mu} (\mu = \overline{1, r})$ – события, определяющие образ входного сигнала; C_{2v} – события, определяющие состояние системы ($v = \overline{1, m}$). Присутствие одного элемента от каждой строки матрицы (4) обязательно. Это обстоятельство вытекает из требования о совместимости событий $C_i^{(2)} (i = 1, 2)$. В свою очередь, каждое событие $A_{\mu v}$ определяет одно из возможных фиксированных состояний матрицы S_{c_2} . В процессе поиска все элементы для матрицы S_{c_2} будут случайными. При фиксированном состоянии матрицы $S_{c_2} \Rightarrow \Xi_{c_2}$ случайные элементы заменяются их реализациями. Случайность для элементов $C_{12}^{(2)}, \dots, C_{1r}^{(2)}$ определяется по соответствующим входным сигналам в ИИУС. Реализация для элементов $C_{11}^{(2)}, \dots, C_{1\mu}^{(2)}$ определяется алгоритмами поиска процедурами. Рассматривая управляющую матрицу S_{c_2} и событие θ_{μ} , напомним, что плотности будут

$$P(A_{\mu v}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}) P(\theta_{\mu} / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_{\mu}) P(A_{\mu v} / \theta_{\mu}) f_{\theta}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_{\mu}), \tag{6}$$

где $P(A_{\mu\nu})$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$; $f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu})$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} при фиксированном состоянии матрицы Ξ_{c_2} ; $P(\theta_r / A_{\mu\nu}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu / \Xi_c)$ – вероятность события θ_μ , при фиксации матрицы Ξ_c ; $P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$, при условии, что имеет место событие θ_μ ; $f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} при фиксированном состоянии Ξ_{c_2} и при условии, что имеет место сложное событие θ_μ . Из вышеприведенного равенства находим такое выражение:

$$P(\theta_\mu / A_{\mu\nu}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu) \frac{P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu) f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu)}{P(A_{\mu\nu}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu})}.$$

Так как сама вероятность $P(\theta_\mu)$ не зависит от событий $A_{\mu\nu}$ и значений элементов матрицы Ξ_{c_1} , можно утверждать, что максимальному значению для вероятности

$$P(\theta_\mu / A_{\mu\nu}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu / S_{\mu_o})$$

соответствует наибольший из максимумов рассматриваемых функций, т.е.

$$F_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; \Xi_{c_1}) = \frac{P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu) f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu)}{P(A_{\mu\nu}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu})}.$$

Отсюда следует, что при организации случайного поиска без самообучения в блоке для апостериорной информации необходимо формировать функции $f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu)$, $P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu)$, а также находить $Sup_{A_{\mu\nu}} extr_{\Xi_{c_1}} F_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; \Xi_{c_1})$, а поиск с самообучением следует организовать на основе

$$\begin{cases} P(A_{\mu\nu} n+1) = P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu; n), \\ f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; n+1) = f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu; n), \end{cases}$$

где $P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu; n)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$ на n -м сеансе поиска, при условии, что имело место событие θ_μ ; $P(A_{\mu\nu}; n+1)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$ на следующем $(n+1)$ -м сеансе поиска, $f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_\mu; n)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} на n -м сеансе случайного поиска, при условии, что уже произошли события θ_μ и $A_{\mu\nu}$; $f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; n+1)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} на $(n+1)$ -м сеансе поиска при фиксированном событии $A_{\mu\nu}$. Далее вероятностные характеристики, относящиеся к n -му сеансу поиска, называются апостериорными, а к $(n+1)$ -му сеансу поиска – априорными. Практически имеем выражения к построению алгоритма в информационной конструкции:

$$\begin{cases} M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) = M_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu}; n), \\ K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) = K_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu}; n), \end{cases}$$

где $M_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu}; n)$ – апостериорная матрица математических ожиданий, $K_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu}; n)$ – апостериорная матрица корреляционных моментов связи для параметров управляющих звеньев объектов ИИУС, при которых имело место событие θ_μ ; $M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$, $K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$ – априорные матрицы математических ожиданий и корреляционных моментов связи параметров управляющих звеньев системы. Матрица параметров в программном средстве формируется по следующим правилам:

$$\Xi_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) = M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) + \Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1) \Xi_{r_2}, \quad (\mu = \overline{1, r}; \nu = \overline{1, m}),$$

где $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$ – треугольная матрица с элементами, функционально связанными с элементами матрицы $K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$.

$$\text{Матрица } \Xi_{\Gamma_2}: M[\Xi_{\Gamma_2}] = 0; K_{\Gamma_2} = M[\Xi_{\Gamma_2} \quad \Xi'_{\Gamma_2}] = E; E \in R(0;1).$$

Теперь покажем схему (рис. 2) для организации поиска процедурами НСП с самообучением. В блоки (Γ и M_{c_1}) информационной конструкции непосредственно поступает вся апостериорная информация. На их выходы пропускаются (в зависимости от события $A_{\mu\nu}$) только значения для элементов матриц $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$ и $M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$, в информационный блок для $L_{\mu\nu}$ поступает значение для вероятности $P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu)$. При этом корректируется длина из каждой части для μ -го единичного отрезка (условно принятого в модели отрезка, длина которого равна единице) в соответствии с условием

$$L_{\mu\nu}(n+1) = P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu; n), \tag{7}$$

где $P(A_{\mu\nu} / \theta_\mu; n)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$, при условии, что имело место событие θ_μ , определяемое в процессе информационного поиска.

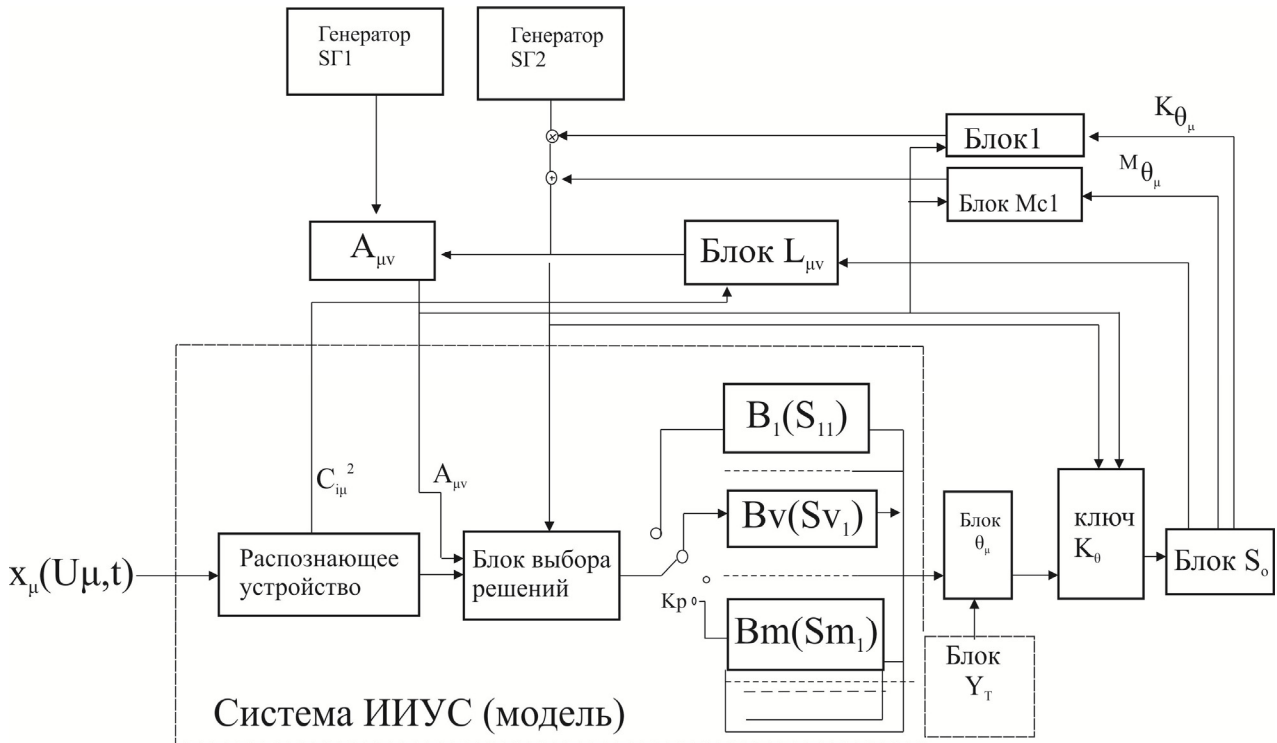


Рис. 2. Схематизация структуры для оптимизации системы с самообучением

Таким образом, сам процесс случайного поиска в модели ИИУС производится при следующей последовательности. В соответствии с сигналом $X_\mu(U_\mu; t)$, поступающим на вход системы, распознающее устройство фиксирует событие $C_{\mu}^{(2)}$. Сам сигнал $C_{\mu}^{(2)}$ поступает в блок $L_{\mu\nu}$, где непосредственно находятся r единичных отрезков, каждый из которых «разбит» на t частей в соответствии с формулой (7). Моделируемый в блоке $L_{\mu\nu}$ μ -й отрезок далее поступает в блок $A_{\mu\nu}$. Генератор-датчик S_{Γ_1} , который представляет собой встроенный датчик для псевдослучайных чисел, воспроизводит случайную величину, распределенную по закону вида

$$f(\Xi_{\Gamma_1}) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < \Xi_{\Gamma_1} < 1, \\ 0 & \text{при } \Xi_{\Gamma_1} < 0; \Xi_{\Gamma_1} > 1. \end{cases}$$

Далее в информационном блоке $A_{\mu v}$ происходит определение, на какую именно часть для μ -го отрезка непосредственно попала случайная величина Ξ_{Γ_1} . Попадание величины на v -ю часть μ -го отрезка означает, что есть факт фиксации для события $A_{\mu v}$. В соответствии с этим событием блок выбора решений подключает v -й канал. Генератор Ξ_{Γ_2} формирует реализацию из значений матрицы Ξ_{Γ_2} . На выходе из информационного блока наблюдается сигнал $Y_{\mu v}(t) = B_v[\Xi_{v1}, X_{\mu}(U; t)]$. Далее в блоке сличения для θ_{μ} происходит его сравнение с сигналом, требуемым (или эталона) $Y_{T_{\mu}}(t)$. Если требования удовлетворены, срабатывает управляющий ключ K_{θ} и в блок для S_o поступают значения для элементов управляющей матрицы Ξ_c , соответствующие сеансу поиска. Если известна вероятность P_{μ} появления входных сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$, то факт для события $A_{\mu v}$ можно установить с помощью одного единичного отрезка. Этот отрезок (рис. 3), как отмечено, разделен на r частей, а длина L_{μ} μ -й части от отрезка равна вероятности $P_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$. Попадание случайной величины Ξ_{Γ_1} на виртуальный отрезок L_{μ} будет свидетельствовать о появлении на входе ИИУС входного сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. Сам же такой виртуальный отрезок $L_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$ делится на m отрезков $L_{\mu v}(\nu = \overline{1, m})$ с целью удовлетворения формулы

$$\frac{L_{\mu v}}{L_{\mu}} = P(A_{\mu v} / \theta_{\mu}). \quad (8)$$

Величина $L_{\mu} = P_{\mu}$, а величину $L_{\mu v}$ можно определить следующим образом:

$$L_{\mu v}(n+1) = L_{\mu} P(A_{\mu v} / \theta_{\mu}; n) \quad (9)$$

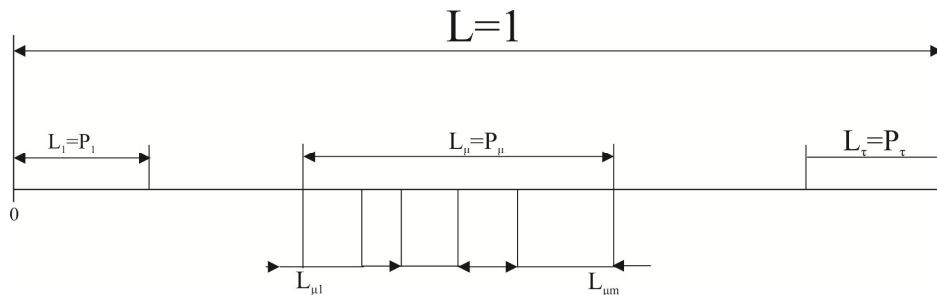


Рис. 3. Схематизация виртуального единичного отрезка в моделировании

Далее происходит следующее. В алгоритмах по идентификации ИИУС попадание случайной величины Ξ_{Γ_1} на виртуальный отрезок $L_{\mu v}$ свидетельствует о том, что имело место событие $A_{\mu v}$, а окончанием случайного поиска принята мера приращения матрицы математических ожиданий для параметров моделируемой системы [10, 11]:

$$\frac{1}{n_p} \sum_{i=0}^{n_p} \frac{|H_{n_{y-i}} - H_{n_{y-i-1}}|}{H_{n_{y-i}}} \leq \varepsilon_p, \quad (10)$$

где $H_{n_{y-i}}$ – норма матрицы M_{θ} на n_{y-i} -м сеансе поиска; n_p – интервал усреднения; ε_p – заданное число, определяющее меру для приращения матрицы M_{θ} , характеризующее стационарность процесса поиска. При оптимизации решений стационарность процесса поиска также является сигналом к окончанию поиска. При неустановившемся режиме поиска оптимальные решения в компьютерной среде будут находиться по формуле

$$\frac{P(A_{\mu v} / \theta_{\mu})}{P(A_{\mu v})}. \quad (11)$$

Оценкой оптимальных значений параметров объектов ИИУС при симметричной апостериорной плотности вероятности $f_{\theta}(\Xi_{c_1} / \theta_{\mu})$ является следующее выражение:

$$S_{\mu\nu_0} = M[\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_{\mu}]. \quad (12)$$

Результатом поиска лучшей модели в ИИУС являются оптимальные решения $a_{\mu\nu_0}$ для каждого вида из входных сигналов. Вместе с тем одновременно определяются оптимальные значения параметров управляющих звеньев ИИУС в составе блоков САУ $S_{\mu\nu_0}$, которые вводятся, а затем непосредственно фиксируются в программе (рис. 4).

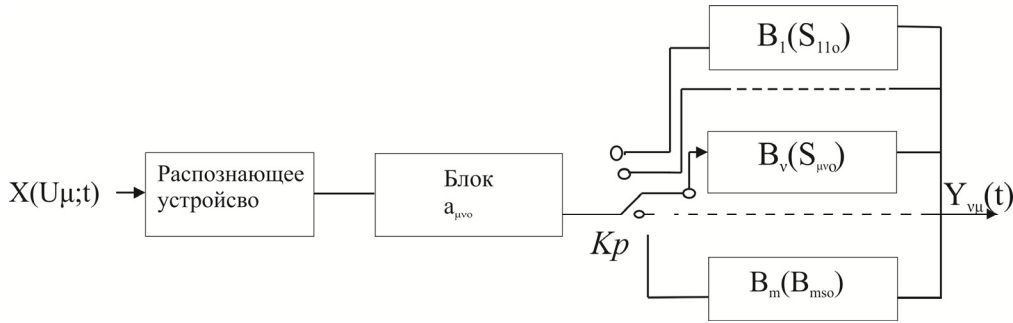


Рис. 4. Вид схемы после оптимизации модели ИИУС в составе блоков САУ информационной конструкции беспилотного воздушного судна

Схематично модель системы ИИУС представим в общем контуре системы наведения беспилотного воздушного судна (рис. 5), она построена на принципах открытости архитектуры с возможностями наращивания дополнительных блоков в имитационной (компьютерной) общей информационной модели [12, 13].

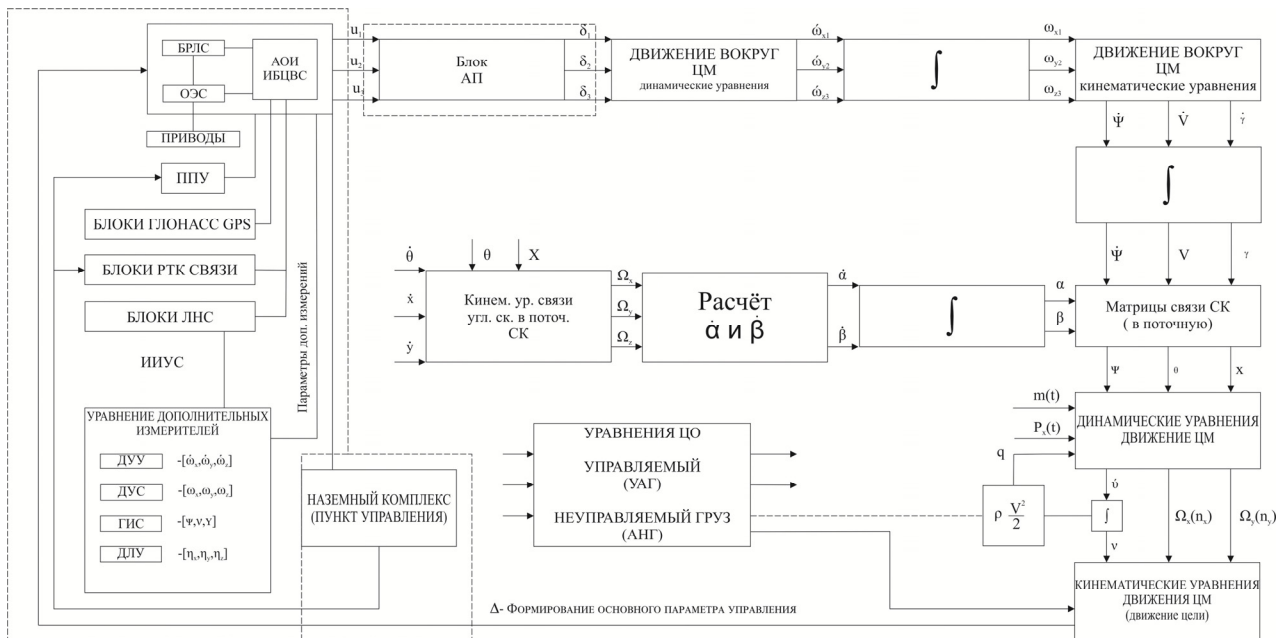


Рис. 5. Схематизация модели ИИУС в составе блоков информационной конструкции беспилотного воздушного судна

Заключение

Современные информационные технологии и разработки объектов информационных конструкций направлены, прежде всего, на комплексирование задач, методов, моделей и алгоритмов

к многокритериальному оцениванию показателей качества и технического уровня объектов ИИУС с целью выбора возможных альтернатив. Они также предлагают различные подходы к идентификации объектов в БАС. Известные положения из теории исследования операций [14] предполагают комплексный набор – ряд из методов и способов для формирования единого критерия $J(\cdot)$ ИИУС как набора частных критериев J_i . Метод введения ограничений в информационной конструкции на выходные параметры в форме их «свертки» позволяет решать многие задачи анализа и оптимизации. Преобразование задачи оптимизации с ограничениями в задачу оптимизации без ограничений путем изменения целевой функции является базисом и основой для целой группы методов, часто еще называемых методами штрафных функций. Алгоритмы поиска лучших параметров и решений (особенно на ранней стадии их предварительного анализа, проектирования и испытаний многофункциональных БЛА) объектов ИИУС в информационной конструкции методом НСП наряду с известными методами экспертных оценок могут дать не только оптимальные решения выбора для систем и объектов современным БЛА, а также указать на меру их конкурентоспособности в соответствии с принятым условием для критерия, формируемого из целого набора показателей качества и функциональной эффективности. Создание сложной информационной конструкции с основными блоками ИИУС для компьютеризированных информационно-аналитических систем, как правило, двойного назначения и двойных технологий позволяет выработать более объективные решения при построении современных систем наведения беспилотных воздушных судов. Особенно важно, что данный подход к оптимизации систем навигации может дополняться основными компонентами из технологий [9, 10] геоинформационных систем. В настоящее время различные ГИС-технологии также интенсивно развиваются, особенно это видно при построении современных информационных моделей и различных объектов беспилотных транспортных систем.

Список литературы

1. Казаков И. Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний. М. : Наука, 1975. 354 с.
2. Казаков И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. М. : Наука, 1977. 416 с.
3. Казаков И. Е., Гладков Д. И. Методы оптимизации стохастических систем. М. : Наука, 1987.
4. Гладков Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М. : Энергоатомиздат, 1984. 256 с.
5. Полтавский А. В., Бурба А. А., Макаров В. В., Маклаков В. В. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов / под ред. Е. Я. Рубиновича. М. : ИПУ РАН, 2015. 204 с.
6. Полтавский А. В., Семенов С. С., Бурба А. А., Нгуен Зуи Фьонг. Информационные процессы в технике: моделирование систем и объектов многофункциональных робототехнических комплексов беспилотной авиации / под ред. В. М. Вишневого. Королев : АО «ПСТМ», 2019. 404 с.
7. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
8. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Саркисян С. А., Ахундов В. М., Минаев Э. С. Анализ и прогноз развития больших технических систем. М. : Наука, 1983. 280 с.
11. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модификация модели системы управления подвижным объектом // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 65–69.
12. Майоров А. А., Матерухин А. В. Геоинформационные аспекты разработки информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных сенсоров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 6. С. 106–109.
13. Вилкас Э. Й., Майминас Е. З. Решения: теория, информация, моделирование. М. : Радио и связь, 1981. 68 с.
14. Юрков Н. К., Согомонян К. Э. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотные летательные аппараты // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 315–317.

References

1. Kazakov I.E. *Statisticheskaya teoriya sistem upravleniya v prostranstve sostoyaniy = Statistical theory of control systems in the state space*. Moscow: Nauka, 1975:354. (In Russ.)
2. Kazakov I.E. *Statisticheskaya dinamika sistem s peremennoy strukturoy = Statistical dynamics of systems with variable structure*. Moscow: Nauka, 1977:416. (In Russ.)

3. Kazakov I.E., Gladkov D.I. *Metody optimizatsii stokhasticheskikh system = Methods of optimization of stochastic systems*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)
4. Gladkov D.I. *Optimizatsiya sistem negradientnym sluchaynym poiskom = Optimization of systems by non-gradient random search*. Moscow: Energoatomizdat, 1984:256. (In Russ.)
5. Poltavskiy A.V., Burba A.A., Makarov V.V., Maklakov V.V. *Mnogofunktsional'nye komplekсы bespilotnykh letatel'nykh apparatov = Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles*. Moscow: IPU RAN, 2015:204. (In Russ.)
6. Poltavskiy A.V., Semenov S.S., Burba A.A., Nguen Zui Fyong. *Informatsionnye protsessy v tekhnike: modelirovanie sistem i ob'ektov mnogofunktsional'nykh robototekhnicheskikh kompleksov bespilotnoy aviatsii = Information processes in engineering: modeling of systems and objects of multifunctional robotic complexes of unmanned aircraft*. Korolev: AO «PSTM», 2019:404. (In Russ.)
7. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile object using examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Selection of automated workplace operators by a multifunctional complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Sarkisyan S.A., Akhundov V.M., Minaev E.S. *Analiz i prognoz razvitiya bol'shikh tekhnicheskikh system = Analysis and forecast of the development of large technical systems*. Moscow: Nauka, 1983:280. (In Russ.)
11. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Modification of the mobile object control system model. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2014;(1):65–69. (In Russ.)
12. Mayorov A.A., Materukhin A.V. Geoinformation aspects of the development of information and measurement systems based on distributed networks of intelligent sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'emka = News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2017;(6):106–109. (In Russ.)
13. Vilkas E.Y., Mayminas E.Z. *Resheniya: teoriya, informatsiya, modelirovanie = Solutions: theory, information, modeling*. Moscow: Radio i svyaz', 1981:68. (In Russ.)
14. Yurkov N.K., Sogomonyan K.E. The effect of ultrashort pulses of electromagnetic radiation on unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;2:315–317. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Полтавский

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Андрей Александрович Тюгашев

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры вычислительной техники,
Самарский государственный технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: tau797@mail.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Aleksandr V. Poltavskiy

Doctor of technical sciences, leading researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems
of the Russian Academy of Sciences
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Andrey A. Tyugashev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of computer technology,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 08.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021

Принята к публикации/Accepted 11.11.2021