

© Полтавский А.В., БурбаА.А.
Poltavskiy A., Burba A.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**MODELING OF OBJECTIVES OF THE INFORMATION
AND CONTROLLING SYSTEMS OF UNMANNED AIR VEHICLES**

Аннотация. В статье приведены основные модели объектов, включенные в проект формирования облика многофункциональных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

Annotation. In the article common objects models are provided that are included in the project of the construction of an appearance of the multifunctional complexes of unmanned air vehicles.

Ключевые слова. Моделирование, задача, информационно-управляющая система, беспилотный летательный аппарат.

Key words. Modeling, task information and an escape system, an unmanned aerial vehicle.

С учетом выбранных методов системного анализа и теории исследования операций разработка математических и имитационных моделей комплексов беспилотных летательных аппаратов (КБЛА), учитывая особенности использования БЛА, должна основываться на следующих основных принципах построения сложной системы [1]:

- по архитектуре построения система должна быть открытой, т.е. обеспечивать наращивание своих возможностей путем включения в свою структуру разнородных структурных элементов, в том числе и из других структурных подразделений с минимальными затратами времени и ресурсов на обработку взаимодействия;
- по формированию структур во времени и пространстве она должна быть динамичной и иметь две части – постоянную и переменную.

Постоянная часть (базовая) функционирует всегда, почти независимо от состава переменной части. Переменная часть формируется под конкретную задачу, и ее состав должен определяться характером задачи. Создание системы основывается на компьютерном использовании других подсистем на конкретных направлениях, ее примерная структура приведена на рис. 1.

Информационная система осуществляет постоянный мониторинг (создает информационное поле) для последующего принятия решений, при этом она интегрируется в глобальную спутниковую систему и является, с одной стороны, резервной и дублирующей, с другой – альтернативной. Основной состав системы – БЛА-разведчики, ретрансляторы, маяки и др. Дополнительный состав определяется кругом дополнительных задач. Управление осуществляется с пунктов управления (ПУ),

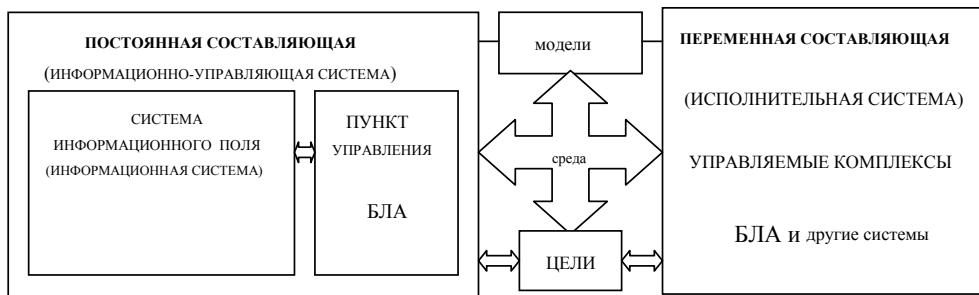


Рис. 1. Комплексы с БЛА – сложная система с полусвободной структурой

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

Бурба Александр Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, соискатель ученой степени доктора технических наук, ИПУ РАН.

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

Burba Alexander – Ph.D., senior scientist, doctor of science degree seekers, Institute of control sciences of RAS.

которые могут быть воздушными (космическими), наземными (подземными), надводными (подводными), автоматическими и автоматизированными. Анализ тенденций в мировом развитии БЛА [2] показывает, что основным направлением здесь является создание комплексов воздушной разведки различного класса, причем самое широкое развитие и распространение начинают получать комплексы с малыми БЛА, предназначенные для задач наблюдения (рис.2).

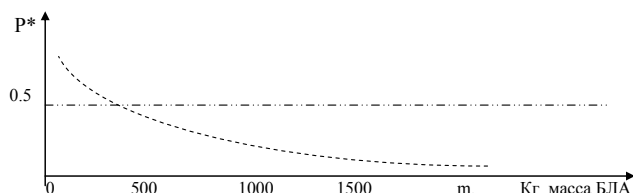


Рис. 2. Частота применения КБЛА в целях разведки

Исполнительная система рассматривается как более варьируемая часть, и состав ее определяется более широким спектром задач. Она может включать как БЛА (ударные, демонстративные, подавления средств противовоздушной обороны (ПВО) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ), разового и многократного применения), так и другие виды ЛА, которые по определенным показателям способны более эффективно решить поставленные задачи (например, уничтожение группы террористов, доставка груза в район радиационного заражения, борьба со стихией и т.д.). В состав исполнительной системы можно включить и другие важные объекты, а также подсистемы для решения народнохозяйственных проблем.

Вышеперечисленные особенности позволяют классифицировать систему по функциональному предназначению как информационно-разведывательную адаптивную, ударную, интегрированную с переменной структурой [1].

В связи особенностями приведенной структуры системы система управления представляет собой двухуровневую систему. На верхнем уровне функционирует объединенный командный пункт управления, на втором этаже (среднем уровне) – совокупность пространственных как в функциональных, так и в пространственном положении пунктов управления (ПУ) подсистем (с реализацией современных сетевых технологий).

Отсюда следует, что ожидаемое применение рассматриваемой системы на основе комплексов БЛА предполагает достижение следующих результатов:

1) обеспечивается устойчивая длительная информационная поддержка исполнительной системы в различных условиях;

2) создаются условия для структурного маневра силами и средствами (возможность быстрого сосредоточения необходимых средств на критичных направлениях);

3) обеспечивается экономия сил и средств при гарантированном решении поставленной задачи.

Математические модели рассматриваемых систем построены по модульному иерархическому принципу и включает в свой состав: группу БЛА (разведки и мониторинга, ретрансляторы, постановки помех (ПП), демонстрации и подавления ПВО); модель ПУ; объекты воздействия (цели); модели-аналоги среды и предполагаемых угроз (случайных и организованных факторов). На низшем уровне каждый блок имеет также иерархическую структуру, например, в модель многоцелевого БЛА включены основные подсистемы: прицельно-навигационная система (ПНС); система радиоэлектронного оборудования и связи; двигательные установки; планер; система взлета-посадки; БЦВМ; комплекс авиационного вооружения (КАВ) (см. рис.3). В свою очередь, объекты КАВ дополняют установки, авиационные средства поражения (АСП), системы обнаружения, прицеливания и целеуказания (СЦУ), систему управления оружием (СУО), сигнальные ракеты и ложные тепловые цели (ЛТЦ) комплекса обороны БЛА.

Приведем в качестве примера модель управляемого авиационного средства поражения (УАСП).

Математическая модель УАСП (высокоманевренного БЛА) включает уравнения движения центра масс ЛА, относительно центра масс и уравнения, описывающие систему управления. Последние делятся на уравнения измерителя – активной радиолокационной головки самонаведения (АРГС), фильтра, сигналов управления по оценкам с фильтра, автопилота с его измерителями и рулевым приводом, двигательной установки и системы подрыва боевой части (БЧ). Модель движения ЛА – система уравнений в инерциальной системе координат (СК)

$$\begin{aligned} d\bar{R} &= \bar{V} dt; & \bar{R}(t_0) &= \bar{R}_0; \\ d\bar{V} &= \bar{W} dt; & \bar{V}(t_0) &= \bar{V}_0; \\ d\bar{W} &= (A_{gv}[\bar{U}]) dt; & \bar{W}(t_0) &= \bar{W}_0. \end{aligned} \quad (1)$$

При решении уравнений (1) вектор ускорения $[\bar{W}]$ определяется через проекции вектора ускорения на оси поточной СК \bar{W}_v . Пересчет его значений осуществляется с помощью матрицы перехода от поточной к инерциальной системе координат (ИСК) – A_{gv} , которая постоянно корректируется в процессе счета по информации о вычисляемой или задаваемой параметром угловой скорости вращения поточной СК. Таким же образом осуществляется вычисление матрицы перехода от связан-

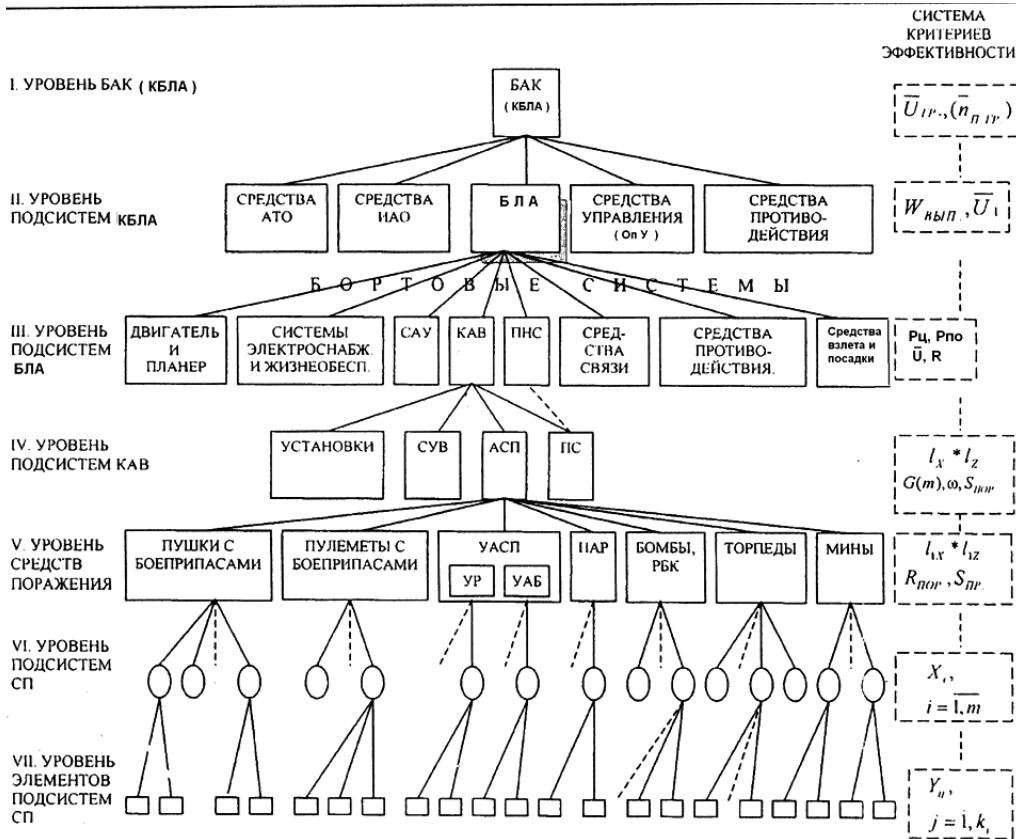


Рис. 3. Структура моделей объектов КБЛА для решения многоцелевых задач

ной СК УАСП к ИСК A_{gx1} через известную угловую скорость вращения УАСП. С помощью стандартных подпрограмм векторно-матричных преобразований формируется матрица перехода от СК измерителя к ИСК – A_{gl} вычисляются углы пеленга координатора цели (КЦ)

$$\bar{U} = [\bar{W} + \bar{W}_u]; \quad \bar{W}_U = [\bar{W}_{ux}, \bar{W}_{uy}, \bar{W}_{uz}]^T,$$

ускорение W_{ux} , действующее по оси X в поточной СК, изменяет модуль скорости $|\bar{V}|$

$$W_{ux} = \dot{V} = [P_x - (C_{x0} + C_{xi} \cdot \alpha_{II}^2) \rho S_k V^2 / 2] / m,$$

где C_{x0}, C_{xi} – аэродинамические коэффициенты УАСП (высокоманевренного БЛА);

S_k, P_x, m – площадь крыла, тяга двигателя и масса УАСП;

ρ, α, β – плотность воздуха, углы атаки и скольжения объекта ЛА.

Управляющие ускорения W_{uy}, W_{yz} связаны с углами α и β , величины которых, в свою очередь, зависят от углов отклонения рулей δ_y и δ_z в соответствующих плоскостях управления. Система связей, формирующих W_{uy} , имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{uy} &= V (a_4 \alpha - a_5 \delta_y); \\ \dot{\alpha} &= \omega_{z1} - (a_4 \alpha - a_5 \delta_y); \\ \dot{\omega}_{z1} &= a_3 \delta_y - a_1 \omega_{z1} - a_2 \alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_y &= \begin{cases} +\delta_y^*, & |\delta_y| < \delta_m; \\ 0, & |\delta_y| \geq \delta_m, \quad \delta_y \delta_y^* \geq 0; \\ +\delta_y^*, & |\delta_y| \geq \delta_m, \quad \delta_y \delta_y^* < 0; \end{cases} \\ \delta_y^* &= \begin{cases} \dot{\delta}_1, & |\dot{\delta}_1| < \delta_m; \\ \dot{\delta}_m \operatorname{sgn} \dot{\delta}_1, & |\dot{\delta}_1| \geq \delta_m; \end{cases} \\ \dot{\delta}_1 &= K_\delta (K_\delta \dot{\delta}_T - \delta_y - K_\omega \omega_{z1}); \\ \delta_T &= \begin{cases} \delta, & |\delta| < \delta_{Tm}; \\ \delta_{Tm} \operatorname{sgn} \delta, & |\delta| \geq \delta_{Tm}; \end{cases} \\ \dot{\delta} &= K_1 (T_1 \Delta \dot{W}_y + \Delta W_y) - K_3 \delta_T; \\ \Delta W_T &= W_{Ty} - W_T - K_z \omega_z^*; \\ \dot{\omega}_z^* &= T_2 \dot{\omega}_z + \omega_z - K_4 \omega_z^*; \\ W_{Ty}^* &= \begin{cases} W_{Ty}, & |W_{Ty}| < W_{Tm}; \\ W_{Tm} \operatorname{sgn} W_{Ty}, & |W_{Ty}| \geq W_{Tm}, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где a_1, \dots, a_5 – аэродинамические коэффициенты ЛА;

K_1, \dots, T_2 – соответствующие коэффициенты и параметры автопилота;

$\delta_m, \dot{\delta}_m, \dots, W_{Tm}$ – ограничения по углу, угловой скорости рулей и максимальному ускорению.

Система связей, формирующих управление W_{uz} , имеет аналогичный вид. При формировании W_{uy}, W_{uz}

как видно, учитываются как ограничения по мощности приводов управления, так и ограничения по положению управляющих органов.

Формирование требуемого ускорения движения центра масс УАСП производится в блоке формирования управляющих сигналов (БФУС) по информации (оценкам) о координатах, скорости, ускорении цели и УАСП в ИНС [2]:

$$\begin{aligned} [\hat{D}_{II}] &= [\hat{R}_{II}] - [\hat{R}]; \\ [\hat{V}_r] &= [\hat{V}_{II}] - [\hat{V}]; \\ [\hat{\omega}_D]_I &= A_{gr} (|[\hat{D}_{II}]| / (|[\hat{D}_{II}]| \times |\hat{V}_r|)); \\ [\hat{W}_{Tr}] &= K_\lambda (|\hat{V}_r| \hat{\omega}_D) + K_{II} \hat{W}_{II}. \end{aligned}$$

Уравнениями алгоритма обработки информации (АОИ) в БЦВМ будут

$$\begin{aligned} [\hat{R}_{II}] &= [\hat{V}_{II}] + K_r ([\bar{Z}] - [\hat{R}_{II}]); \\ [\hat{R}_{II}(t_{no})] &= [\hat{R}_{II0}]; \\ [\hat{V}_{II}] &= [\hat{W}_{II}] + K_v ([\bar{Z}] - [\hat{R}_{II}]); \\ [\hat{V}_{II}(t_{no})] &= [\hat{V}_{II0}]; \\ [\hat{W}_{II}] &= -[\hat{W}_{II}] / T_{II} + K_w ([\bar{Z}] - [\hat{R}_{II}]); \\ [\hat{W}_{II}(t_{no})] &= [\hat{W}_{II0}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты фильтра K_r, K_v, K_w определяются из уравнений Риккати (для одной плоскости) или находятся путем параметрической оптимизации методом неградиентного случайного поиска (НСП). Уравнения Риккати (для плоскости) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{11} &= 2P_{12} - (P_{11} \cdot P_{11}) / Q; \\ \dot{P}_{12} &= P_{22} - P_{13} - (P_{11} \cdot P_{12}) / Q; \\ \dot{P}_{13} &= P_{23} - (P_{11} \cdot P_{13}) / Q - P_{13} / T_u; \\ \dot{P}_{22} &= 2P_{23} - (P_{12} \cdot P_{12}) / Q; \\ \dot{P}_{23} &= P_{33} - (P_{12} \cdot P_{13}) / Q - P_{23} / T_u; \\ \dot{P}_{33} &= -2P_{33} / T_u - \\ &\quad - (P_{13} \cdot P_{13}) / Q + G / (T_u \cdot T_u); \\ P_{11}(t_0) &= \theta_{11}; P_{12}(t_0) = \theta_{12}; \\ P_{13}(t_0) &= \theta_{13}; P_{22}(t_0) = \theta_{22}; \\ P_{23}(t_0) &= \theta_{23}; P_{33}(t_0) = \theta_{33}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_{11} \dots P_{33}$ – моменты ошибок оценивания вектора состояния модели движения;

$P_{11}(t_0), \dots, P_{33}(t_0)$ – начальные моменты. В установившемся состоянии значения коэффициентов имеют вид

$$\begin{aligned} K_r &= P_{11} / Q; K_v = K_r^2 / 2; \\ K_w &= K_r^4 / (8(K_r + 1 / T_{II})), \end{aligned}$$

где P_{11} - установившееся значение дисперсии ошибки оценки.

Математическая модель активной радиолокационной головки самонаведения (АРГС) представляет собой моноимпульсный пеленгатор цели с суммарно-разностной обработкой сигнала и имеет два канала со-

провождения цели: по скорости сближения (доплеровская частота) и по угловым координатам и включает следующие составные блоки автоматизированной информационно-управляющей системе (АИУС):

- модель радиолокационных сигналов;
- модель углового датчика (информация по углам о цели);
- модель суммарно-разностного преобразователя сигналов;
- модель срыва слежения и повторного захвата.

Модель АРГС является составной частью основного измерителя – следящего координатора цели (КЦ).

Аналогичным образом построены модели движения и управления БЛА, дополненные системой связи, взлета и посадки, двигательными установками и мобильным пунктом управления (МПУ). Модель угроз включает детерминированную (постоянную) и случайную составляющие. К наиболее вероятным угрозам следует отнести противодействие ПВО, безопасность полетов и действие окружающей среды [2].

ПВО противника считается одним из важных видов боевого обеспечения войск, она предусматривает защиту войск и объектов от ударов авиации и беспилотных средств. ПВО включает разведку воздушного противника и оповещение о нем, боевое применение ЗУР, зенитной артиллерии (ЗА), истребительной авиации, борьбу с РЭБ. Динамичный характер современных операций не выявляет стандартной организации системы ПВО, тем не менее с учетом последних конфликтов при создании модели были включены основные блоки ПВО – РЛС обнаружения, целеуказания и слежения за целью, ЗУР (например, "Си-AMRAAM", "Хок", "Стингер", "Пэтриот"), которые обеспечивают прикрытие одиночного объекта – цели, заданной в уравнениях вида

$$\begin{aligned} [\dot{\bar{R}}_{II}] &= [\bar{V}_{II}]; & [\bar{R}_{II}(t_0)] &= [\bar{R}_{II0}]; \\ [\dot{\bar{V}}_{II}] &= [\bar{W}_{II}]; & [\bar{V}_{II}(t_0)] &= [\bar{V}_{II0}]; \\ [\dot{\bar{W}}_{II}] &= A_{grv} [\bar{U}_{II}]; & [\bar{W}_{II}(t_0)] &= [\bar{W}_{II0}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Модель радиолокационной станции – РЛС ПВО имеет структуру, аналогичную РЛС БЛА, поэтому нет смысла здесь ее подробно описывать. Алгоритм обработки информации о противнике в моделировании строится по гипотезе движения БЛА и УАСП в виде

$$\begin{aligned} [\dot{\bar{R}}] &= [\bar{V}]; & [\bar{R}(t_0)] &= [\bar{R}_0]; \\ [\dot{\bar{V}}] &= [\bar{W}]; & [\bar{V}(t_0)] &= [\bar{V}_0]; \\ [\dot{\bar{W}}] &= -([\bar{W}] - \bar{N}) / T; & [\bar{W}(t_0)] &= [\bar{W}_0], \end{aligned} \quad (6)$$

где T – определяющая инерционность БЛА в создании управляющей перегрузки;

\bar{N} – векторный белый шум с $M[\bar{N}] = 0$ и матрицей интенсивности шумов диагонального вида G_w . Измеряемой величиной в имитационном моделировании является R

$$[\bar{Z}] = A_{gv} [\bar{\Delta}]_c + |[\hat{D}_b]| A_{gl} \bar{X}^o + [\bar{R}_p], \quad (7)$$

где \bar{X}^o – орт оси чувствительности диаграммы направленности антенны РЛС.

Векторы относительного положения и движения РЛС и БЛА в ИСК вычисляются согласно формулам

$$\begin{aligned} [\hat{D}_2] &= [\hat{R}] - [\bar{R}_p]; \\ [\hat{V}_{r2}] &= [\hat{V}] - [\bar{V}_p]; \\ [\hat{\omega}_{D2}] &= A_{glP} (|[\hat{D}]| \cdot (|[\hat{D}_{p-B}]| \times [\hat{V}_{r2}])). \end{aligned} \quad (8)$$

Фильтрация измерений по существу останется прежней и описывается как

$$\begin{aligned} [\dot{\hat{Y}}] &= A[\hat{Y}] + K(t)([\bar{Z}] - C[\hat{Y}]); \\ [\hat{Y}(t_0)] &= [\hat{Y}_0], \end{aligned}$$

где $[\bar{Y}]$ – вектор состояния системы;

A – известная матрица;

K – матрица коэффициентов, определяемых из уравнений Риккати или методом неградиентного случайного поиска (НСП);

$K(t) = P(t)C^T Q^{-1}$, – матрица интенсивностей белого шума N_z ;

$P(t)$ – корреляционная матрица вектора ошибки

$$[E(t)] = [\hat{Y}] - [\bar{Y}]$$

$$\begin{aligned} \dot{P} &= AP + P^T A^T + FG_y F^T - \\ &- P^T C^T Q^{-1} CP, \quad P(t_0) = \theta_{ij}. \end{aligned} \quad (9)$$

Модель алгоритма обработки информации нелинейным фильтром

Исходная модель для синтеза алгоритма в АИУС имеет следующий вид:

$$\dot{Y}(t) = f(Y, t) + W(t) \text{ – уравнения "объекта-БЛА";} \quad (10)$$

$$Z(t) = h(Y, t) + V(t) \text{ – уравнения "наблюдателя" или}$$

уравнения измерений;

$W(t), V(t)$ – "белые" гауссовы шумы с корреляционными функциями

$$Q(t)\delta(\tau), R(t)\delta(\tau), M[W(t)]\mathcal{G}^T(t+\tau) = V(t)\delta(t).$$

Уравнения для нелинейного алгоритма оценивания будут следующими:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{Y}}(t) &= f(\hat{Y}, t) + K(t)[Y(t) - h(\hat{Y}, t)]; \\ \hat{Y}(t_0) &= m\hat{Y}_0; \\ K(t) &= (PH^T + V)R^{-1}(t); \\ \dot{P} &= AP + PA^T - KRK^T; \quad P(t_0) = P_0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } A = \left. \frac{\partial f}{\partial Y} \right|_{\hat{Y}}; \quad H = A = \left. \frac{\partial h}{\partial Y} \right|_{\hat{Y}}.$$

Для повышения точности определения вектора скорости и координат БЛА с помощью фильтрации Калмана следует выписать уравнения объекта и уравнения соответствующих измерений. Уравнения объекта будут следующими:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -R^{-1}V_n \cdot \gamma + R^{-1}V_\zeta \cdot \beta + \omega_{3e}; \\ \dot{\beta} &= -R^{-1}(\Delta V_n + \lambda V_n) + \omega_{1e}; \\ \dot{\gamma} &= -R^{-1}(\Delta V_\zeta + \lambda V_\zeta) + \omega_{2e}; \\ \Delta \dot{V}_n &= g\beta + R^{-1}V_n V_z - g_n + V_\zeta \cdot \omega_{3e} + \Delta \alpha_y; \\ \Delta \dot{V}_\xi &= g\gamma + R^{-1}V_\xi V_z - g_\xi - V_\xi \cdot \omega_{3e} + \Delta \alpha_x; \\ V_x &= V_x^* - \Delta V_\xi, \quad V_y = V_y^* - \Delta V_n; \\ \dot{B} &= Q^{-1}[-V_x \sin A + V_y \cos A], \\ Q &= \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}} + h = a(1-e^2)\xi^2 h; \\ \dot{L} &= G^{-1}[V_x \cos A + V_y \sin A]\Omega, \quad G = a\xi + h; \\ \dot{A} &= G^{-1}[V_x \cos A + V_y \sin A]tgB. \end{aligned} \quad (12)$$

За модель измерений примем разницу по скоростям и координатам, соответственно

$$\Delta V_x = V_x^* - \Delta \hat{V}_\xi - \hat{G}\Omega \cos \hat{B} \cos \hat{A} - W_x^*; \quad (13)$$

$$\Delta V_y = V_y^* - \Delta \hat{V}_n - \hat{G}\Omega \cos \hat{B} \sin \hat{A} - W_y^*;$$

$$\Delta B = B_p^* - \hat{B}; \quad \Delta L = L_p^* - \hat{L}, \quad (14)$$

где W_x^*, W_y^* – путевые скорости;

B_p^*, L_p^* – измеренные широта и долгота, соответственно.

Рассогласования по координатам (ΔB и ΔL) приводим (спроектируем) к осям X и Y . Тогда в линейной форме они будут равны

$$\Delta X = -Q\Delta B \sin \hat{A} + G \cos \hat{B} \Delta L \cos \hat{A}; \quad (15)$$

$$\Delta Y = Q\Delta B \cos \hat{A} + G \cos \hat{B} \Delta L \sin \hat{A}.$$

Модель алгоритма обработки сигналов измерений от ИНС (V_x^*, V_y^*) и от радиодатчика (B_p^*, L_p^*) будет описываться следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= -R^{-1}\Delta \hat{V}_n + \hat{\omega}_{1B} + \hat{u}_2 + \kappa_1 \Delta V_y + \kappa_3 \Delta y; \\ \dot{\gamma} &= -R^{-1}\Delta \hat{V}_\xi + \hat{\omega}_{2B} + \hat{u}_3 + \kappa_1 \Delta V_x + \kappa_3 \Delta x; \\ \Delta \dot{V}_n &= g\hat{\beta} + V_x^* \omega_{3B} + \hat{u}_4 + \kappa_2 \Delta V_y + \kappa_4 \Delta y; \\ \Delta \dot{V}_\xi &= g\hat{\gamma} - V_y^* \omega_{3B} + \hat{u}_5 + \kappa_2 \Delta V_x + \kappa_4 \Delta x; \\ \hat{V}_N &= -(V_x^* - \Delta \hat{V}_\xi) \sin \hat{A} + (V_y^* - \Delta \hat{V}_n) \cos \hat{A}; \\ \hat{V}_E &= (V_x^* - \Delta \hat{V}_\xi) \cos \hat{A} + (V_y^* - \Delta \hat{V}_n) \sin \hat{A}; \\ \dot{\hat{B}} &= \hat{Q}^{-1} \hat{V}_N + \kappa_5 (B_p^* - \hat{B}); \\ \dot{\hat{L}} &= (\hat{G} \cos \hat{B})^{-1} \hat{V}_E - \Omega + \kappa_5 (L_p^* - \hat{L}); \\ \hat{\beta}_0 &= 0; \quad \hat{\gamma}_0 = 0; \quad \Delta \hat{V}_n(t_0) = \Delta \hat{V}_{n0}; \\ \Delta \hat{V}_\xi(t_0) &= \Delta \hat{V}_{\xi 0}; \\ \hat{B}(t_0) &= \hat{B}_0; \quad \hat{L}(t_0) = \hat{L}_0. \end{aligned} \quad (16)$$

Входными сигналами в алгоритм обработки информации являются

$$(V_x^*(t), V_y^*(t))_{\text{ИНС}} \text{ и } ((B_p^*, L_p^*))_{\text{РД}}. \quad (17)$$

Функции управления в фильтре АОИ определяются из уравнений вида

$$\begin{aligned} \hat{u}_2 &= \chi V_y^*; \hat{u}_3 = \chi V_x^*; \\ \hat{u}_4 &= \hat{R}^{-1} V_y^* V_y^* - g_n; \\ \hat{u}_5 &= \hat{R}^{-1} V_x^* V_y^* - g_\xi. \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициенты фильтра $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5$ определяются решением уравнений Риккати или методом НСП в ходе имитационного моделирования.

Модель ПВО противника имеет в своем составе объекты "Хок", "АИМ-120А", "Пэтриот", "Стингер". Описание модели ракеты – подобное УАСП (БЛА) функционально, но входная информация и параметры характерны конкретному образцу. Например, управление авиационной ракетой типа "АИМ-120А" имеет вид

$$\vec{U}_{\text{зр}} = K_\gamma |\dot{V}_r| \hat{\omega}_{D_{0z}} + K_\rho \hat{W}_{u_{0z}}, \quad (19)$$

где K_γ, K_ρ – коэффициенты, подлежащие оптимизации

(настройке алгоритмами НСП на условия боевого применения).

Модель человека-оператора включена в контур управления (ПУ БЛА) и представлена следующими звеньями:

$$W(P) = (1 + T_1 P) \exp(-T_2 P) / (1 + T_3 P), \quad (20)$$

где $T_1 = 0,25\text{с}$ – компенсирующая составляющая;

$T_2 = 0,05\text{с}$ – учитывает запаздывание реакции;

$T_3 = 0,1\text{с}$ – учитывает запаздывание нервно-мышечной нагрузки оператора в автоматизированной АИУС.

Модели обеспечения безопасности полетов и адаптивной системы управления БЛА опубликованы в работе [2]. Представленные системные модели многофункционального КБЛА вошли в состав информационно-измерительного комплекса полунатурного моделирования применения и оценки эффективности КБЛА в лаборатории 54 ИПУ РАН. Указанные выше модели и алгоритмы защищены патентами РФ.

Литература

1. Казаков И.Е. *Статистическая теория систем управления в пространстве состояний*. – М.: Наука, 1975.
2. Полтавский А.В. *Модель адаптивной системы управления беспилотным ЛА* // «Научный вестник МГТУ ГА», №129, 2007.
3. Полтавский А.В., Бурба А.А. *Модель атаки цели БЛА* // *Боевые комплексы БЛА (системная характеристика КБЛА)* НММ под ред. А.Н. Максимова ВВИА. М., 2005.
4. 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.-579 с.*
5. Казаков И.Е., Гладков Д.И. *Методы оптимизации стохастических систем*. – М.: Наука, 1987.

Материал поступил в редакцию 10. 09. 2012 г.