

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-СИСТЕМНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ В СИСТЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Васильев В. В.¹, Потюпкин А. Ю.², Толоконников В. А.³, Чечкин А. В.⁴

Ключевые слова: информационно-системная избыточность, беспилотный летательный аппарат, обнаружение, наблюдаемость, позиционирование, идентификация, комплексирование, база данных, база знаний, модели, показатели качества, ограничения, безопасность.

Аннотация.

Цель работы: повышение эффективности применения технических средств обнаружения, позиционирования и идентификации малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в системах обеспечения безопасности охраняемых объектов.

Метод: системный анализ и комплексирование технических средств путём формализованного выбора приемлемого варианта системы в условиях информационно-системной избыточности.

Результаты: разработана методика решения задачи выбора приемлемого варианта системы обеспечения безопасности охраняемых объектов на основе формирования ультрасистемы; разработаны базовые модели сигнального обнаружения, наблюдаемости и идентификации для рационального комплексирования средств защиты охраняемого объекта; разработана базовая структурообразующая математическая модель первичного облика комплекса обнаружения нарушителей — малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, функционально связывающая параметры местонахождения нарушителя, средств наблюдения, охраняемой зоны, наблюдаемых сигналов и измеряемых данных.

Совокупность базовых моделей с разных позиций описывает базовые соотношения входящих в комплекс параметров с учётом разных критериев качества системы. Это позволяет в условиях информационно-системной избыточности формировать комплекс средств защиты по множеству показателей качества с учётом реальных ограничений.

DOI: 10.21681/1994-1404-2022-2-49-58

Введение

Создание беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стало в последние годы быстро развивающимся направлением авиационной техники. Их номенклатура и количество непрерывно растут. Это связано с использованием новых технологий в авиационной промышленности, разработкой особо прочных конструктивных материалов, лёгких и экономичных двигателей, ми-

ниатюризацией бортового оборудования при улучшении его технических характеристик, а также появлением глобальных систем навигации, связи и управления. Вместе с тем технический прогресс в данной области имеет и теневую сторону. Это касается возможностей использования БПЛА в террористических целях [5].

БПЛА, целенаправленно запущенный по воздуху на охраняемую территорию для фото- и видеосъёмки, транспортировки внутрь или вывоза за периметр запрещённых предметов, атаки на уязвимые узлы важных охраняемых объектов путем заброса взрывных

¹ **Васильев Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-производственного испытательного центра «Арминт», г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: vv-vasiliev@yandex.ru

² **Потюпкин Александр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор Военной академии имени Петра Великого, г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: post@armint.ru

³ **Толоконников Вячеслав Алексеевич**, начальник отдела специального научно-производственного объединения «Элерон», г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: dissovet@eleron.ru

⁴ **Чечкин Александр Витальевич**, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, профессор Военной академии имени Петра Великого, профессор Финансового университета при правительстве РФ, г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: a.chechkin@mail.ru

устройств, представляет абсолютно новую, существенную угрозу.

Основу любой информационной системы наблюдения за воздушным пространством составляют радиолокационные станции, обеспечивающие обнаружение и измерение координат воздушных объектов. Наряду с ними часто используются *оптические* средства наблюдения видимого и инфракрасного диапазонов [9]. В сложных метеорологических условиях привлекают *акустические* средства.

Для решения проблемы обнаружения БПЛА разработан целый комплекс методов и технических решений на основе различных принципов получения и обработки информации в оптическом диапазоне электромагнитных волн [1, 13, 16]. Одной из задач обработки информации в оптическом диапазоне электромагнитных волн является задача выявления признаков угрожающего движения БПЛА.

Бурное развитие технологий в последние десятилетия сделало возможным появление совершенно нового класса БПЛА — малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА). Анализ основных свойств МБПЛА и возможностей их применения для совершения диверсионных действий, а также модель нарушителя с применением МБПЛА приводятся в [3, 6, 15]. Для организации успешного противодействия МБПЛА необходимо вначале решить задачу обнаружения, позиционирования и распознавания этих аппаратов в воздушном пространстве вблизи охраняемых объектов. В работах [2, 3, 10, 15, 17] проводится анализ сравнительных характеристик различных *технических средств обнаружения* (ТСО) МБПЛА, из которого следует, что в настоящее время нет какого-то одного средства, полностью решающего задачу обнаружения МБПЛА, слежения за полётом и прогнозирования опасного движения во всём диапазоне дальностей от охраняемого объекта (от 1 м до нескольких километров), высоты и скорости полёта и других факторов. При построении системы обнаружения МБПЛА в охраняемой зоне некоторых объектов необходимо также учитывать специфику этих объектов и их топологию. Причем одним техническим средством или группой однотипных средств обнаружения задачу обнаружения МБПЛА не удастся решить с должным качеством. В связи с этим возникает *проблема* комплексирования технических средств для решения *единой задачи обнаружения и позиционирования* нарушителя [14].

Требуется создание такой конфигурации совокупности технических средств, выбор таких отношений и связей между ними, разработка такого программного и математического обеспечения, которые образуют систему обнаружения с заданными показателями эффективности. Проблема решается в условиях появления множества вариантов привлечения технических и информационных средств, порождающих так называемую *информационно-системную избыточность* [12]. Следует обосновать подход к решению задачи комплексирования в этих условиях — он является общей

проблемой системного проектирования. Наряду с ним должны также решаться *правовые* вопросы организации сложных информационных комплексов и обеспечения безопасности их применения.

Содержание задачи комплексирования

Задачу комплексирования ТСО МБПЛА можно представить, используя математическое описание составляющих системы обнаружения, которыми являются модель объекта охраны, модель нарушителя, модель внешней среды, совокупность средств обнаружения и средств информационного обмена, показатели и критерии эффективности. В настоящей работе ограничимся постановкой задачи комплексирования средств обнаружения МБПЛА и анализом её решения в условиях информационно-системной избыточности.

Дано:

1. Пространственные параметры объекта охраны и прилегающей территории $\Omega = \{x, y, z\}$.
2. Распределение требуемого относительного уровня обеспечения безопасности $U = f_u(\Omega)$.
3. Модель нарушителя

$$g(t - t_0) = g_0 + g'(t - t_0) + \frac{1}{2}g''(t - t_0)^2,$$

$$\Psi = \{T_{ЛА}^\circ, \Gamma, \text{ЭПР}, P_{ак}, P_{эм}\}.$$

4. Модель внешней среды

$$T^\circ = f_T(T); P_A = f_A(T); \Theta = f_\Theta(T).$$

5. Совокупность средств обнаружения

$$S = \{S_{ак}, S_{ПРЛ}, S_{ОПТ}, S_{АРЛ}, S_{ЛАЗ}\}.$$

6. Целевая функция ζ системы защиты (СЗ) объекта охраны: $P_{обн}(g(t) \in \Omega) \geq P_{пор}$.

7. Ограничения по затратам на создание комплекса $C_{затр} \leq C_{доп}$.

Требуется:

Выбрать такой состав S и размещение технических средств системы обнаружения МБПЛА, совокупность I средств информационного обмена, систему Π принятия решения (СПР), установить такие отношения между элементами системы, которые обеспечивали бы достижение целевой функции ζ при допустимых затратах C в условиях заданных ограничений, т. е.

$$\langle S, I, \Pi \rangle \rightarrow \Sigma,$$

где $\Sigma = \{E, \Pi, \Phi, \zeta\}$; $S \in E$, $I \in E$; E — совокупность технических средств обнаружения и коммуникации; Φ — оператор, устанавливающий отношения между элементами множества E путём размещения средств в пространстве, организации информационного обмена между ними и установления порядка взаимодействия и принятия решения о нахождении МБПЛА в охраняемой зоне объекта защиты.

Задача относится к классу системного проектирования. Решить её на основе классической математики не представляется возможным.

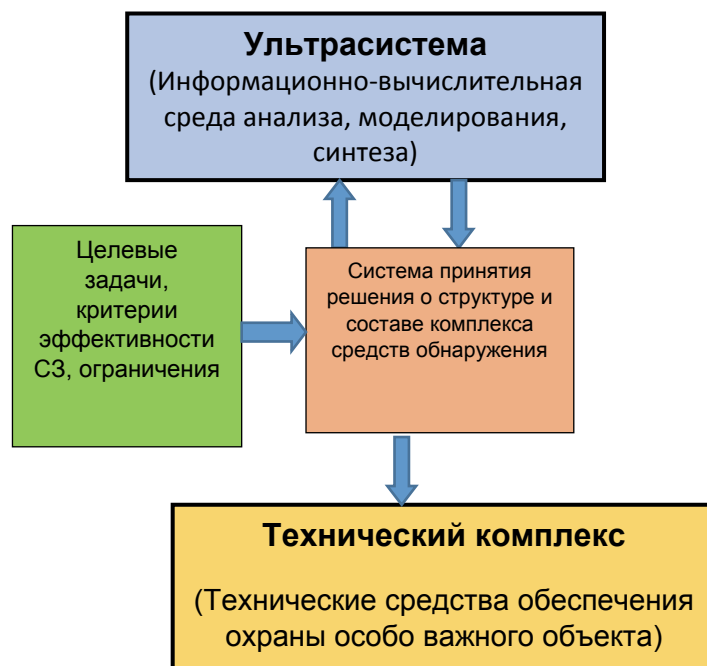


Рис. 1. Обобщённая структура решения задачи комплексирования

Решение задачи с учетом информационно-системной избыточности

Решение подобных задач в современной практике основывается на анализе предложений специалистов, работающих в этой сфере человеческой деятельности, имеющих большой опыт в разработке технических систем и обладающих знаниями в исследуемой области. В этом случае производится выбор наилучшего варианта или формирование варианта на основе предложений нескольких специалистов в соответствии с избранными *показателями предпочтения*. При этом используются современные цифровые технологии, позволяющие осуществлять анализ и выбор вариантов с использованием моделирования и привлечения базы данных. Предполагается, что современные цифровые технологии и их последующее развитие могут существенно расширить свою роль при решении задач комплексирования, если формировать с их помощью предметно-ориентированную среду с информационно-системной избыточностью [12].

Центральными элементами такой среды являются: математическое представление сведений и данных об объектах и МБПЛА, а также понятие радикалов — это математические структурообразующие модели, входными данными которых являются числовые данные свойств элементов комплекса, а выходными — числовые данные качества комплекса. *Радикалы* — это функциональные системы (имеющие назначение), обладающие двумя типами состояний: активные (работающие) и пассивные (неработающие, в резерве). Среда радикалов является новым типом системы — избыточной системой, для которой есть возможность активировать только ту или иную её часть [12]. Понятие радикала ре-

ализует преимущества и минимизирует недостатки избыточности.

Сведения об объекте целесообразно представлять триадой $(p)\delta(x)$ [11], где x — идентификатор (имя) объекта; $x \in X$; X — опорное множество объектов; δ — совокупность выделенных объектов ($x \in \delta$); p — семантическая достоверность сведения (истина или ложь, экспертная оценка — вероятность события $x \in \delta$).

Например, пусть МБПЛА, которые могут быть применены против охраняемого объекта, составляют опорное множество объектов:

$$X_{\text{МБПЛА}} = \{x_{\text{МБПЛА1}}; x_{\text{МБПЛА2}}; \dots; x_{\text{МБПЛА}N}\}.$$

Каждый МБПЛА имеет свой индивидуальный идентификатор. В соответствии с этим идентификатором в вычислительной среде зафиксированы интересующие нас свойства δ -объекта в виде таблиц, текстового материала, уравнений движения, рисунков и др. Наряду с этим каждому идентификационному номеру соответствует показатель семантической достоверности сведений — например, вероятность его применения против охраняемого объекта (ОО) или степень ценности сведений для суждения о предполагаемом ущербе, который может быть причинён ОО, и др.

Следующим понятием являются данные об объекте как совокупности сведений:

$$\{(p_1)\delta_1(x); (p_2)\delta_2(x); \dots\}. \quad (1)$$

Применительно к рассматриваемому примеру это база данных, привязанных к одному идентификатору объекта:

$$\{(p_{\text{МБПЛА1}})\delta_{\text{МБПЛА1}}(x); (p_{\text{МБПЛА2}})\delta_{\text{МБПЛА2}}(x); \dots\}.$$

В рассматриваемой задаче входными данными являются сведения с вероятностями обнаружения МБПЛА как функции дальности всех технических средств, а выходными данными являются сведения с вероятностью

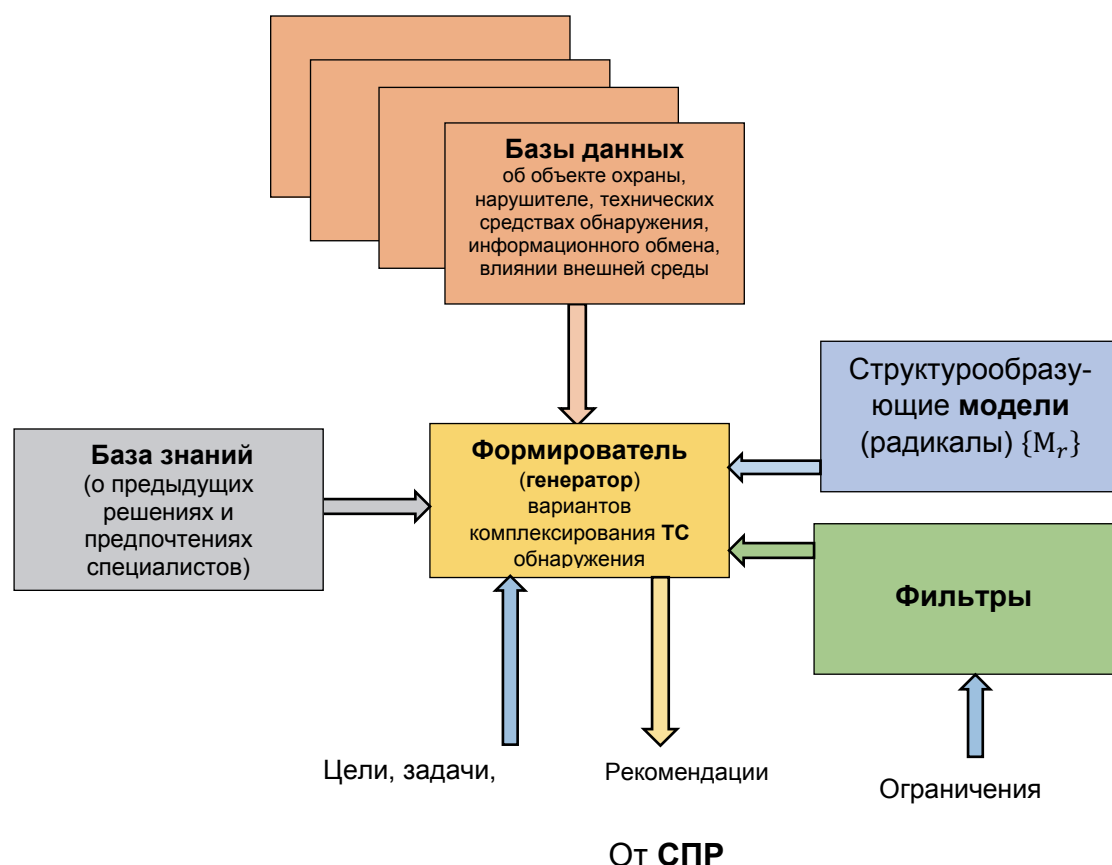


Рис. 2. Структура ультрасистемы решения задачи комплексирования технических средств обнаружения

обнаружения объекта как функции параметров пространства.

Такое математическое представление объекта позволяет изобразить структуру решения задачи комплексирования технических средств в форме, показанной на рис 1.

При этом используется понятие *ультрасистемы* как информационной системы, в которой системообразующими элементами, отношениями и связями между ними являются сведения о некоторых системах. Примерами ультрасистем являются системы, оперирующие базами данных, базами знаний, системы управления базами данных [7].

Полагается, что в ультрасистеме на основе классической математики и современных математических средств решения дискретных задач можно определить структуру технического комплекса и наиболее предпочтительный состав технических средств и связи между ними с учётом предыдущего опыта и мнений специалистов в этой области знаний. При развитой ультрасистеме рекомендации могут быть выработаны автоматически.

С учётом всех перечисленных факторов структуру ультрасистемы можно представить так, как показано на рис. 2. В каждой базе данных сведения о нарушителе, технических устройствах обнаружения и информационного обмена, объекте охраны и окружающей среды «привязаны» с помощью идентификатора к определённому объекту. Наиболее харак-

терные свойства δ , по которым определяется выбор вариантов, имеют цифровую шкалу значений. Таким образом, каждому идентификационному номеру соответствует матрица значений характерных свойств объекта. Это позволяет с формальной стороны осуществлять операции с совокупностью чисел, а с фактической стороны оперировать семантической информацией об объекте.

База данных (БД) об объектах защиты позволяет создать модель объекта охраны, в которой отражены пространственные характеристики и степень уязвимости объекта в целом и его отдельных зон от нападения с применением МБПЛА [7]. БД о нарушителе включает параметры его динамики, виды и степень угроз от применения МБПЛА. База данных о средствах обнаружения даёт информацию о тактико-технических характеристиках ТСО МБПЛА, основанных на различных физических принципах, которые могут быть использованы для комплексирования. Необходимо также учитывать *требования*, предъявляемые к системе обнаружения средства противодействия МБПЛА, которые могут быть установлены на объекте. БД средств информационного обмена включает средства передачи информации и их характеристики, обеспечивающие объединение технических средств обнаружения в единый комплекс. БД метеословий позволяет выявить те конструктивные решения, которые эффективно работают в конкретно заданных условиях. БД предыдущих решений и пред-

почтений специалистов позволяет сократить число анализируемых вариантов построения комплекса.

Разработка системы обнаружения проникновения МБПЛА в охраняемую зону основывается на учёте требований и ограничений, вытекающих из актуальной задачи защиты объекта, а также конкретных условий предпочтения систем обнаружения МБПЛА и выбранных критериев их эффективности.

Методика решения задачи

1. Формируются базы данных всех подсистем ультрасистемы.
2. Система принятия решения формирует из соответствующих баз данных множество фильтров Φ — математически описанных правил выбора возможных и отсеивания неприемлемых вариантов технических средств обнаружения и средств информационного обмена. К ним относятся:

- фильтр $\Phi_{\text{МБПЛА}}$, обусловленный типом возможного МБПЛА из соответствующей базы данных;
- фильтр $\Phi_{\text{ср}}$, обусловленный данными метеословий;
- фильтр $\Phi_{\text{ох}}$, обусловленный данными об объекте охраны;
- фильтр $\Phi_{\text{опыт}}$, обусловленный предыдущим опытом и предпочтениями опытных специалистов, зафиксированных в базе данных.

3. Система принятия решения формирует из данных о средствах измерения и средств информационного обмена множество цепей $S = \{S_{ij}\}$,

$S_{ij} = \{(p_{\text{оби}})\delta_{\text{оби}}(y); (p_{\text{ио}j})\delta_{\text{ио}j}(z)\}$
 $i=1,2,3,\dots,I; j=1,2,3,\dots,J$, пропускает их через фильтры и выделяет подмножество приемлемых вариантов $\{S_{kl}\}$:

$$S_{kl} = \Phi_{\text{МБПЛА}} \Phi_{\text{ср}} \Phi_{\text{ох}} \Phi_{\text{опыт}} S_{ij}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, K; \quad l = 1, 2, 3, \dots, L, \\ K \ll I; \quad L \ll J.$$

4. Подставляя свойства отдельных систем из множества S_{kl} в структурообразующие модели M_r , можно определить такой состав комплекса и такую структуру

$\Sigma_{rkl} = \{M_r; S_{kl}\}$,
 которые удовлетворяют требованиям пригодности или экстремума показателя качества.

Конкретика решения задачи состоит в создании структурообразующих моделей, построении алгоритмов фильтрации, алгоритмов выбора структуры и состава технических средств на основе структурообразующих моделей.

Решение задачи может рассматриваться как синтез *рабочей сети радикалов* (в терминах теории радикалов [12]) в среде, включающей радикалы — источники информации, радикалы-обработчики, образующие множество радикалов-сенсоров, и *целевых радикалов*, предназначенных для решения оценивания состояния,

классификации, определения проблемности ситуации, моделирования, оценки рисков, прогноза, выбора решений, оценки их последствий. При этом ключевым вопросом является поиск ответа на вопрос: «Какова целесообразность включения того или иного радикала в рабочую сеть?». В связи с этим возникает необходимость использования некоторых *рекомендаций* по построению рабочей сети, к числу которых можно отнести следующие:

1. В случае наличия априорной информации целесообразно определить разрешенные и запрещённые комбинации радикалов.
2. При наличии информации об эталонных или квазиэталонных решениях можно провести сравнение предполагаемой рабочей сети — комбинации радикалов с эталонной или квазиэталонной при заданных исходных данных.
3. Решение о включении радикала в рабочую сеть может быть принято по ходу решения при условии, что известен характер ожидаемого преобразования (вид его оператора) и возможна оценка его характеристик. Например, методы обработки измерений могут иметь различные характеристики *точности* и *устойчивости* в зависимости от вида законов распределения погрешностей измерений. Поэтому можно получить количественную оценку целесообразности подключения конкретного радикала.
4. Комбинированный вариант.

Все перечисленные рекомендации формируют дополнительные фильтры Φ_r , обусловленные спецификой «радикального моделирования». Техническим средством их реализации являются базы данных всех подсистем ультрасистемы.

Процесс получения варианта комплексирования ТСО представляет собой синтез ультраоператора комплексного анализа информации в виде системы, входом которой являются различные сведения (признаки), а выходом — заключение о варианте. Один из возможных путей решения задачи основывается на использовании дискретных шкал качества элементов и системы в целом. Например, на дискретной шкале Π_x можно задать модели объектов наблюдения $X_m = \{x\}$, описываемые в пространстве контролируемых признаков моделей. Используются также шкалы Π_{yi} признаков моделей $\{y\}$, оценки которых происходят на основе известных алгоритмов обработки значений непосредственно измеряемых параметров $\{g\}$, получаемых с помощью разнородных датчиков информации — видимого и ИК диапазона, радиолокационных, радиотехнических, акустических и др. При этом сами измеряемые параметры также можно задать на шкалах: $\Pi_{g\text{от}}, \Pi_{g\text{ук}}, \Pi_{g\text{пл}}, \Pi_{g\text{пр}}, \Pi_{g\text{ак}}$. Достоверность элементов шкал характеризуется соответствующими функциями принадлежности $\{\mu_k; k \in K\}$. Тогда процесс определения варианта комплексирования может быть представлен иерархической структурой дискретных шкал. Сведения, порождаемые на шкалах нижнего уровня, отображаются в шкалы

верхнего уровня. Ввиду принципиальной некорректности решения возникающая неоднозначность устраняется путём привлечения дополнительных сведений, конкретизирующих решение. Дополнительные сведения, например, получаемые в радиотехническом диапазоне при выбранном базовом оптическом или полученные от датчиков, имеющих худшую разрешающую способность, выступают в качестве регуляризаторов, а порядок их использования определяют параметры регуляризации.

Определяющую роль при комплексировании технических средств играют базовые структурообразующие модели [4, 8, 9]. Они предназначены для создания *первичного облика* комплекса обнаружения нарушителя. Их особенность состоит в том, что при формировании моделей на них накладывается минимум ограничений, а качество работы комплекса, основанного на базовых структурах, оценивается по ограниченному числу наиболее важных показателей. Опираясь на базовые структуры, решается задача распределения функциональных действий технических средств в пространстве и времени.

Комплекс обнаружения должен не только обнаружить физические сигналы, связанные с появлением нарушителя, но и определить, что эти сигналы относятся к нарушителю, а не другому явлению, а также указать местоположение нарушителя и даже его траекторию движения [4].

Базовые модели характеризуется следующей совокупностью параметров:

$$M_B = \{P_c; P_{\Pi}; P_{ИД}\}, \quad (2)$$

где P_c — вероятность правильного обнаружения приёмником (в широком смысле) физического сигнала, связанного либо с собственным излучением нарушителя, либо отражённым от него излучением, либо возникающем при взаимодействии нарушителя с внешней средой. Вероятность обнаружения сигнала зависит от взаимного размещения приёмных средств комплекса и излучателя и служит пространственной характеристикой комплекса. Обнаружение сигнала — необходимый компонент системы обнаружения нарушителя, но не достаточный, так как не указывает, что сигнал относится к нарушителю и не локализует его в пространстве, что необходимо для принятия решения на ответную реакцию.

P_{Π} — вероятность правильного позиционирования: вероятность того, что источник излучения действительно находится в окрестности точки пространства, которую оценили по результатам наблюдения сигнала и которая принадлежит охраняемому пространству.

$P_{ИД}$ — вероятность правильного отнесения источника излучения сигнала к некоторому классу объектов.

Базовые модели проявляют основные свойства комплекса:

- способность к обнаружению физических сигналов (*чувствительность*), возникающих при появлении нарушителя в охраняемой зоне;
- способность обеспечить *наблюдаемость*, выражающуюся в принципиальной возможности позиционировать нарушителя в обозреваемом пространстве;

- способность обеспечить *идентифицируемость*, выражающуюся в принципиальной возможности различить нарушителя в среде других явлений.

Базовая модель сигнального обнаружения

Вероятность обнаружения сигнала, инициируемого нарушителем (сокращённо — сигнал нарушителя), зависит от множества факторов, но в базовом представлении — от расстояния между нарушителем и приёмником сигналов, мощности сигнала, исходящего от нарушителя, и чувствительности приёмной системы.

Связующей функцией является зависимость расстояния гарантированного приёма сигнала каждым приёмником системы от мощности сигнала и чувствительности приёмника, которая известна как основная функция радиотехнической, оптической и сейсмической локации [4, 13]. В общем виде она представляется так:

$$R = f(W_c, W_{i \text{ пр min}}), \quad (3)$$

где W_c — мощность сигнала; $W_{i \text{ пр min}}$ — минимальная мощность принимаемого i -м приёмником сигнала, обеспечивающая заданный уровень вероятности $P_{\text{пр обн}}$ правильного принятия решения об обнаружении сигнала.

Расстояние R в свою очередь, является функцией разности координат нарушителя и приёмника

$$R_i = \sqrt{(G_H - G_i)^T (G_H - G_i)}, \quad (4)$$

где $G_H = [x_H \ y_H \ z_H]^T$ — вектор местоположения нарушителя; $G_i = [x_{\text{при}i} \ y_{\text{при}i} \ z_{\text{при}i}]^T$ — вектор местоположения i -го приёмника сигналов.

В целом вероятность обнаружения сигнала i -й приёмной системой является функцией:

$$P_{ci} = P_c(G_i, G, W_c, W_{i \text{ пр min}}).$$

Для представителя каждой группы систем — радиолокационной, оптической, оптико-электронной, сейсмической — существует своя частная модель вида (5). Все их объединяет единое свойство — зависимость принимаемой энергии от относительного положения излучателя и приёмника в пространстве.

Обобщённое значение вероятности обнаружения сигнала находится из условия статистической независимости устройств обнаружения сигнала различных систем и описывается следующим образом:

$$P_c(x_H, y_H, z_H) = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_{ci}(G_i, G)). \quad (6)$$

Значение вероятности P_c зависит от топологии размещения приёмных средств, их количества, характеристик среды распространения сигналов, связанных тоже с топологией, технических характеристик частных приёмных систем.

Эта модель служит основой для выбора топологии размещения технических средств обнаружения, состава средств обнаружения, их количества и технических характеристик применяемых средств.

Если для объекта охраны по всей охраняемой территории строится пространственная функция требуемых значений вероятностей $P_{\text{тр}}(x_n, y_n, z_n)$ обнаружения сигнала нарушителя, то критерием выбора топологии и параметров комплекса служит условие:

$$K_c: P_c(x_n, y_n, z_n) \geq P_{\text{тр}}(x_n, y_n, z_n). \quad (7)$$

Состав технических средств, их параметры, количество и размещение должны быть такими, чтобы соблюдалось условие (7).

Базовая модель наблюдаемости

В теории и практике оценивания координат объектов применяется понятие *наблюдаемости*, родственное понятию наблюдаемости динамических систем и иногда сводящееся к нему [4]. В самом общем виде под *наблюдаемостью* нарушителя будем понимать способность системы обнаружения нарушителя по физическим сигналам или связанным с ними параметрам определять местоположение нарушителя.

Нарушитель наблюдаем, если существует обратное преобразование вектора наблюдаемых параметров Y в поле координат G нарушителя для всех возможных положений нарушителя в охраняемой зоне:

$$Y \xrightarrow{A} G.$$

Оператор A может быть найден из равенства линейных приращений векторов наблюдения и местоположения нарушителя

$$\Delta Y = \Phi \Delta G, \quad (8)$$

где Φ — матрица частных производных наблюдаемых параметров по оцениваемым:

$$\Phi = \left| \frac{\partial y_i}{\partial k_{ij}} \right|, i = (1, 2, \dots, J); j = (1, 2, 3),$$

где $k_{i1} = x_i; k_{i2} = y_i; k_{i3} = z_i$.

Учитывая, что система (8) переопределена, решаем её методом псевдообращения:

$$\Phi^T \Delta Y = \Phi^T \Phi \Delta G, \quad \Delta G = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T \Delta Y; \quad (9)$$

$$A = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T.$$

Критерием наблюдаемости может служить превышение порога $h > 0$ детерминанта матрицы $\Phi^T \Phi$.

Критерий наблюдаемости:

$$\det \Phi^T \Phi > h \quad \forall \{x_n, y_n, z_n\} \subset \Omega. \quad (10)$$

Условия наблюдаемости непосредственно зависят от важной структурообразующей процедуры — выбора топологии размещения технических средств обнаружения и выбора состава измеряемых параметров. Если брать в качестве формирования пространственной структуры глобальный критерий наблюдаемости (8), то все составляющие комплекса устройств будут связаны единой структурой. Полученная структура может служить потенциальным ориентиром в создании комплекса.

Можно из общего выражения (8) формировать некоторые частные структуры, обусловленные совместным применением радиолокационных и оптических средств, группой оптических средств, акустических и оптических средств, группой акустических средств и

др. По совокупности решений этих частных моделей можно определить степень наблюдаемости нарушителя во всей требуемой зоне.

Вероятность того, что источник излучения действительно находится в окрестности точки пространства, которую оценили по результатам наблюдения сигнала ($P_{\text{об}}$), зависит не только от *наблюдаемости* нарушителя, но и от *точности* измерения параметров сигнала, характеризующих его положение. Если взять в качестве обобщённой структуры процедуры сбора и обработки измерений по методу наименьших квадратов (МНК), то получим оценку отклонений от действительного положения в следующей форме [4]

$$\Delta G^* = [\Phi^T N^{-1} \Phi]^{-1} \Phi^T N^{-1} \Delta Y, \quad (11)$$

где N — ковариационная матрица погрешностей измерения.

При этом ковариационная матрица погрешностей оценок местоположения нарушителя равна

$$\Theta = [\Phi^T N^{-1} \Phi]^{-1}, \quad (12)$$

Для оценки наблюдаемости структуры (8; 9) и (11; 12) равноценны. Но оценка ковариационной матрицы Θ позволяет также оценить вероятность правильного позиционирования — $P_{\text{п}}$, так как её элементы служат параметрами функции распределения вероятностей погрешностей оценок позиционирования.

Наряду с этим можно использовать сравнение среднеквадратических значений погрешностей оценок координат нарушителя с их допустимыми пределами и устанавливать требования к ним, исходя из величин доверительных вероятностей. Например, можно требовать, чтобы:

$$3\sigma_x \leq \Delta x_{\text{доп}}; \quad 3\sigma_y \leq \Delta y_{\text{доп}}; \quad 3\sigma_z \leq \Delta z_{\text{доп}}.$$

Таким образом, можно для оценки наблюдаемости, точности и вероятности $P_{\text{об}}$ воспользоваться ковариационной матрицей (12) погрешностей оценок координат нарушителя и на их основе определять топологию комплекса.

Базовая модель идентификации

Идентификация основана на выявлении из сигналов и траекторий движения объектов совокупности признаков, позволяющих отнести их к определённому классу. В принципе, наибольшая вероятность $P_{\text{ид}}$ правильного отнесения наблюдаемого объекта к определённому классу достигается при формировании признаков на основе анализа всей совокупности принимаемых сигналов и по оценке движения объекта, полученной тоже по всем наблюдаемым параметрам. Базовая модель в общем виде может быть представлена в следующей форме:

$$P_{\text{ид}} = f(\{s_i\}); \quad i = (1, 2, \dots, L); \quad (13)$$

$$\text{или} \quad P_{\text{ид}} = f(\{\Pi_i\}); \quad i = (1, 2, \dots, L),$$

где Π_i — совокупность признаков, полученных после обработки сигналов на каждом приёмном пункте.

Сигналы и идентификационные признаки, выявляемые путем их обработки, связаны с топологией раз-

мещения технических средств. Для реализации потенциальных возможностей по идентификации в систему принятия решения должны поступать все сведения о сигналах или признаках, выделенных из сигналов и оценок траекторий.

Для обеспечения требуемого уровня качества системы обнаружения, позиционирования и идентификации нарушителя, каким является МБПЛА, необходима интеллектуализация таких систем [12]. Она реализуется путём создания интеллектуальной надстройки, обладающей свойствами развития и расширения круга используемых ею типичных ситуаций для действия в нетипичных условиях за счёт самообучения путём моделирования нетипичных условий.

В основе такой интеллектуальной надстройки лежит избыточная модель всей проблемной области в форме *базы данных и знаний*, т. е. она должна быть в форме избыточной информационной системы, отражающей проблемную область.

Таким образом, концепция избыточного моделирования сложной технической системы (СТС), которой является комплекс обнаружения, позиционирования и идентификации МБПЛА, исходит из следующего.

1. Избыточная модель СТС — это единственная возможность логически добывать дополнительную информацию для решения задач жизненного цикла.

2. Избыточная модель СТС — это оперативная возможность логически анализировать последствия решения очередной задачи жизненного цикла не только в предметной области СТС, но и в проблемной области.

3. Избыточная модель СТС требует механизма временного отключения ненужных в данный момент элементов модели, чтобы каждый раз использовать только необходимую и достаточную информацию для данной задачи, а не всю имеющуюся в модели. Для этой цели используются особого рода системы — радикалы.

Заключение

Задача комплексирования средств обнаружения — это создание такой конфигурации совокупности технических средств, выбор таких отношений и связей

между ними и разработка их программного и математического обеспечения, которые образуют систему обнаружения с заданными показателями эффективности. Как правило, эти задачи решались коллективами специалистов, обладающих опытом и знаниями в соответствующих областях.

Центральное звено творческого коллектива — лицо, принимающее решение. Существуют различные способы обеспечения поддержки принятия решения с использованием вычислительных средств. Развитие современных цифровых технологий позволяет ставить задачи комплексирования так, чтобы максимально использовать опыт специалистов, аккумулировать их знания и при этом оперировать большим числом сведений обо всех входящих факторах. Они позволяют накапливать опыт предыдущих решений, т. е., по сути, обучаться на основе внутреннего и внешнего опыта, развивать систему принятия решения. В этих условиях информация, на основе которой первое лицо принимает решение о варианте комплексирования, обладает существенной обусловленностью.

Комплексирование средств системы обнаружения и идентификации должно опираться на базовые модели сигнального обнаружения, наблюдаемости и идентификации. Базовая структурообразующая модель, предназначенная для создания первичного облика комплекса обнаружения нарушителя, представляет собой математическую модель, функционально связывающую параметры местонахождения нарушителя, средств наблюдения, охраняемой зоны, наблюдаемых сигналов и измеряемых данных. Она имеет достаточно простую форму описания, так как на неё накладывается минимум ограничений и качество работы комплекса с базовой структурой оценивается по ограниченному числу наиболее важных показателей.

Совокупность базовых моделей описывает с разных позиций базовые соотношения входящих в комплекс параметров с учётом разных критериев качества системы. Это позволяет в условиях информационно-системной избыточности формировать комплекс средств по множеству показателей качества с учётом реальных ограничений.

Рецензент: **Бурый Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, эксперт РАН, директор департамента ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

Литература

1. Васильев В.В., Джуган Р.В. Отождествление беспилотных летательных аппаратов в оптико-электронной системе контроля их группового полёта // Правовая информатика. 2020. № 2. С. 40—47. DOI: 10.21681/1994-1404-2021-2-40-47
2. Васильев В.В., Манин А.П., Джуган Р.В., Соколюк В.Л., Фокин А.И. Панорамные оптические средства наблюдения беспилотных летательных аппаратов // Полёт. 2018. № 4. С. 3—8.
3. Годунов А.И., Шишков С.В., Юрков Н.К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными летательными аппаратами // Надёжность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 112—114.

4. Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов / под ред. А.П. Манина, В.В. Васильева. М. : Машиностроение-Полёт, 2016. 440 с.
5. Карякин В.В. Беспилотные летательные аппараты — новая реальность войны // Проблемы национальной стратегии. 2015. № 3(30). С. 130—145.
6. Канушкин С.В. Синергетический подход в управлении группой беспилотных летательных аппаратов интеллектуальной системы охранного мониторинга // Правовая информатика. 2018. № 3. С. 25—37. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-3-25-37
7. Ловцов Д.А. Архитектура базы данных и знаний подсистемы планирования и координации информационных процессов в иерархической эргосистеме // Правовая информатика. 2020. № 4. С. 4—19. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-4-04-19
8. Ловцов Д.А., Гаврилов Д.А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно-пилотируемых аппаратов : монография. М. : Технолож-3000, 2019. 164 с. ISBN 978-5-94472-036-8.
9. Ловцов Д.А., Гаврилов Д.А. Эффективная автоматизированная оптико-электронная система аэрокосмического мониторинга // Правовая информатика. 2019. № 2. С. 29—35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-29-35
10. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 100—146.
11. Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В. Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности. М. : Курс, 2019. 384 с.
12. Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В. Интеллектуализация сложных технических систем. М. : ВА им. Петра Великого, 2013. 208 с.
13. Скотченко А.С. Метод расчёта радиозаметности дистанционно-пилотируемых аппаратов правоохранительных органов // Правовая информатика. 2020. № 4. С. 29—37. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-4-29-37
14. Danyk, Y.G., Puleko I.V., Bougaiov I.V. Unmanned aerial vehicles detection based on analysis of acoustic and radar signals // J. Zhytomyr State Technol. Univ. Ser., 2014.
15. Michel A.H. Counter-drone systems. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. 23 p.
16. Visser De E., Cohen M.S., LeGouillon M., et al. Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles // Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008). 2008. Pp. 1–5.
17. Sheu B.H., Chiu C.C., Lu W.T. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 13. Pp. 25–83.

USING INFORMATION AND SYSTEM REDUNDANCY IN SECURITY SYSTEMS FOR GUARDED OBJECTS

Vladimir Vasil'ev⁵, Aleksandr Potiupkin⁶, Viacheslav Tolokonnikov⁷, Viacheslav Chechkin⁸

Keywords: *information and system redundancy, unmanned aerial vehicle (UAV), detection, observability, positioning, identification, aggregation, database, knowledge base, models, quality indicators, limitations, security.*

Abstract.

Purpose of the work: improving the efficiency of using of technical means for detecting, positioning and identification of small size unmanned aerial vehicles (UAVs) in security systems for guarded objects.

⁵ **Vladimir Vasil'ev**, Dr.Sc. (Technology), Professor, Chief Researcher at the Armint Research and Production Testing Centre, Moscow, Russian Federation.

E-mail: vv-vasiliev@yandex.ru

⁶ **Aleksandr Potiupkin**, Dr.Sc. (Technology), Professor at the Peter the Great Military Academy, Moscow, Russian Federation.

E-mail: post@armint.ru

⁷ **Viacheslav Tolokonnikov**, Department Head at the Eleron Specialised Research and Production Association, Moscow, Russian Federation.

E-mail: dissovet@eleron.ru

⁸ **Viacheslav Chechkin**, Dr.Sc. (Physics & Mathematics), USSR State Prize Laureate, Honoured Figure of Higher Education of the Russian Federation, Professor at the Peter the Great Military Academy, Professor at the Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

E-mail: a.chechkin@mail.ru

Method used: system analysis and aggregation of technical means using a formalised choice of an acceptable variant of the system under the conditions of information and system redundancy.

Results obtained. A methodology for solving the task of choosing an acceptable variant of the security system for guarded objects based on forming an ultra-system is developed. Basic models for signal detection, observability and identification for rational aggregation of means for protecting the guarded object are developed. The basic structural mathematical model of the initial appearance of an intruder detection system, i. e. that of small size UAVs, functionally linking the parameters of the intruder's location, surveillance means, guarded area, observed signals and measured data is developed.

A set of basic models describes the basic relations of the parameters of the system, from different standpoints and considering different criteria for the quality of the system. This makes it possible to form, under the conditions of information and system redundancy, a system of protective means taking into account a variety of quality indicators and the existing real-world limitations.

References

1. Vasil'ev V.V., Dzhugan R.V. Otozhdestvlenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v optiko-elektronnoi sisteme kontrolya ikh gruppovogo poleta. Pravovaia informatika, 2020, No. 2, pp. 40–47. DOI: 10.21681/1994-1404-2021-2-40-47
2. Vasil'ev V.V., Manin A.P., Dzhugan R.V., Sokoliuk V.L., Fokin A.I. Panoramnye opticheskie sredstva nabliudeniia bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Polet, 2018, No. 4, pp. 3–8.
3. Godunov A.I., Shishkov S.V., Iurkov N.K. Kompleks obnaruzheniia i bor'by s malogabaritnymi letatel'nymi apparatami. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem, 2014, No. 2, pp. 112–114.
4. Informatsionno-izmeritel'noe obespechenie naturnykh ispytaniy slozhnykh tekhnicheskikh kompleksov / pod red. A.P. Manina, V.V. Vasil'eva. M.: Mashinostroenie-Polet, 2016. 440 pp.
5. Kariakin V.V. Bespilotnye letatel'nye apparaty – novaia real'nost' voyny. Problemy natsional'noi strategii, 2015, No. 3(30), pp. 130–145.
6. Kanushkin S.V. Sinergeticheskii podkhod v upravlenii gruppoi bespilotnykh letatel'nykh apparatov intellektual'noi sistemy okhrannogo monitoringa. Pravovaia informatika, 2018, No. 3, pp. 25–37. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-3-25-37
7. Lovtsov D.A. Arkhitektura bazy dannykh i znaniy podsistemy planirovaniia i koordinatsii informatsionnykh protsessov v ierarkhicheskoi ergasisteme. Pravovaia informatika, 2020, No. 4, pp. 4–19. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-4-04-19
8. Lovtsov D.A., Gavrilov D.A. Modelirovanie optiko-elektronnykh sistem distantsionno-pilotiruemykh apparatov : monografiia. M.: Tekhnolodzhii-3000, 2019. 164 pp. ISBN 978-5-94472-036-8.
9. Lovtsov D.A., Gavrilov D.A. Effektivnaia avtomatizirovannaia optiko-elektronnaia sistema aerokosmicheskogo monitoringa. Pravovaia informatika, 2019, No. 2, pp. 29–35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-29-35
10. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analiz sredstv i sposobov protivodeistviia bespilotnym letatel'nym apparatam. Chast' 1. Bespilotnyi letatel'nyi apparat kak ob'ekt obnaruzheniia i porazheniia. Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti, 2020, No. 1, pp. 100–146.
11. Potiupkin A.I., Chechkin A.V. Iskusstvennyi intellekt na baze informatsionno-sistemnoi izbytochnosti. M.: Kurs, 2019. 384 pp.
12. Potiupkin A.I., Chechkin A.V. Intellektualizatsiia slozhnykh tekhnicheskikh sistem. M.: VA im. Petra Velikogo, 2013. 208 pp.
13. Skotchenko A.S. Metod rascheta radiozametnosti distantsionno-pilotiruemykh apparatov pravookhranitel'nykh organov. Pravovaia informatika, 2020, No. 4, pp. 29–37. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-4-29-37
14. Danyk, Y.G., Puleko I.V., Bougaiov I.V. Unmanned aerial vehicles detection based on analysis of acoustic and radar signals. J. Zhytomyr State Technol. Univ. Ser., 2014.
15. Michel A. H. Counter-drone systems. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. 23 p.
16. Visser De E., Cohen M.S., LeGoullon M., et al. Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles. Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008), 2008, rr. 1–5.
17. Sheu B.H., Chiu C.C., Lu W.T. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System. Applied Sciences, 2019, vol. 9, No. 13, pp. 25–83.