УДК 621-396 DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-60-78

Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Часть 1. Методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга

Д.Г. Пантенков[1*]

[1] АО «Кронштадт» (Московский филиал по беспилотному направлению),
Москва, 115432, Российская Федерация
*Адрес для переписки: pantenkov88@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию 15.10.2019
Принята к публикации 14.05.2020

Ссылка для цитирования: Пантенков Д.Г. Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Часть 1. Методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 60–78. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-60-78

Аннотация: *В настоящее время особую актуальность и практическую значимость приобрело применение авиационных комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) различного класса и целевого назначения в интересах как специальных заказчиков, так и гражданского назначения. Современные БПЛА, применяемые как по отдельности, так и в составе группы, могут нести на борту одновременно несколько целевых нагрузок, построенных на различных физических принципах: многофункциональная оптико-электронная система, цифровая аэрофотосистема, бортовая радиолокационная станция, система радио- и радиотехнической разведки, система связи для передачи данных с целевых нагрузок (датчиков) на мобильное устройство (например, планшет) удаленному абоненту и т. д. При этом практически не освещенным остается вопрос определения оценки эффективности решения как отдельных целевых задач БПЛА, так и нахождения интегральной оценки эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА при решении набора целевых задач (последовательно или последовательно-параллельно во времени) с учетом их приоритетности и ряда других факторов. Научно-техническая статья структурно состоит из трех частей. В первой части разработан научно-методический подход к определению оценок эффективности решения частных целевых задач связи и дистанционного мониторинга комплексом с БПЛА по критерию вероятности их решения. В рамках данного подхода разработан математический аппарат функциональной зависимости вероятностей решения частных целевых задач с проектными параметрами целевых нагрузок в составе БПЛА с учетом особенностей его функционирования и в условиях имеющихся ограничений и допущений. Научно-методический подход позволяет уже на этапе формирования тактико-технического задания на комплекс с БПЛА получить расчетным методом количественные оценки вероятностей решения частных целевых задач с учетом технического задела предприятий промышленности по ключевым компонентам из состава комплекса (целевые нагрузки, комплекс средств связи и т. д.). Разработанный в статье методический аппарат является универсальным и инвариантным к входным параметрам, т. е. количеству решаемых целевых задач, этапности функционирования комплекса с БПЛА, и может быть легко адаптирован под новые условия применения. При этом необходимо отметить, что результатом статьи является методический аппарат нахождения именно интегральной оценки. Определение оценок эффективности при групповом применении БПЛА, а также с учетом возможного противодействия, выходит за рамки настоящей статьи и является направлением дальнейших исследований по данной тематике.*

Ключевые слова: *комплексы с БПЛА, интегральная оценка эффективности, целевые задачи, вероятность решения, радиосвязь, дистанционный мониторинг, оптико-электронная система, цифровая аэрофотосистема высокого разрешения, радиолокационная система, расчетные параметры.*

Введение

В настоящее время системы и комплексы с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) находят широкое применение, как в различных отраслях народного хозяйства, так и в интересах специальных заказчиков. В случае, когда с политической, экономической или технической точек зрения пилотируемые летательные аппараты для решения поставленных целевых задач использовать нецелесообразно, на помощь приходят БПЛА. Комплексы с БПЛА чаще всего решают задачи мониторинга; получаемая с их помощью информация позволяет осуществлять оценку состояния земной поверхности и воздушного пространства. В то же время задачи, решаемые с помощью комплексов с БПЛА, могут быть существенно шире: на их базе могут быть реализованы системы связи, управления и, собственно, практически все комплексы и системы, реализуемые на пилотируемой авиации.

Комплексы с БПЛА являются сложными техническими системами, эффективность применения которых зависит как от тактико-технических характеристик самого беспилотного носителя, так и от возможностей элементов бортового комплекса с БПЛА и наземных компонентов. Кроме того, изменение условий оптической видимости, радиоэлектронной обстановки, а также наличие противодействия в зоне действия БПЛА существенно снижают эффективность его применения.

Разработка методического подхода к оценке эффективности требуется с целью:

– обоснованного формирования тактико-технических требований к вновь создаваемым образцам комплексов с БПЛА на этапе написания тактико-технического задания на НИОКР;

– сравнения между собой различных типов комплексов с БПЛА;

– определения условий применения, в которых эффективность комплексов с БПЛА стремится к максимуму;

– разработки мероприятий по оптимальному (рациональному) использованию комплексов с БПЛА.

В процессе функционирования комплексов с БПЛА имеют место различные этапы, используются различные подсистемы, устройства и режимы их работы, выполняются различные операции. В связи с этим системные показатели эффективности могут быть оценены крайне большим количеством параметров [1–36].

При разработке комплекса с БПЛА всегда стремятся создать его вариант, наилучшим образом соответствующий своему целевому предназначению. Однако любой комплекс рационален только с точки зрения удовлетворения выбранных критериев, поэтому рассмотрим критерии, позволяющие оценить его эффективность по различным правилам. Наиболее часто для этого используют экстремальные, ограничительные (пороговые), фиксирующие и смешанные критерии.

Для нахождения интегральной оценки эффективности решения наборов целевых задач [19] требуется разработать методический аппарат, позволяющий функционально увязать заложенные в радиоэлектронное оборудование целевые нагрузки, и наземной части проектные параметры аппаратуры (с учетом выбранной структуры и схемотехнических решений) с величиной показателя эффективности, оценив тем самым оптимальность (рациональность) конечного технического облика комплекса с БПЛА.

В работах [37–40] рассмотрены вопросы оценки эффективности противодействия комплексам с БПЛА в части физического захвата, радиоэлектронного подавления, поражения лазерными средствами, и получены количественные оценки.

Проведенный анализ монографий, технической литературы, научно-технических статей и материалов конференций показал, что методический аппарат нахождения интегральной оценки эффективности применения комплекса с БПЛА при решении сразу набора целевых задач в зависимости от этапа функционирования и от проектных параметров целевых нагрузок до настоящего времени не известен.

На рисунке 1 представлена типовая схема взаимодействия составных частей перспективного комплекса с БПЛА с указанием расширенного перечня его потенциальных целевых задач. В рамках первой части статьи (из 3-х частей) представлен научно-методический аппарат решения задач 1–4.

1. Передача оперативной информации мобильным группам различного назначения

Суть первой целевой задачи заключается в симплексной передаче целевой информации в виде фотоданных, видеоинформации от БПЛА на мобильное устройство типа планшет удаленному (относительно БПЛА и наземного комплекса приема, передачи и обработки информации) потребителю. Постановка рассматриваемой первой целевой задачи носит упрощенный характер, поскольку изначально предполагается, что:

– объем передаваемых данных и своевременность информации достаточные для визуализации информации на мобильном планшете (это обеспечивается оптимальным выбором современных сигнально-кодовых конструкций, достаточным уровнем энергетического бюджета радиолинии, использованием ненаправленных антенн на прием);

– потребные частотные ресурсы для передачи целевой информации от БПЛА на мобильный планшет выделены в соответствии с радиочастотной заявкой.

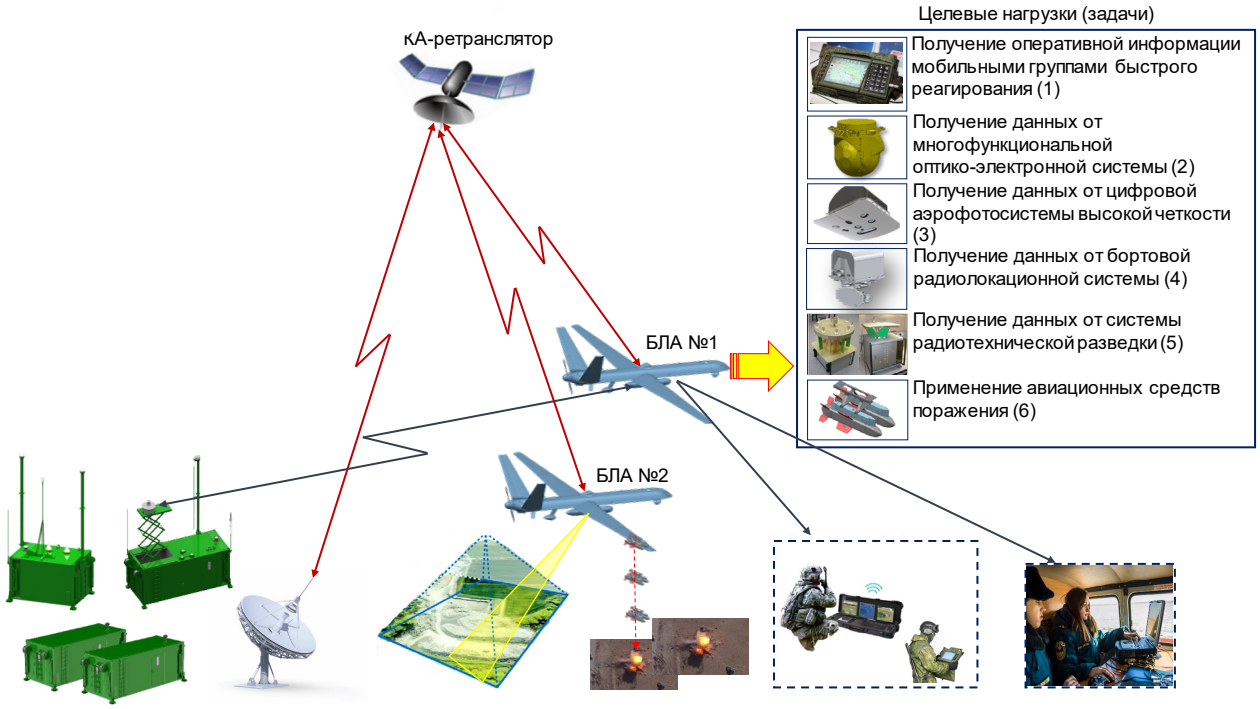

Рис. 1. Типовая схема взаимодействия составных частей перспективного комплекса с БПЛА

Fig. 1. Typical Scheme of Interaction of Components of a Promising Complex with a UAV

Как показано в [20], аналитические выражения для определения вероятностей ошибки на бит передаваемой информации для сигналов BPSK $P_{b\ BPSK}$, QPSK $P_{b\ QPSK}$, M-QAM $P_{b\ M-QAM}$, которые соответствуют вероятности правильного решения первой целевой задачи – передаче оперативной информации мобильным группам различного назначения – определяются как (1–4).

$$P_1 = (1 - P_b)^Z, \tag{1}$$

$$P_{b\ BPSK} = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_A^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2N}} dx, \tag{2}$$

$$P_{b\ QPSK} = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_A^{\infty} e^{-\frac{x^2}{4N}} dx, \tag{3}$$

$$P_{b\ M-QAM} = \frac{1}{\log_2 M} \left(1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{3\log_2 M \cdot E_b}{2(M-1)N_0}} \right) \right] \right] \right), \tag{4}$$

где P_1 – вероятность правильного решения первой целевой задачи; Z – число символов (бит) в передаваемом пакете информации; A – амплитуда огибающей сигнала; N – мощность шума; E_b – энергия на бит входного сигнала; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума на входе приемного фильтра; M – позиционность модуляции цифрового сигнала; $P_{b\ BPSK}$, $P_{b\ QPSK}$, $P_{b\ M-QAM}$ – вероятность ошибки на бит передаваемого сигналов для BPSK, QPSK и M-QAM.

На рисунке 2 представлена зависимость вероятности ошибки на бит передаваемой информации P_b от отношения сигнал/шум на входе приемника P_b/N_0 для различных видов сигналов и скоростей кодирования.

2. Получение данных от многофункциональной оптико-электронной системы и от цифровой аэрофотосистемы высокой четкости

Технический облик многофункциональной оптико-электронной системы (МОЭС) характеризуется большим количеством параметров, определяемых не только характеристиками матричных приемников излучения (МПИ) каждого канала, но характеристиками оптической системы и оптико-механической схемы построения изображения в каждом из них, техническими и эксплуатационными параметрами, а также рядом других показателей [1].

Основными параметрами, определяющими разведывательные возможности МОЭС, являются:

– рабочий спектральный диапазон;

– элементарное поле зрения (диапазон значений элементарного поля зрения), приведенное к

типовым значениям контраста изображений объектов съемки;

– угловой захват (диапазон значений углового захвата);

– диапазон высот применения.

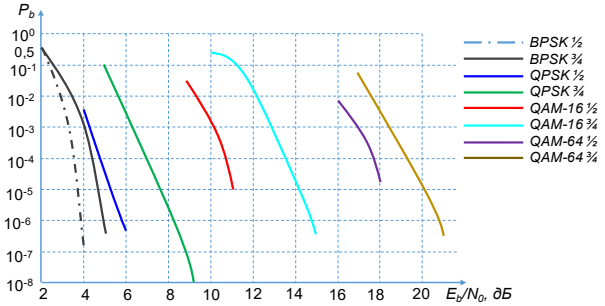

Рис. 2. Зависимость P_b от E_b/N_0

Fig. 2. The Dependence of Pb on Eb/N0

Для сравнения МОЭС и выбора рационального варианта для включения в состав целевой нагрузки БПЛА целесообразно использовать обобщенный показатель эффективности МОЭС, представляющий собой функцию указанных выше основных параметров. При его разработке применяется подход, широко используемый при оценке эффективности МОЭС воздушной разведки и наблюдения объектов различных классов [1].

В соответствии с данным подходом в качестве одного из основных показателей рассматривается максимальный эффективный захват, обеспечиваемый системой в заданном диапазоне рабочих высот ее применения при решении типовых задач воздушной разведки. При этом под эффективным захватом $L_{эфф}$ понимается полоса местности, захватываемая МОЭС поперек направления полета, в пределах которой обеспечивается вскрытие объектов разведки с требуемым уровнем подробности с вероятностью не ниже заданного граничного значения. В качестве граничного значения вероятности $P_{гран}$ часто принимаются значения, лежащие в пределах 0,75…0,95 в зависимости от задач разведки (наблюдения).

Как показывают результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований [1, 19–21], существует функциональная зависимость вероятности обнаружения и распознавания объектов разведки с помощью иконических средств воздушной разведки от обеспечиваемого ими линейного разрешения на местности, что позволяет поставить в соответствие граничному значению вероятности $P_{гран}$ граничное значение требуемого линейного разрешения на местности $R_{гран}$. Значения $R_{гран}$ зависят от объектов, которые должны вскрываться с использованием МОЭС при решении задач с применением того или иного комплекса с БПЛА, и лежат в подавляющем большинстве случаев в диапазоне 0,05…1,0 м.

С учетом отмеченной выше зависимости эффективный захват МОЭС можно рассматривать как полосу местности, в пределах которой обеспечивается линейное разрешение не выше граничного применительно к соответствующим задачам и объектам разведки (наблюдения).

В зависимости от требований, предъявляемых к конкретной ситуации мониторинга, могут решаться задачи как обнаружения объектов, так и их распознавания, при этом используют следующие категории классификации [1]:

1) вид – наиболее общая категория классификации, объединяющая родственные объекты одного вида (например, подвижная сухопутная техника, стационарные объекты);

2) класс – категория классификации, объединяющая объекты, близкие по назначению или характеристикам (например, легковые автомобили, грузовые автомобили, люди);

3) тип – категория классификации, объединяющая конкретные наименования объектов (например, грузовой автомобиль типа «ЗиЛ-433362»).

В данной научно-технической статье будут рассматриваться только варианты распознавания объектов до типа и класса.

В качестве основных параметров, характеризующих возможности МОЭС, принята вероятность обнаружения $P_о$ или распознавания $P_р$ объекта до заданного уровня подробности. Аналитическое выражение для вероятности правильного решения второй/третьей целевой задачи – получения видеоизображения с МОЭС/фотоданных с цифровой аэросистемы (ЦАФС) – запишем в виде [1]:

$$P_{2,3} = \begin{cases} P_о = P_{оо} + P_{оТ} - P_{оо} \cdot P_{оТ} \text{ (день)}; \\ P_о = P_{оо} \text{ (ночь)}; \\ P_р = P_{ро} + C_Т \cdot P_{рТ}\left(1 - P_{ро}\right) \text{ (день)}; \\ P_р = P_{оо} \text{ (ночь)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $P_о$, $P_р$ – вероятности обнаружения и распознавания объекта; $P_{оо}$, $P_{ро}$ – вероятности обнаружения и распознавания объекта без учета тени; $P_{оТ}$, $P_{рТ}$ – вероятности обнаружения и распознавания объектов с учетом тени.

В свою очередь, выражение для расчета вероятностей $P_{ро}$ и $P_{рТ}$, входящих в выражение (5), имеет вид:

$$P_{р.о} = P_{оо,оТ} \cdot \exp\left\{-B_{о.Т} \cdot \frac{\Delta l^2_{о.Т}}{L^2_{эо,эТ}}\right\}, \quad (6)$$

где $B_{о.Т}$ – коэффициент формы для объекта и его тени; $\Delta l_{о.Т}$ – линейное разрешение на местности для объекта и его тени (м); $L_{эо,эТ}$ – эквивалентный линейный размер для проекции объекта и его тени (м).

При этом значения $B_{о.Т}$ и $L_{эо,эТ}$ вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

$$B_{о.Т} = \frac{G_{о.Т} \cdot r_{о.Т}}{S_{о.Т}}, L_{эо,эТ} = 1{,}13 \cdot \sqrt{S_{о.Т}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{о.т}}$, $r_{\text{о.т}}$, $S_{\text{о.т}}$ – периметры проекций объекта и его тени (м), среднеарифметическое значение радиусов наибольшей вписанной и наименьшей описанной окружностей для проекций объекта и его тени (м) и площади проекций объекта и его тени (м²), соответственно; здесь и далее подразумевается проекция на плоскость перпендикулярно линии визирования МОЭС.

Для случая ведения мониторинга днем определение коэффициента тени $C_{\text{т}}$, входящего в выражение (5), осуществляется следующим образом [1]:

$$C_{\text{т}} = \begin{cases} 0{,}3 \text{ при } h_0 \geq 5\sqrt{S_{\text{о.т}}}; \\ 0{,}1 \text{ при } h_0 < 5\sqrt{S_{\text{о.т}}}; \\ 0 \text{ для объекта, тень которого скрыта от ИСМ,} \end{cases} \quad (8)$$

где h_0 – высота объекта (м).

Алгоритмы расчета значений $P_{\text{оо,оТ}}$ и $\Delta l_{\text{о.т}}$, входящих в выражение (6), имеют ряд различий для телевизионных систем и цифровых аэрофотосистем, работающих в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 0{,}4\ldots1{,}1$ мкм или $\Delta\lambda = 0{,}9\ldots1{,}7$ мкм, с одной стороны, и ИК-систем, работающих в диапазонах $\Delta\lambda = 3{,}2\ldots5{,}2$ мкм или $\Delta\lambda = 8\ldots14$ мкм, с другой стороны, обусловленных отличием моделей, описывающих влияние оптических свойств атмосферы на величину ослабления излучаемого (отражаемого) сигнала для указанных классов МОЭС. Ниже рассмотрены варианты алгоритмов расчета этих показателей отдельно для каждой из указанных групп средств.

Применительно к ОЭС видимого и ближнего ИК-диапазонов (0,4...1 мкм) $\Delta l_{\text{о.т}}$ определяется в соответствии с выражением [1, 3, 4]:

$$\Delta l_{\text{о.т}} = \frac{10^3 \cdot D_{\text{н}}}{F} \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{эл}}}{\Phi(q_{01,\text{т}1})}}, \quad (9)$$

где $D_{\text{н}}$ – наклонная дальность наблюдения (км); F – фокусное расстояние объектива (м); $S_{\text{эл}}$ – площадь элемента фотоприемника (м²); $q_{01,\text{т}1}$ – отношение сигнал/шум для участка объекта (тени), равного приведенному к местности элементу разложения фотоприемника; $\Phi(q_{01,\text{т}1})$ – интеграл вероятности, определяемый в соответствии с формулой [2]:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot t^2\right\} dt. \quad (10)$$

Значения отношений q_{01} и $q_{\text{т}1}$, входящих в выражение (9), могут быть определены исходя из соотношения:

$$q_{01,\text{т}1} = \frac{k_{\text{ц}} \cdot (r_1 + r_2) \cdot \left|E_{o,\text{т}} - E_{\text{ф}}\right| \cdot t_{\text{э}}}{(r_1 + r_2 + 2 \cdot \chi) \cdot H'_{\text{ш}}} - 3{,}2, \quad (11)$$

где E_o, $E_{\text{ф}}$, $E_{\text{т}}$ – интегральные энергетические освещенности изображений объекта, фона и тени (Вт/м²); r_1, r_2 – средневзвешенные в диапазоне рабочих длин волн ОЭС с учетом чувствительности приемника значения коэффициента яркости объекта и фона; χ – средневзвешенное в диапазоне рабочих длин волн ОЭС с учетом чувствительности приемника значение спектрального коэффициента задымленности атмосферы; $H'_{\text{ш}}$ – пороговая энергетическая экспозиция фотоприемника (Вт·с/м²); $t_{\text{э}}$ – время экспозиции (с); $k_{\text{ц}}$ – коэффициент, учитывающий влияние цифровой обработки изображений, принимаемый для типового варианта ОЭС, равным 1,17.

Входящие в (11) параметры $H'_{\text{ш}}$, r_1, r_2, χ определяются в соответствии со следующими выражениями [1, 3, 4]:

$$H'_{\text{ш}} = (0{,}205 \cdot 10^{-16} \cdot N_{\text{экв}})/S_{\text{эл}},$$
$$r_1 = \frac{(\sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot r_{oi})}{\eta}, r_2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot r_{\text{ф}i})}{\eta}, \quad (12)$$
$$\chi = \frac{(\sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot \chi_i)}{\eta}, \eta = \sum_{i=1}^{n} \eta_i,$$

где r_{oi}, $r_{\text{ф}i}$ – спектральные коэффициенты яркости объекта и фона для n значений длин волн λ_i в диапазоне $\Delta\lambda$; χ_i, η_i – спектральные коэффициенты задымленности атмосферы и квантовая эффективность фотоприемника для n значений длин волн λ_i в диапазоне $\Delta\lambda$; $N_{\text{экв}}$ – эквивалентное число шумовых электронов.

При наблюдении объектов в светлое время суток при вычислении величин E_o, $E_{\text{ф}}$, $E_{\text{т}}$ используются выражения [1]:

$$E_o = 0{,}25 \cdot \theta^2 \cdot \tau_0 \Delta_{\text{ш}} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \eta_i \cdot \tau_i \cdot (r_{oi} + \chi_i) E_i,$$
$$E_{\text{ф}} = 0{,}25 \cdot \theta^2 \cdot \tau_0 \Delta_{\text{ш}} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \eta_i \cdot \tau_i \cdot (r_{\text{ф}i} + \chi_i) E_i, \quad (13)$$
$$E_{\text{т}} = 0{,}25 \cdot \theta^2 \cdot \tau_0 \Delta_{\text{ш}} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \eta_i \cdot \tau_i \cdot (E_{\text{p}i} \cdot r_{\text{ф}i} + \chi_i) E_i,$$

где θ, τ_0 – относительное отверстие объектива и коэффициент пропускания оптической системы ОЭС (принимается в среднем $\tau_0 = 0{,}8$); $\Delta_{\text{ш}}$ – шаг дискретизации спектрального диапазона $\Delta\lambda$ (мкм); $\alpha_i = 0{,}5$ при $i = 1$, $i = n$; $\alpha_i = 1$ при $i \neq 1$, $i \neq n$; τ_i – спектральный коэффициент пропускания атмосферы на трассе «инструментальное средство мониторинга (ИСМ) – объект»; E_i, $E_{\text{p}i}$ – спектральная плотность энергетической освещенности земной поверхности и ее составляющей, обусловленной рассеянием солнечной радиации (Вт/м²·мкм).

При ведении мониторинга в ночное время значения интегральных освещенностей изображения объекта E_o и фона $E_{\text{ф}}$ (Вт/м²) определяются согласно выражению [1]:

$$E_{o,\text{ф}} = 0{,}25 \cdot \theta^2 \cdot \tau_0 \cdot \tau_\text{н} \cdot r_{1,2} \cdot E_\text{н},$$
$$\tau_\text{н} = \frac{(\sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot \tau_i)}{\eta}, \quad (14)$$

где $E_\text{н}$ – энергетическая освещенность земной поверхности ночью; $\tau_\text{н}$ – средневзвешенное в диапазоне $\Delta\lambda$ с учетом чувствительности фотоприемника значение коэффициента пропускания атмосферы.

Для расчета значений τ_i, входящих в выражения (13 и 14), вычисляются значения оптической толщины атмосферы на трассе «ИСМ-объект», обусловленной молекулярным $k_{\text{м}i}$ и аэрозольным $k_{\text{A}i}$ рассеянием излучения для заданной длины волны λ_i, по следующим формулам [1]:

$$a_i = \alpha_0 \div (0{,}55/\lambda_i)^4,$$
$$k_{\text{м}i} = a_i \cdot D_\text{н} \cdot \frac{[1 - \exp(-a \cdot h)]}{(a \cdot h)}; \quad (15)$$
$$b_i = 3{,}91 \cdot \frac{\left(\frac{0{,}55}{\lambda_i}\right)^{\left(0{,}585\sqrt[3]{S_\text{M}}\right)}}{S_M}, \quad (16)$$
$$k_{Ai} = b_i \cdot D_\text{н} \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot h)]/(\beta \cdot h);$$

где α_0 и a – показатель молекулярного рассеяния на длине волны 0,55 мкм и коэффициент затухания; β – коэффициент затухания излучения, обусловленного аэрозольным рассеянием, который вычисляется в зависимости от метеорологической дальности видимости S_M (км) по формуле:

$$\beta = 0{,}2 \cdot (6{,}658 - \ln S_M), \quad (17)$$

где h – высота наблюдения относительно поверхности Земли (км).

Затем результирующее значение τ_i определяется с помощью выражения:

$$\tau_i = \exp[-(k_{\text{м}i} + k_{\text{A}i})]. \quad (18)$$

Расчет коэффициента задымленности χ_i атмосферы на длине волны λ_i в диапазоне 0,4…1,1 мкм, входящего в выражение (13), основывается на математических соотношениях, определяющих рассеяние энергии солнечного потока слоем атмосферы, расположенным над подстилающей поверхностью, отражающей по закону Ламберта. Последовательность шагов при вычислении χ_i состоит в следующем.

На основе зависимостей (15–18) определяются значения коэффициентов a_i, α, b_i и τ_i. Затем вычисляются полная оптическая толщина атмосферы k_{oi} в вертикальном направлении и ее составляющие $k_{\text{м}oi}$ и $k_{\text{A}oi}$, обусловленные молекулярным и аэрозольным рассеянием излучения [1]:

$$k_{oi} = k_{\text{м}oi} + k_{\text{A}oi}, k_{\text{м}oi} = \frac{a_i}{\alpha},$$
$$k_{\text{A}oi} = b_i \cdot [1 + (10 \cdot \beta - 1) \cdot \exp\{-5\beta\}]. \quad (19)$$

После этого, используя результаты расчетов k_{oi}, $k_{\text{м}oi}$ и $k_{\text{A}oi}$, значение угла ν_p между направлениями «объект-Солнце» и «объект-ИСМ», определяемого текущими координатами ИСМ и объекта, а также датой и временем ведения наблюдения, вычисляется индикатриса рассеяния в соответствии с выражением:

$$x_{qi} = \frac{\left(0{,}75k_{\text{м}oi} \cdot \left(1 + \cos^2\nu_p\right) + k_{\text{A}oi} \cdot x_A\right)}{k_{oi}},$$

где x_A – параметр, определяемый по справочным таблицам в зависимости от ν_p и $S_\text{м}$,

а также спектральный коэффициент пропускания атмосферы τ_{qi} в направлении «объект-Солнце»:

$$\tau_{qi} = \exp\{-k_{oi}/\sin(h_q)\}, \quad (20)$$

где h_q – относительная высота Солнца (град.).

Кроме этого вычисляется спектральный коэффициент яркости дымки [1]:

$$L_i = x_{pi} \cdot L_{1i} + L_{2i}, \quad (21)$$
$$L_{1i} = \frac{\left(1 - \tau_i \cdot \tau_{qi}\right) \cdot \sin(h_q)}{4 \cdot \left(\sinh_q + \cos\psi\right)}, \quad (22)$$
$$L_{2i} = (C_i - 3Q_i\cos\psi) \cdot (1 - \tau_i) + (3 - x_1) \times$$
$$\times Q_i \cdot k_{oi} \cdot \tau_i + \left(x_1\cos\psi\sinh_q - 3\sin^2 h_q\right)L_{1i}, \quad (23)$$

где ψ – угол визирования объекта из точки расположения ИСМ (град.); x_1 – параметр индикатрисы рассеяния атмосферы, определяемый по справочным таблицам в зависимости от $S_\text{м}$. Коэффициенты Q_i и C_i, входящие в выражение (23), определяются в соответствии с зависимостями вида:

$$Q_i = \frac{(1 - A_i) \cdot P_i\sinh_q}{\left(8 - 2 \cdot k_{oi} \cdot (3 - x_1) \times (1 - A_i)\right)}, \quad (24)$$

где

$$P_i = 1 + 1{,}5\sinh_q + \tau_{qi}\left(1 - 1{,}5\sinh_q\right); \quad (25)$$

A_i – спектральные значения альбедо подстилающей поверхности;

$$\text{C}_i = 0{,}5 \cdot \left(1 + 1{,}5\sinh_q\right) \cdot \sinh_q - 2Q_i. \quad (26)$$

После проведения вычислений в соответствии с (19–26) коэффициент χ_i определяется согласно [1] как:

$$\chi_i = \frac{(1 - A_i) \cdot L_i \cdot (1 - \exp\{-0{,}13h\})}{4Q_i\tau_i K_\text{обл}}, \quad (27)$$

где $K_\text{обл}$ – коэффициент облачности, определяемый с помощью справочных таблиц в зависимости от характеристик облачности и высоты Солнца.

Для оценки показателей эффективности далее необходимо определить интегральные энергетические освещенности E_i и E_{pi}, входящие в выражения (13). Данные величины вычисляются с использованием зависимостей [1, 3, 4]:

$$E_i = \frac{E_{oi} \cdot \left(2P_i \cdot \sinh_q K_\text{обл}\right)}{4 + k_{oi} \cdot (3 - x_1) \times (1 - A_i)}, \quad (28)$$

$$E_{oi} = \frac{7{,}1 \cdot 10^3 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\{2{,}37/\lambda_i\} - 1}, \quad (29)$$

$$E_{pi} = E_i - E_{oi} \cdot \tau_{qi} \cdot \sinh_q, \quad (30)$$

которые определяются с учетом (15–17, 19–20, 24).

Помимо этого, для нахождения вероятностей обнаружения объекта $P_{\text{оо}}$ и его тени $P_{\text{оТ}}$, входящих в выражения (5 и 6), рассмотрим следующие параметры.

1) Коэффициент $N_{\text{о.Т}}$, учитывающий интегрирующие свойства зрительного анализатора [1]:

$$N_{o.T} = \begin{cases} 3{,}6 \cdot \sqrt{l_{\min\,\text{о.Т}}/\Delta l_{\text{о.Т}}} \text{ при } l_{\max\,\text{о.Т}} > 13\Delta l_{\text{о.Т}} \\ \text{и } l_{\min\,\text{о.Т}} < 13\Delta l_{\text{о.Т}}; \\ 13 \text{ при } l_{\min\,\text{о.Т}} \geq 13\Delta l_{\text{о.Т}}; \\ \sqrt{S_{\text{о.Т}}}/\Delta l_{\text{о.Т}} - \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

2) Пространственная частота для объекта $\nu_{\text{о}}$ и его тени $\nu_{\text{Т}}$ (1/мм):

$$\nu_{\text{о.Т}} = \frac{D_{\text{н}}}{2F\sqrt{l_{\max\,\text{о.Т}} \cdot l_{\min\,\text{о.Т}}}}, \quad (31)$$

а также частотно-контрастные характеристики $f_{\text{о.Т}} = f_{1\text{о.Т}} \cdot f_{2\text{о.Т}}$,

$$f_{1\text{о.Т}} = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arccos(X_{\text{о.Т}}) - X_{\text{о.Т}} \cdot \sqrt{1 - X^2{}_{\text{о.Т}}}\right] \quad (32)$$

при $X_{\text{о.Т}} \leq 1$ и 0 при $X_{\text{о.Т}} > 1$.

$$X_{\text{о.Т}} = 5 \cdot 10^{-4} \cdot \nu_{\text{о.Т}} \cdot \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{\theta}, \quad (33)$$

$$f_{2\text{о.Т}} = \left|\frac{\sin\left(\pi \cdot \nu_{\text{о.Т}} \cdot 10^3 \cdot \sqrt{S_{\text{эл}}}\right)}{\pi \cdot \nu_{\text{о.Т}} \cdot 10^3 \cdot \sqrt{S_{\text{эл}}}}\right|. \quad (34)$$

3) Значения параметров $q_{\text{о2}}$ и $q_{\text{Т2}}$, характеризующие отношение сигнал/шум для изображения объекта и тени в соответствии с (28–34):

$$q_{\text{о2.Т2}} = (q_{\text{о1.Т1}} + 3{,}2) \cdot q_{\text{оТ}} \cdot N_{\text{оТ}}. \quad (35)$$

4) Значения параметров $q_{\text{о3}}$ и $q_{\text{Т3}}$, характеризующие отношение сигнал/шум пространственной дискретизации:

$$q_{\text{о3.Т3}} = \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot S_{\text{о.Т}} \cdot F^2}{S_{\text{эл}} \cdot D_{\text{н}}^2}. \quad (36)$$

5) Значения параметров $q_{\text{о}}$ и $q_{\text{Т}}$, на основании выражений (35 и 36), характеризующих воспринимаемое оператором отношение сигнал/шум при дешифровании изображений объекта и его тени, соответственно [1, 3]:

$$q_{\text{о.Т}} = \frac{q_{\text{о2.Т2}} \cdot q_{\text{о3.Т3}}}{\sqrt{q^2{}_{\text{о2.Т2}} + q^2{}_{\text{о3.Т3}}} - 3{,}2}. \quad (37)$$

6) Значения вероятностей $P_{\text{оо}}$ и $P_{\text{оТ}}$ в виде:

$$P_{\text{оо.оТ}} = \Phi(q_{\text{о.Т}}), \quad (38)$$

которые и будут являться частными показателями эффективности.

Применительно к МОЭС среднего и дальнего ИК-диапазонов (3…5 мкм, 8…14 мкм) оценки значений $P_{\text{оо}}$ и Δl_o отличаются.

7) Величина q_1, характеризующая отношение сигнал/шум для участка объекта, равного приведенному к местности элементу разложения фотоприемника:

$$q_1 = \frac{\left|\varepsilon_0 \cdot (t_\phi - t_0) + \eta_p \cdot (\varepsilon - \varepsilon_\phi)\right| \cdot \tau \cdot \tau_0}{\Delta T_0}, \quad (39)$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_\phi$ – коэффициенты теплового излучения объекта и фона; t_0, t_ϕ – температура объекта и фона (°К); ΔT_0 – пороговая чувствительность по температуре (°К); η_p – коэффициент, учитывающий изменение радиационной температуры объекта, обусловленное излучением фона и атмосферы; τ – коэффициент пропускания атмосферы на трассе «ИСМ-объект»; τ_0 – коэффициент пропускания оптической системы.

При этом порядок расчета значения коэффициента τ, входящего в выражение (39), проводится следующим образом. Для длины волны $\lambda = 0{,}5 \times \times (\lambda_1 + \lambda_n)$, где λ_1, λ_n – границы рабочего диапазона МОЭС, по выражению (16) определяется оптическая толщина атмосферы k_A, обусловленная аэрозольным рассеянием излучения. В зависимости от температуры воздуха $t_{\text{в}}$, высоты наблюдения h и угла визирования ψ определяются плотность $a_{\text{н}}$ насыщенных водяных паров (г/м^3), коэффициент пропускания слоя воды $\tau_{\text{в}}$ на трассе «ИСМ-объект» и коэффициент изменения пропускания водяных паров K на трассе «ИСМ-объект», соответственно.

8) Коэффициент пропускания атмосферы на трассе [1]:

$$\tau = \tau_{\text{в}} \cdot \exp\left\{-k_A - \frac{K \cdot (a_{\text{н}} \cdot r)^{0{,}69}}{1000}\right\}. \quad (40)$$

9) Линейное разрешение на местности Δl_o (м):

$$\Delta l_0 = \delta_{\text{э}} \cdot \frac{D_{\text{н}}}{W}, \quad (41)$$

где $\delta_{\text{э}}$ – элементарное поле зрения (мрад); W – коэффициент, учитывающий ухудшение предельного линейного разрешения вследствие вносимых элементами ИСМ (объектив, приемник излучения, электронный блок обработки сигнала и т. д.) искажений, который рассчитывается в соответствии с выражением:

$$W = \begin{cases} 0{,}2 \text{ при } q_1 \leq 1; \\ \dfrac{\left(\sqrt{18{,}5 + 23{,}6 \cdot \ln q_1} - 2{,}15\right)}{11{,}8} \\ \text{при } 1 < q_1 < 400; \\ 0{,}9 \text{ при } q_1 \geq 400. \end{cases}. \quad (42)$$

10) Величина, характеризующая отношение сигнал/шум для изображения объекта:

$$q = q_1 \cdot N_0 - 3{,}2. \quad (43)$$

11) Вероятность обнаружения объекта:

$$P_{оо} = \Phi(q). \quad (44)$$

В основу методики оценки показателя захвата МОЭС $L_{эф}$, представляющего собой полосу местности, в пределах которой обеспечивается обнаружение или распознавание заданного класса объектов с вероятностью не ниже заданной, положена функциональная связь между значениями указанных вероятностей и линейным разрешением на местности, обеспечиваемым МОЭС. Данная зависимость описывается аналитическим выражением (6) с учетом соотношений (35, 37, 38, 43, 44).

Таким образом, показатель $L_{эф}$ можно рассматривать как полосу местности, в пределах которой обеспечивается линейное разрешение не хуже требуемого граничного значения $\Delta l_{гр}$, соответствующего граничному значению вероятности обнаружения или распознавания.

Необходимо отметить [1–4], что по опыту эксплуатации БПЛА дистанционного мониторинга должны обеспечивать высокую детальность и достоверность добываемой информации. В связи с этим основной задачей, которая должна решаться с использованием МОЭС, является распознавание объектов мониторинга до типа или класса с вероятностью не ниже 0,9. Это обусловливает требование по обеспечению надежного обнаружения объекта ($P_{оо} = 1$) практически для всего многообразия задач и условий применения.

В соответствии с (6), при $P_{оо} = 1$ и $P_{ор} = 0{,}9$ значение $\Delta l_{гр}$ может быть определено с помощью следующего соотношения:

$$\Delta l_{гр} = \frac{0{,}367 \cdot S_0}{\sqrt{G_0 \cdot r_0}}, \quad (45)$$

где S_0, G_0, r_0 – параметры проекции объекта на плоскость, перпендикулярную линии визирования ОЭС, приведенные в выражении (7).

Таким образом, значение $\Delta l_{гр}$ определяется геометрическими размерами объекта (его основных демаскирующих элементов). Анализ характеристик объектов наблюдения позволил сформировать требования к соответствующим значениям $\Delta l_{гр}$, которые для некоторых объектов наблюдения представлены в таблице 1.

Как следует из (9, 41), выражение для функции, описывающей зависимость эффективной горизонтальной дальности $D_{эф}$, на которой обеспечивается значение линейного разрешения на местности в картинной плоскости (перпендикулярной оси визирования), равное $\Delta l_{гр}$, от высоты наблюдения h, может быть представлено в виде [1]:

$$D_{эф} = \sqrt{R^2 - h^2}, \quad (46)$$

где $R = \Delta l_{гр} \cdot F \cdot \sqrt{\frac{\Phi(q_{o1})}{S_{эл}}}$ для ОЭС диапазона 0,4...1,7 мкм и $R = \Delta l_{гр} \cdot \frac{W}{\delta_э}$ для ОЭС диапазонов 3...5 мкм и 8...14 мкм и имеющий физический смысл максимальной частоты съемки, при которой обеспечивается значение линейного разрешения на местности не более $\Delta l_{гр}$.

В качестве примера на рисунке 3 представлены нормированные зависимости для объекта «человек» и двух значений метеорологической дальности видимости (МДВ): S_m = 1 км и S_m = 20 км, полученные в соответствии с изложенным выше методическим подходом. В качестве ОЭС рассмотрены ТВ- (ИК-) канал с углом поля зрения 4,5° и цифровая аэрофотосистема с углом 60°.

Согласно рисунку 3, с уменьшением МДВ значения показателя эффективных захватов снижаются, а оптимальная высота наблюдения для узкоугольной системы увеличивается при соответствующем уменьшении углов визирования. Для ЦАФС оптимальная высота наоборот уменьшается. В соответствии с данным подходом могут быть определены значения максимального эффективного захвата ОЭС для оптимальных высот съемки при заданном $R_{гр}$. В качестве обобщенного показателя рассмотрено усредненное значение максимальных эффективных захватов на множестве значений $R_{гр}$ из указанного выше диапазона $L_{эфф\ ср}$.

ТАБЛИЦА 1. Требуемые значения линейного разрешения на местности для распознавания объектов наблюдения, м

TABLE 1. Required Values of Linear Resolution on the Ground for Recognizing Objects of Observation, m

Типовые объекты наблюдения	Угол визирования, град.														
	0			45			60			80			85		
	Требуемая вероятность распознавания														
	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95
Человек (группа людей)	0,08	0,06	0,04	0,12	0,08	0,06	0,12	0,08	0,056	0,11	0,076	0,05	0,11	0,07	0,05
Автомобиль типа «КамАЗ»	0,57	0,4	0,27	0,87	0,6	0,42	0,88	0,6	0,42	0,81	0,56	0,39	0,8	0,55	0,38
Сверхмалое плавсредство	0,17	0,12	0,08	0,31	0,21	0,15	0,32	0,22	0,15	0,31	0,21	0,15	0,3	0,21	0,15
Малое плавсредство	1,79	1,23	0,86	2,45	1,69	1,18	2,42	1,66	1,16	2,16	1,49	1,04	2,06	1,42	0,99
Среднее плавсредство	2,9	2,0	1,39	3,25	2,23	1,56	3,0	2,07	1,44	2,39	1,64	1,15	2,18	1,5	1,04

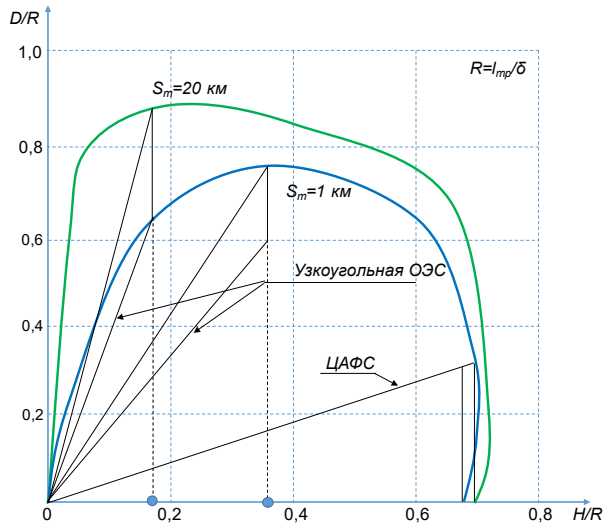

Рис. 3. График нормированной зависимости эффективной дальности от высоты наблюдения для объекта типа «человек»

Fig. 3. Graph of the Normalized Dependence of the Effective Distance from the Observation Height for a «Person» Object

Опираясь на данный показатель, был проведен статистический анализ его зависимости от массы, соответствующий ОЭС, и получены кривые регрессии, которые позволили оценить максимально достижимый в настоящее время уровень разведывательных возможностей ОЭС при различных ограничениях на массу полезной нагрузки на борту БПЛА. Анализу подверглись данные по более, чем 100 образцам современных и разрабатываемых отечественных и зарубежных ОЭС указанных выше классов. Результаты полученных оценок представлены на рисунках 4 и 5 соответственно для одно-, двух-, трех- и четырехканальных ОЭС и ЦАФС [1].

При этом на рисунках кривыми 1 отмечены зависимости, соответствующие средствам (каналам) видимого спектра, кривыми 2 – среднего или дальнего ИК-диапазонов (см. рисунок 4a). Кроме того, на рисунке 4c кривой 3 отмечена зависимость, соответствующая каналу ближнего ИК-диапазона (0,9…1,7 мкм), кривой 4 – УФ-каналу. Как следует из представленных графиков, зависимости показателя эффективности для всех классов, рассмотренных ОЭС, имеют монотонно возрастающий характер с увеличением их массы. Вместе с тем, производная этих зависимостей имеет обратную тенденцию, т. е. уменьшается с ростом массы ОЭС.

Это в значительной степени отражает общую тенденцию в развитии ОЭС воздушной разведки и наблюдения, которая заключается в приближении характеристик средств оптического диапазона в ближайшей перспективе к некоторому физическому пределу. В частности, это связано с достижением дифракционного предела в оптических системах ОЭС как видимого, так и ИК-диапазонов.

Как показали исследования, проведенные в [1, 4], предельно достижимые характеристики по температурной чувствительности ΔT и эффективному элементарному полю зрения δ ИК-средств (каналов), построенных с использованием фотонных охлаждаемых и тепловых неохлаждаемых матричных приемников излучения, работающих как в среднем (3…5 мкм), так и в дальнем (8…14 мкм) ИК-диапазонах, характеризуются по параметру ΔT значениями 0,001…0,3 и по параметру δ значениями 0,02…0,05 (таблица 2).

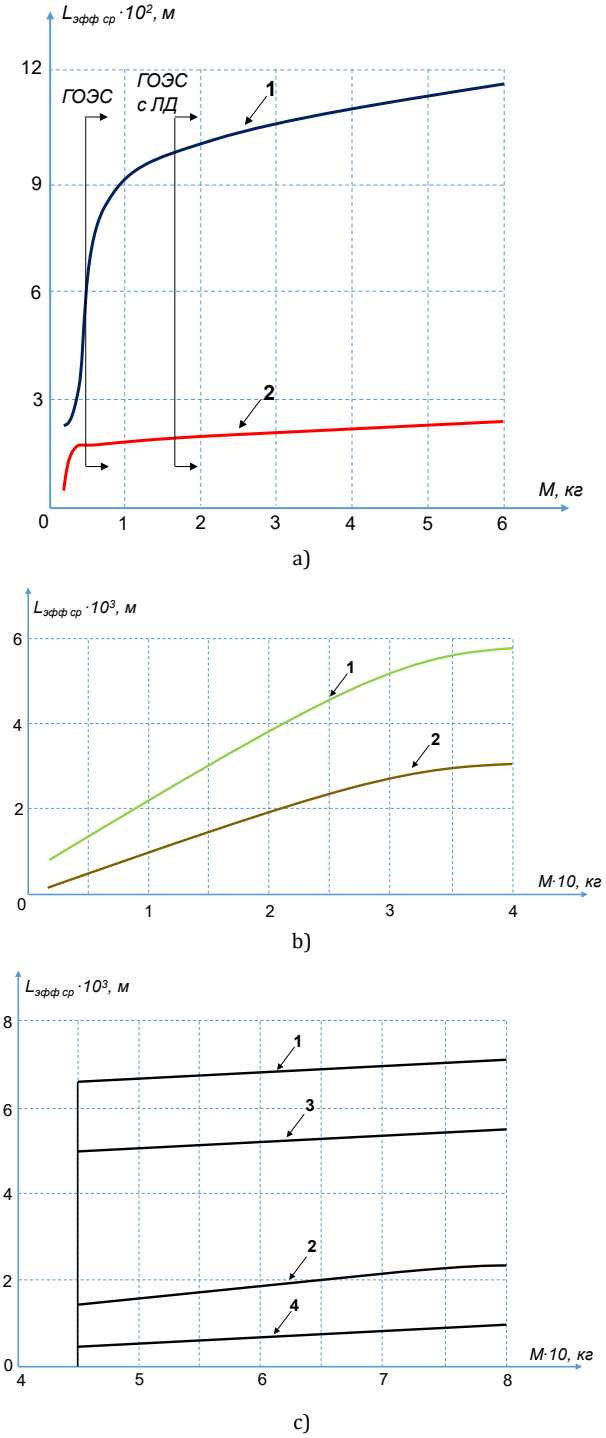

Рис. 4. График достижимых уровней эффективности одноканальных (a), двухканальных (b) и многоканальных (c) ОЭС

Fig. 4. Chart of Achievable Performance Levels Single-Channel (a), Two-Channel (b) and Multi-Channel (c) Optoelectronic Systems

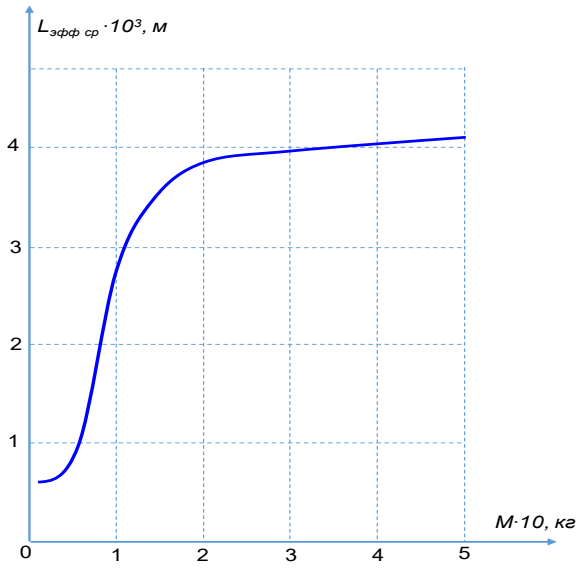

Рис. 5. График достижимых уровней эффективности ЦАФС

Fig. 5. Graph of Achievable Performance Levels of the Digital Aerial Photo System

ТАБЛИЦА 2. Предельно достижимые параметры ИК-средств

TABLE 2. The Maximum Achievable Parameters of the IR-Tools

Δλ, мкм	ΔT, К		δ, мрад
	Фотонный МПИ	Тепловой МПИ	
3…5	0,006	0,3	0,02
8…14	0,001	0,006	0,05

Поскольку значения ΔT для ИК-систем с неохлаждаемыми тепловыми матричными приемниками излучения (МПИ) для $\lambda = 3\ldots5$ мкм слишком велики, указанные системы на этих МПИ имеет смысл разрабатывать лишь на диапазонах 8…14 мкм [1].

Сравнительная оценка эффективности ведения разведки с применением ИК-средств (каналов), работающих в одном из указанных выше спектральных диапазонов, показала существенную зависимость преимуществ того или иного канала от условий ведения съемки. Например, для достаточно большой МДВ и сравнительно невысокой турбулентности атмосферы использование ИК-системы диапазона $\lambda = 8\ldots14$ мкм, для значений температуры фона $t > -(25\ldots30)$ °С [1]. Причем первый диапазон при прочих равных условиях тем предпочтительнее, чем меньше размеры МПИ, больше абсолютная влажность воздуха и высота БПЛА, на котором установлена ИК-система, ниже и тяжелее облачность (ночью).

В условиях задымленности атмосферы (МДВ менее 1…2 км) или при ее высокой турбулентности, или при температуре фона $t < -(25\ldots30)$ °С использование в ИК-системе второго диапазона спектра обеспечивает большую дальность действия по сравнению с использованием первого диапазона. К этому следует добавить, что видимый контраст объектов разведки по-разному изменяется в течение суток для указанных спектральных диапазонов. Так, для многих объектов в виде наземных транспортных средств (автомобили, БТР), покрытых эмалью защитного цвета, на фоне зелени днем контраст объектов выше в первом диапазоне, по сравнению со вторым, а ночью – наоборот. Таким образом, для поддержания высокой эффективности ИК-системы независимо от условий ее применения, в принципе, целесообразно разрабатывать двухспектральные или адаптивные системы с перестраиваемым спектральным рабочим диапазоном.

Подавляющее большинство существующих и разрабатываемых ОЭС являются системами «кадрового типа» и предназначены для размещения на малоскоростных БПЛА, которым соответствуют сравнительно небольшие значения W/H (до 0,35 1/с). При размещении таких ОЭС на скоростных БПЛА с крейсерской скоростью полета до 900 км/час (W/H до 0,85 1/с), разработка которых возможна в ближайшей перспективе, их применение может осуществляться только с высоты не ниже 700 м при плановой съемке (угол визирования равен 0°) и 350 м при перспективной съемке с углом визирования до 60°, что не обеспечивает решение большинства задач разведки (наблюдения).

Для обеспечения ведения оптико-электронной разведки (наблюдения) с борта скоростного БПЛА наиболее предпочтительными являются системы «строчного» типа.

Следует отметить, что представленные в статье результаты анализа достижимых в ближайшей перспективе уровней эффективности разведывательных ОЭС различных классов основаны на оценках потенциальных возможностей этих средств по получению информации на борту, т. е. без учета пропускной способности штатных систем информационного обмена, которые могут быть включены в состав бортового оборудования и наземного комплекса средств приема, передачи и обработки информации. Вместе с тем, пропускная способность широкополосных радиоканалов комплексов с БПЛА в ряде случаев может быть меньше информационной производительности установленных на их борту ОЭС.

Для обеспечения максимальной эффективности получения информации в комплексе при ведении оптико-электронной разведки (наблюдения) необходима реализация мер по уменьшению объема передаваемой информации, в первую очередь, путем устранения избыточности. При этом приемлемый уровень производительности информационного обмена может достигаться не только с применением алгоритмов сжатия информации, но также и с применением других организационно-технических методов.

3. Получение данных от бортовой РЛС

Дистанционный мониторинг с применением БПЛА может производиться с использованием радиолокационных станций (РЛС) высокого разре-

шения, построенных на принципах синтезирования апертуры антенны (РСА, *аббрев. от* Радиолокационное Синтезирование Апертуры) [1, 32–36].

В качестве показателей эффективности мониторинга с использованием радиолокационных средств наблюдения будем использовать показатели, аналогичные рассмотренным в п. 2 применительно к мониторингу ОЭС. Особенности оценки указанных показателей применительно к РСА обусловлены существенным отличием физических процессов формирования и обработки радиолокационной информации в бортовой и наземной подсистемах комплекса с БПЛА по сравнению с соответствующими процессами применительно к ОЭС/МОЭС [1, 3–4]. При этом будем полагать, что формирование радиолокационного изображения поверхности Земли и объектов осуществляется при работе РСА в режиме бокового обзора. Схема методики оценки эффективности комплекса с БПЛА при мониторинге заданного района с помощью радиолокационных средств представлена на рисунке 6 [1].

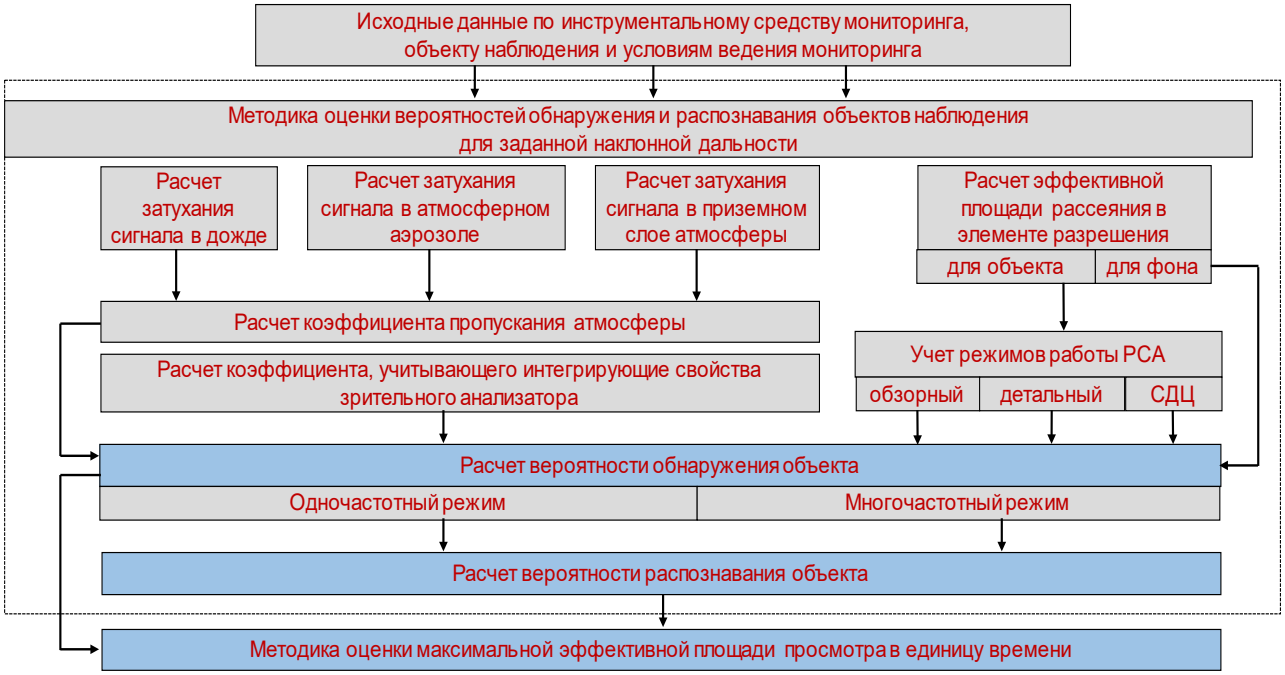

Рис. 6. Схема методики оценки эффективности комплекса с БПЛА при мониторинге заданного района с помощью радиолокационных средств

Fig. 6. Scheme of the Method for Evaluating the Effectiveness of the Complex with UAVs When Monitoring a Given Area Using Radar

При рассмотрении методики будем использовать три блока исходных параметров [1].

1. Блок параметров, относящихся к ИСМ:

– рабочая длина волны;
– разрешающая способность;
– коэффициент когерентного накопления;
– пороговая чувствительность;
– ширина диаграммы направленности антенны;
– среднее значение угла ориентации диаграммы направленности антенны относительно направления движения носителя;
– полоса захвата;
– максимальная дальность наблюдения;
– диапазон высот применения.

2. Блок параметров, относящихся к объекту наблюдения:

– геометрические размеры объекта и его основных элементов;
– эффективная площадь рассеяния;
– высота расположения объекта над уровнем моря;
– максимальная (средняя) скорость перемещения объекта;
– требуемый уровень подробности распознавания объекта (вид, класс, тип).

3. Блок параметров, относящихся к условиям ведения мониторинга:

– удельная эффективная площадь рассеяния подстилающей поверхности;
– время года;
– уровень флуктуации радиолокационного изображения;
– скорость полета БПЛА;
– угол между векторами скоростей движения БПЛА и объекта наблюдения;
– горизонтальная дальность до объекта наблюдения;
– высота полета БПЛА;
– средняя высота деревьев;
– степень закрытости местности;
– средняя приземная интенсивность дождя;
– средняя водность тумана;

– протяженность участка трассы в зоне дождя;
– протяженность участка трассы в зоне тумана.

Также, как и для МОЭС, в качестве основных параметров, характеризующих возможности РЛС, приняты вероятность обнаружения $P_о$ или распознавания $P_р$ объекта наблюдения. При этом вероятность $P_о$ рассчитывается:

– для одночастотных режимов работы РСА (обзорного, детального, селекции движущихся целей (СДЦ) согласно выражению [1, 32–36]:

$$P_о = \Phi(x), \tag{47}$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности, соответствующий выражению (10); x – параметр обнаружения;

– для многочастотного режима работы РСА в соответствии с выражением [1, 32–36]:

$$P_о = 1 - \prod_{i=1}^{k}(1 - P_{oi}), \tag{48}$$

где P_{oi} – вероятность обнаружения объекта при использовании зондирующих колебаний с i-ой длиной волны (i = 1, 2, …, k).

Порядок расчета P_{oi} аналогичен расчету для одночастотных режимов работы РСА.

Параметр обнаружения x рассчитывается в соответствии с выражением вида [1, 32–36]:

$$x = \frac{\left|\sigma_{о1} - \sigma_{ф1}\right|}{\left(\sigma_{пор} + \tau \cdot \sigma_1\right) \cdot \left(\frac{J}{\sqrt{2 \cdot d}}\right) \cdot \tau N_0} - 3{,}2, \tag{49}$$

где $\sigma_1 = \min\{\sigma_{о1}, \sigma_{ф1}\}$, $\sigma_{о1}$ – эффективная площадь рассеяния объекта, соответствующая элементу разрешения (м^2); $\sigma_{ф1}$ – эффективная площадь рассеяния фона, соответствующая элементу разрешения (м^2); $\sigma_{пор}$ – пороговая чувствительность (м^2), принимается равной 0,1 м^2; J – коэффициент некогерентного накопления (принимается равным 8 для РСА сантиметрового диапазона); d – коэффициент, учитывающий относительный уровень флуктуаций радиолокационного изображения и лежащий в пределах от 0,7 (для объектов и фонов с преобладанием диффузного характера рассеяния сигнала) до 1,5 (для объектов и фонов со сложным рельефом, создающим большое количество точек зеркального отражения); τ – коэффициент пропускания атмосферы на трассе «ИСМ-объект наблюдения»; N_0 – коэффициент, учитывающий интегрирующие свойства зрительного анализатора.

Эффективная площадь рассеяния объекта, соответствующая элементу разрешения и входящая в (49), рассчитывается в зависимости от режима обзора и определяется [1] следующим образом:

– для обзорного и детального режимов (одночастотных и многочастотных):

$$\sigma_{о1} = \begin{cases} \sigma_{ор} + \sigma_{ф1} \cdot \dfrac{\Delta S_0 - S_0}{\Delta S_0}, & \text{при } l_1 \le \Delta l; \\ \sigma_{ор} \cdot \dfrac{\Delta S_0}{S_0}, & \text{при } l_2 \ge \Delta l; \\ \sigma_{ор} \cdot \dfrac{\Delta l}{l_1} + \sigma_{ф1} \cdot \dfrac{\Delta S_0 - l_2 \Delta l}{\Delta S_0}, & \\ \text{при } l_1 \ge \Delta l \text{ и } l_2 \le \Delta l; & \end{cases} \tag{50}$$

– для режима СДЦ (при селекции малоскоростных объектов) как произведение соответствующих значений, полученных с помощью выражений (50), на величину $\left[V_{rц}/(V_t \cdot \theta_0)\right]^2$.

При этом входящие в выражение (50) величины имеют следующий смысл: $\sigma_{ор}$ – эффективная площадь рассеяния объекта с учетом влияния поглощающих свойств леса (м^2); ΔS_0 – площадь элемента разрешения РСА (м^2); S_0 – площадь объекта наблюдения (м^2); $V_{rц}$ – радиальная скорость движения объекта наблюдения (км/ч); V_t – тангенциальная скорость движения БПЛА (км/ч); l_1, l_2 – длина и ширина объекта наблюдения (м); Δl – линейная разрешающая способность РСА (м); θ_0 – ширина диаграммы направленности антенны (град.).

В свою очередь, эффективная площадь рассеяния объекта [1, 21–24] определяется по формуле:

$$\sigma_{ор} = \sigma_о \cdot K_л, \tag{51}$$

где $\sigma_о$ – эффективная площадь рассеяния объекта (м^2); $K_л$ – коэффициент, учитывающий уменьшение отраженного от объекта излучения за счет поглощающих свойств леса.

Коэффициент $K_л$ определяется в соответствии с выражением [1]:

$$K_л = 10^{-\alpha}, \quad \alpha = (0{,}1 \cdot H_л/\cos\psi) \cdot T_л^{(1-\lambda/3)} \cdot 0{,}368^{\lambda}, \tag{52}$$

где $T_л$ – параметр, характеризующий маскирующие свойства леса; λ – рабочая длина волны РСА (см); $H_л$ – средняя высота деревьев (м); ψ – угол визирования объекта из точки расположения ИСМ (град.).

В предположении одинаковости величин разрешения РСА по дальности и линейному разрешению по азимуту площадь элемента разрешения РСА ΔS_0 и площадь объекта S_0, входящие в соотношение (50), определяются согласно выражениям [1]:

$$\Delta S_0 = \pi \cdot \Delta l^2/4; \tag{53}$$

$$S_0 = l_1 \cdot l_2. \tag{54}$$

Тангенциальная скорость движения БПЛА V_t и радиальная скорость движения объекта наблюдения $V_{rц}$, входящие в приведенное выше выражение для множителя, используемого при определении величин $\sigma_{о1}$ в режиме СДЦ, рассчитывается как:

$$V_t = V_н \cdot \sin\theta_н; \quad (55)$$

$$V_{rц} = V_ц \cdot \cos\theta_{дц}; \quad (56)$$

$$\theta_{дц} = \theta_н - \theta_{зад}, \quad (57)$$

где $V_н$ – скорость движения БПЛА-носителя РСА (км/ч); $V_ц$ – скорость движения объекта наблюдения (км/ч); $\theta_н$ – среднее значение угла ориентации диаграммы направленности антенны относительно направления движения БПЛА (град.); $\theta_{дц}$ – угол между вектором скорости движения объекта наблюдения и вектором ее радиальной составляющей (град.); $\theta_{зад}$ – угол между вектором скорости движения БПЛА и вектором скорости движения объекта наблюдения (град.).

Эффективная площадь рассеяния фона, соответствующая элементу разрешения $\sigma_{ф1}$ и входящая в (50), определяется также в зависимости от режима работы РСА и рассчитывается следующим образом [1, 32–36]:

– для обзорного и детального режимов (одночастотных и многочастотных):

$$\sigma_{ф1} = \sigma_{0ф} \cdot \Delta S_o, \quad (58)$$

– для режима СДЦ (при селекции малоскоростных объектов):

$$\sigma_{ф1} = 0. \quad (59)$$

При этом коэффициент пропускания атмосферы на трассе «ИСМ-объект наблюдения», входящий в выражение (49), определяется в соответствии с выражением:

$$\tau = \exp\{-0{,}46 \cdot (\gamma_Д + \gamma_Т + \gamma_А)\}, \quad (60)$$

где $\gamma_Д$, $\gamma_Т$, $\gamma_А$ – затухание сигнала в дожде, в атмосферном аэрозоле и в поглощающем слое атмосферы (дБ).

Затухание сигнала в зоне дождя $\gamma_А$ рассчитывается по формуле:

$$\gamma_Д = \eta_Д \cdot D_{ДТ}, \quad (61)$$

где $\eta_Д$ – среднее удельное затухание сигнала на участке трассы в зоне дождя (дБ/км); $D_{ДТ}$ – протяженность участка трассы в зоне дождя (км), определяемая по данным метеорологических наблюдений и сводок [1, 32–36].

В свою очередь, среднее удельное затухание сигнала на участке трассы в зоне дождя, входящее в выражение (61) определяется формулой:

$$\eta_Д = \exp\{3{,}25 + \beta \cdot \ln J_Д - 21{,}43 \cdot f^{-0{,}43}\}, \quad (62)$$

где

$$\beta = 4 - 2{,}27 f^{0{,}081};$$

$$J_Д = 0{,}5 \cdot J_0 \cdot (1 + \exp(-0{,}385 h^2));$$

J_0 – средняя приземная интенсивность дождя (мм/ч); f – рабочая частота РСА (МГц).

Коэффициент затухания $\gamma_Т$ сигнала в зоне тумана определяется по формуле:

$$\gamma_Т = \eta_Т \cdot D_{ТТ}, \quad (63)$$

где $\eta_Т$ – среднее удельное затухание сигнала на участке трассы в зоне тумана (дБ/км); $D_{ТТ}$ – протяженность участка трассы в зоне тумана (км), определяемая по данным метеорологических наблюдений и сводок.

Величина среднего удельного затухания $\eta_Т$ сигнала на участке трассы в зоне тумана определяется согласно выражению:

$$\eta_Т = 4{,}9 \cdot 10^{-10} \cdot M_T \cdot f^2, \quad (64)$$

где M_T – средняя водность зоны тумана (г/м^3).

При отсутствии на трассе «ИСМ-объект наблюдения» области метеообразований принимается, что коэффициенты $\gamma_Д = 0$ и $\gamma_Т = 0$.

Затухание сигнала в атмосфере, определяемое коэффициентом [1, 22, 24] $\gamma_А$:

$$\gamma_А = \left[\frac{D_A}{N_2 - N_1 + 1}\right] \sum_{i=N_1}^{N_2} \eta_i, \quad (65)$$

где D_A – протяженность участка трассы в пределах поглощающего слоя атмосферы (км); N_1, N_2 – порядковые номера поглощающих слоев атмосферы, в которых находятся соответственно объект наблюдения и РСА, ведущий съемку; η_i – удельное затухание сигнала в i-ом высотном слое атмосферы (дБ/км).

В свою очередь, протяженность участка трассы в пределах поглощающего слоя атмосферы D_A определяется выражением:

$$D_A = \sqrt{D^2 + (h_2 - h_1)^2}, \quad (66)$$

где D – дальность до поверхности Земли между объектом наблюдения и ИСМ (км); h_1 – высота объекта наблюдения над уровнем моря (км); h_2 – высота ИСМ над уровнем моря (км).

При этом номера слоев атмосферы N_1, N_2, входящие в (65) и соответствующие высотам h_1 и h_2, определяются выражением:

$$N_x = 1 \text{ при } h_x \le 0{,}5 \text{ км};$$

$$[h_x/2] + 2 \text{ при } 10 > h_x > 0{,}5 \text{ км}, \quad (67)$$

где символ [•] символизирует операцию взятия целой части числа; x – индекс, устанавливающий соответствие между номерами слоев и их высотой и принимающий соответственно значения 1 и 2.

Коэффициент, учитывающий интегрирующие свойства зрительного анализатора [1], рассчитаем по формуле:

$$N_o = \begin{cases} 3{,}6 \cdot \sqrt{l_2/\Delta l} \text{ при } l_1 > 13\Delta l \text{ и } l_2 < 13\Delta l; \\ 13 \text{ при } l_2 \ge 13\Delta l; \\ \sqrt{S_0}/\Delta l \text{ в остальных случаях.} \end{cases}.$$

В результате вероятность распознавания объекта наблюдения [1] определяется как:

$$P_p = P_o \cdot P_{p\phi}, \quad (68)$$

где $P_{p\phi}$ – вероятность определения формы объекта наблюдения при условии его обнаружения.

В соответствии с (68) для определения вероятности P_p первоначально необходимо определить вероятность P_o, опираясь на соотношения (47–67), а также вероятность $P_{p\phi}$.

Если вероятность $P_o \leq 0{,}1$, то дальнейшие расчеты проводить нецелесообразно, поскольку определение формы (вероятности $P_{p\phi}$) в данных условиях невозможно. В результате принимается $P_p = 0$.

Вероятность определения формы объекта наблюдения при условии его обнаружения определяется по формуле:

$$P_{p\phi} = \exp\{-0{,}64 \cdot Z_\phi\}, \quad (69)$$

где Z_ϕ – параметр распознавания объекта, который определяется в соответствии с выражением [1]:

$$Z_\phi = \frac{(l_1 + l_2) \cdot \left(\sqrt{l_1^2 + l_2^2} + l_2\right) \cdot \Delta l^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (l_1^2 + l_2^2)}. \quad (70)$$

Заключение

В данной статье представлен методический подход нахождения показателей эффективности решения частных целевых задач радиосвязи и дистанционного мониторинга комплексом с БПЛА по единому выбранному критерию – вероятности решения целевой задачи, функционально зависящей от заложенных проектных параметров и структуры разрабатываемой аппаратуры целевой нагрузки. Данный методический подход позволяет уже на этапе предпроектной работы (например, этапе аванпроекта) оценить эффективность решения сначала частных целевых задач (по отдельности каждую задачу), а потом и интегрально в наборе все поставленные целевые задачи, с учетом требований, прописанных в тактико-техническом задании. При этом такие параметры самолета, как масса, энергопотребление, эволюции БПЛА и т. д. находятся в ограничительных критериях и учитываются при выборе того или иного схемотехнического решения.

1) При решении частной целевой задачи связи БПЛА с мобильными группами, потребителями целевой фото- и видеоинформации, передача информации производится с использованием широко апробированных сигнально-кодовых конструкций на основе фазовой модуляции или квадратурной амплитудной модуляции с применением методов избыточного кодирования (турбокоды, коды Рида – Соломона, сверточные коды) [2, 8, 21].

Также необходимо отметить, что в данном случае возможно применение современных OFDM-сигналов, которые имеют ряд преимуществ по сравнению со схемой сигнала с одной несущей. Основным преимуществом OFDM-сигналов является способность противостоять сложным условиям в канале – бороться с узкополосными помехами и частотно-избирательным затуханием, вызванным многолучевым характером распространения, без использования сложных фильтров-эквалайзеров. Канальная эквализация упрощается вследствие того, что OFDM-сигнал может рассматриваться как множество медленно модулируемых узкополосных сигналов, а не как один быстро модулируемый широкополосный сигнал. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольную интерференцию.

Описанные выше сигнально-кодовые конструкции позволяют передавать информацию в реальном масштабе времени со скоростями в десятки мегабит в секунду.

2) В состав ОЭС воздушной разведки и наблюдения, как правило, входят: одноканальные ОЭС видимого/ИК-диапазонов, включая ОЭС на гиростабилизированной платформе (ГОЭС) со сменными вариантами информационных каналов, а также одноканальные ОЭС видимого/ИК-диапазонов с лазерным дальномером; двухканальные ГОЭС видимого и ИК-диапазонов, в том числе с лазерным дальномером/целеуказателем; трех-, четырехканальные ГОЭС УФ-, видимого, ИК-(ближнего, среднего, дальнего) диапазонов с лазерным дальномером/целеуказателем; цифровая аэрофотосистемы (одноканальные и многоканальные).

3) В качестве фотоприемных устройств, являющихся одним из основных элементов современных ОЭС, определяющих их функциональные возможности, используются, главным образом, матричные приемники излучения, работающие в различных областях спектра от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной (14 мкм). Разрешение МПИ (количество пикселей, из которых состоит МПИ), представляющее одну из основных его характеристик, лежит в широких пределах для ОЭС различных весовых классов, составляя 0,3…0,8 Мп для систем, работающих в среднем и дальнем ИК-диапазонах, 4 Мп для систем видимого и ближнего ИК-диапазона, а также для систем, работающих в УФ-области спектра и достигая максимальных значений для цифровых топографических камер, составляющих 35…40 Мп для среднеформатных и 135…180 Мп для крупноформатных камер.

4) Основными направлениями повышения эффективности бортовых РЛС являются: существенное расширение функциональных возможностей, достижение высокого уровня информативности, повышение интеллектуальных качеств и степени автоматизации, повышение скрытности и улучшение помехоустойчивости, интеграция с другим радиоэлектронным оборудованием из состава БПЛА, обеспечение работы в составе многопозиционных радиолокационных систем, радикальное усиление

роли цифровых методов обработки информации и формирования зондирующих сигналов.

5) Дальнейшее повышение эффективности применения бортовых РЛС БПЛА может быть достигнуто за счет использования в различных режимах их функционирования многочастотных и сверхкоротких импульсных сигналов; поляризационных характеристик функции отражения; процедур интерферометрической съемки земной поверхности; принципов многопозиционной радиолокации, траекторного управления наблюдением и инверсного синтезирования; усовершенствованных алгоритмов обнаружения движущихся наземных целей; совмещения радиолокационной карты с цифровой картой местности; слияния данных от различных информационных источников (датчиков); автоматизации процессов идентификации и распознавания целей.

6) Внедрение активных фазированных антенных решеток привело к информационному и технологическому скачку в развитии бортовых РЛС БПЛА и способствовало существенному улучшению всех основных ее показателей, значительному повышению информативности. Стремительный прогресс в развитии вычислительной техники способствует широкому внедрению в РЛС цифровых методов обработки информации, формирования сигналов и управления. В результате системы цифровой обработки все больше превращаются в центральное ядро РЛС.

7) Бортовые радиолокационные системы современных БПЛА должны строиться по модульному принципу с «открытой архитектурой». «Открытая архитектура», широкое применение цифровых методов обработки и формирования зондирующих сигналов позволяют достаточно просто адаптировать и наращивать функциональные возможности РЛС, улучшать ее тактические показатели за счет замены конструктивно законченных модулей на более совершенные, проводить в случае необходимости модернизацию аппаратуры, а также приспосабливать РЛС к оборудованию носителя. Кроме того, имеется возможность компоновать аппаратуру РЛС модулями и блоками, оптимизированными по массогабаритным и стоимостным характеристикам под задачи, решаемыми конкретными типами БПЛА.

Список используемых источников

1. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х книгах. М.: Радиотехника, 2016. 1352 с.

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

3. Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.

4. Ростопчин В.В. Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки. URL: http://www.uav.ru/articles/basic_uav_efficiency.pdf (дата обращения 23.06.2020)

5. Долженков Н.Н., Абрамов А.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г. Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата. Патент на полезную модель RUS 191165 от 26.07.2019. Бюл. № 21.

6. Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19–26. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26

7. Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37–48. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48

8. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Литвиненко В.П., Великоиваненко В.И. и др. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 5. С. 52–71.

9. Пантенков Д.Г., Ломакин А.А. Оценка устойчивости спутникового канала управления беспилотными летательными аппаратами при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 11(17). С. 43–50. DOI:10.18127/j00338486-201911(17)-04

10. Долженков Н.Н., Пантенков Д.Г., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Литвиненко В.П., Великоиваненко В.И., Лю-Кэ-Сю Е.Ю. Технические характеристики комплекса средств спутниковой радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 74–82.

11. Долженков Н.Н., Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Ломакин А.А., Егоров А.Т., Гриценко А.А. Интегрированный комплекс дальней радиосвязи для повышения эффективности решения целевых задач беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 102–108. DOI:10.25987/VSTU.2019.15.3.015

12. Пантенков Д.Г. Результаты анализа наземных испытаний комплекса средств спутниковой радиосвязи для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 42–51.

13. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности). М.: Радиотехника, 2005. 304 с.

14. Моисеев В.С., Тутубалин П.И. К проблеме обеспечения информационной безопасности беспилотных авиационных комплексов // VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации,

наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2011, Казань, Россия, 12–14 октября 2011). Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2011. Т. 2. С. 324–331.

15. Моисеев В.С. Основные направления решения проблем теории и практики российской беспилотной авиационной техники // Международная научно-практическая конференция «Современные технологии, материалы, оборудование и ускоренное восстановление квалифицированного кадрового потенциала – ключевые звенья в возрождении отечественного авиа- и ракетостроения» (Казань, Россия, 14–16 августа 2012). Казань: Вертолет. 2012. Т. 2. С. 152–163.

16. Моисеев В.С. Российская беспилотная авиационная техника: основные проблемы и пути решения // X Всероссийская научно-техническая конференция "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского". М.: Изд. дом Академии им. Н.Е. Жуковского, 2013. Т. 1. С. 470–474.

17. Моисеев В.С., Гущина Д.С., Моисеев Г.В. Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов. Казань: Изд-во МОиН РТ, 2010. 196 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).

18. Моисеев Г.В., Моисеев В.С. Основы теории создания и применения имитационных беспилотных авиационных комплексов. Казань: Редакционно-издательский центр, 2013. 208 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).

19. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Соколов В.М. Методика интегральной оценки эффективности решения комплекса целевых задач космическим аппаратом многоцелевой космической системы // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей ученых степеней. Химки: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», 2013. Выпуск 14. С. 65–86.

20. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Соколов В.М., Великоиваненко В.И., Константинов В.С. Комплекс методик оценки эффективности решения частных целевых задач военного времени космическим аппаратом многоцелевой космической системы // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей ученых степеней. Химки: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», 2014. Выпуск 15. С. 107–150.

21. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Соколов В.М., Великоиваненко В.И., Ломакин А.А. Комплекс методик оценки эффективности решения частных целевых задач мирного времени космическим аппаратом многоцелевой космической системы // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей ученых степеней. Химки: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», 2014. Выпуск 15. С. 89–106.

22. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. и др. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 2. С. 29–36.

23. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В. Перспективы интеллектуализации систем управления ЛА за счёт применения машинного зрения // Труды Московского физико-технического института. 2009. Т. 1. № 4. С. 164–181.

24. Павлов А.М. Принципы организации бортовых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов // Мир компьютерной автоматизации. 2001. № 4.

25. Пантенков Д.Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. Т. 74. № 2. С. 57–68. DOI:10.18127/j20700784-202002-05

26. Викулов О.В., Добыкин В.Д., Дрогалин В.В. и др. Современное состояние и перспективы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 12. С. 3–16.

27. Осипов Г.С., Тихомиров И.А., Хачумов В.М., Яковлев К.С. Интеллектуальные системы управления автономными транспортными средствами: стандарты, проекты, реализация // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 6. С. 34–43.

28. Сентябрев О.И., Малышев В.А. Применение элементов искусственного интеллекта для решения задач защиты самолета от управляемых ракет в воздушном бою // XII Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (C&T-2011, Воронеж, Россия, 11–13 мая 2011). Воронеж: Воронежский государственный университет, 2011. Т. 2. С. 497–503.

29. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Алгоритмы формирования и обработки радиосигналов командно-телеметрической радиолинии и технические предложения по их реализации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 90–105. DOI:10.25987/VSTU.2020.16.2.014

30. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Цифровая статистическая имитационная модель процесса обработки сигналов в навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 1. С. 87–99. DOI:10.25987/VSTU.2020.16.1.011

31. Халил М. Интеллектуальные технологии принятия решений по управлению техническими средствами в системах обработки информации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 7. С. 10–13.

32. Овсянников В.А. Системная оценка и оптимизация несканирующих тепловизионных приборов. Автореферат дисс. … докт. техн. наук. Казань: Государственный институт прикладной оптики, 2007. 387 с.

33. Комаров А.А., Кондратенков Г.С., Курилов Н.Н., Лавров А.А. Саблин В.Н. и др. Радиолокационные станции воздушной разведки. М.: Воениздат, 1983.

34. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.

35. Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения: монография. М.: Радиотехника, 2015. 648 с. (Научная серия «Бортовые аэронавигационные системы»).

36. Самарин О.Ф., Соловьев А.А., Шарова Т.В. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 3. Вычислительные системы РЛС многофункциональных самолетов. М.: Радиотехника, 2007. 280 с.

37. Болховитинов О.В. Боевые авиационные комплексы и их эффективность. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 226 с.
38. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. 546 с.
39. Слободян М.Г., Можаева Е.И., Подстригаев А.С. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // XXI Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, Россия, 3–4 мая 2018). Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. С 46–50.
40. Ксендзук А.В. Комплекс радиолокационного обнаружения и подавления радиотехнических систем беспилотных летательных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 3. С. 19–24.

* * *

A Methodological Approach to Integrated Effectiveness Assessment Apply of Aviation Systems with UAVs. Part 1. Evaluation Methods for Effectiveness of Solving Radio Communication and Remote Monitoring Tasks

D. Pantenkov[1]

[1]JSC Kronstadt,
Moscow, 115432, Russian Federation

Article info
DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-60-78
Received 15th October 2019
Accepted 14th May 2020

For citation: Pantenkov D. A Methodological Approach to Integrated Effectiveness Assessment Apply of Aviation Systems with UAVs. Part 1. Evaluation Methods for Effectiveness of Solving Radio Communication and Remote Monitoring Tasks. *Proc. of Telecom. Universities.* 2020;6(2):60–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-60-78

Abstract: *Currently, the use of aviation systems with unmanned aerial vehicles (UAVs) of various classes and special purposes has gained particular relevance and practical importance in the interests of both special customers and civilians. Modern UAVs are used both individually and as part of a group, they can carry several target loads on board simultaneously, they are built on various physical principles: a multifunctional optoelectronic system, a digital aerial system, an airborne radar station, a radio and electronic reconnaissance system, and a system communications for transmitting data from target loads (sensors) to a mobile device (for example, a tablet) to a remote subscriber, etc. However, the question of determining the effectiveness of solving both individual UAV targets and finding an integrated assessment of the effectiveness of using aviation complexes with UAVs when solving a set of targets (sequentially or sequentially-in parallel in time) taking into account their priority and a number of other factors. This article structurally consists of three parts. In the first part, we can observe a scientific and methodological approach to determining the effectiveness of solving particular communication targets and remote monitoring by a complex with UAVs according to the probability of their solution is developed. In the framework of this approach, a mathematical apparatus has been developed for the functional dependence of the probabilities of solving particular target problems with the design parameters of target loads as part of the UAV, taking into account the peculiarities of its functioning and under the conditions of existing limitations and assumptions. The scientific and methodological approach allows already at the stage of the formation of the tactical and technical task for the complex with UAVs to obtain, using the calculation method, quantitative estimates of the probabilities of solving particular targets taking into account the technical backlog of industrial enterprises for key components of the complex (target loads, communications equipment complex, etc.). The methodological apparatus developed in the article is universal and invariant with respect to input parameters, i.e., the number of tasks to be solved, the stages of operation of the complex with UAVs, and can be easily adapted to new conditions of use. It should be noted that the result of the arti-*

cle is the methodological apparatus for finding exactly the integral estimate. Finding performance assessments for the group use of UAVs, as well as taking into account possible countermeasures, is beyond the scope of this article and is a direction of further research on this topic.

Keywords: *complexes with UAV, integrated assessment of effectiveness, local targets, probability of solution, radio communication, remote monitoring, optical-electronic system, digital aerophotocamera high-resolution, radar system, design parameters.*

References

1. Verba V.S., Tatarsky B.G. *Complexes with Unmanned Aerial Vehicles in 2 Books*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2016. 1352 p. (in Russ.)

2. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and Applications*. NJ: Prentice Hall; 2001. 1079 p.

3. Merkulov V.I., Drogalin V.V., Konashenkov A.I., et al. *Aircraft Systems Control. Vol.1. Principles of construction of Radio Control Systems. Fundamentals of Synthesis and Analysis*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2003. 192 p. (in Russ.)

4. Rostopchin V.V. *Basic framework for assessing the effectiveness of unmanned aircraft systems for aerial reconnaissance*. Available from: URL: http://www.uav.ru/articles/basic_uav_efficiency.pdf [Accessed 23rd June 2020]

5. Dolzhenkov N.N., Abramov A.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Pantenkov D.G. *Unmanned Aerial Vehicle Radio Terminal*. Patent RF no. 191165, 26.07.2019 (in Russ.)

6. Egorov A., Lomakin A., Pantenkov D. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 1. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(3):19–26. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26

7. Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 2. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(4):37–48. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48

8. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., et al. Technical Implementation of High-Speed Information Channel of Radio Communication from Unmanned Aerial Vehicle to Ground Control Point. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(5):52–71. (in Russ.)

9. Pantenkov D.G., Lomakin A.A. Assessment of stability of the satellite channel of control of unmanned aerial vehicles at influence of intentional interference. *Radioengineering.* 2019;83(11):43–50. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-201911(17)-04

10. Dolzhenkov N.N., Pantenkov D.G., Egorov A.T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., Lu-Ke-Syu E.Yu. Technical Characteristics of the Means for Satellite Radiocommunication with Unmanned Aerial Vehicles. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):74–82. (in Russ.) DOI:10.25987/VSTU.2019.15.3.011

11. Dolzhenkov N.N., Pantenkov D.G., Litvinenko V.P., Lomakin A.A., Egorov A.T., Gritsenko A.A. Integrated Complex of the LongDistance Radiocommunication for Increase Efficiency of the Solution of Target Tasks by Unmanned Vehicle. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):102–108. (in Russ.) DOI:10.25987/VSTU.2019.15.3.0

12. Pantenkov D.G. Results of the Analysis of Ground Tests of the Satellite Radio Communication Complex for Unmanned Aerial Vehicles. *Bulletin of the Ryazan state radio engineering University*. 2019;69:42–51. (in Russ.)

13. Melnikov Yu.P. *Aerial Electronic Reconnaissance (Methods of Assessment of Effectiveness)*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2005. 304 p. (in Russ.)

14. Moiseev V.S., Tutubalin P.I. To the Problem of Information Security of Unmanned Aircraft Systems. *Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference on Problems and Prospects of Development of Aviation, Land Transport and Energy, ANTE-2011, 12–14 October 2011, Kazan, Russia*. Kazan: Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI Publ.; 2011. vol.2. p.324–331. (in Russ.)

15. Moiseev V.S. The Main Directions of Solving the Problems of Theory and Practice of Russian Unmanned Aircraft. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Modern Technologies, Materials, Equipment and Accelerated Restoration of Qualified Personnel Potential – the Key Links in the Revival of the Domestic Aviation and Rocket Industry, 14–16 August 2012, Kazan, Russia*. Kazan: Vertolet Publ.; 2012. vol.2. p.152–163. (in Russ.)

16. Moiseev V.S. Russian Unmanned Aviation Equipment: the Main Problems and Solutions. *Proceedings of the XVII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky.* 2013;1:470–474. (in Russ.)

17. Moiseev V.S., Gushchina D.S., Moiseev G.V. *Fundamentals of the Theory of Creation and Application of Information Unmanned Aircraft Systems*. Kazan: Ministry of Education and Science of the Republic of Tatarstan Publ.; 2010. 196 p. (Series "Modern Applied Mathematics and Informatics"). (in Russ.)

18. Moiseev G.V., Moiseev V.S. *Fundamentals of the Theory of Creation And Application of Simulation Unmanned Aircraft Systems*. Kazan: Redaktsionno-izdatelskiy tsentr Publ.; 2013. 208 p. (Series "Modern Applied Mathematics and Informatics"). (in Russ.)

19. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Sokolov V.M. Method of Integral Evaluation of Efficiency of Complex Targets Spacecraft Multipurpose Space System. *Actual Problems of Designing of Space Systems and Complexes. Collection of Scientific Works of Graduate Students and Competitors of Scientific Degrees.* Khimki: Nauchno-proizvodstvennoye obyedineniye im. S.A. Lavochkina Publ.; 2013. vol.14. p.65–86. (in Russ.)

20. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Sokolov V.M., Velikoivanenko V.I., Konstantinov V.S. A Set of Methodologies for Assessing the Effectiveness of Addressing Specific Targets of Wartime Spacecraft Multipurpose Space System. *Actual Problems of Designing of Space Systems and Complexes. Collection of Scientific Works of Graduate Students and Competitors of Scientific Degrees.* Khimki: Nauchno-proizvodstvennoye obyedineniye im. S.A. Lavochkina Publ.; 2014. vol.15. p.107–150. (in Russ.)

21. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Sokolov V.M., Velikoivanenko V.I., Lomakin A.A. A Set of Methods for Assessing the Effectiveness of the Solution of Specific Objectives of Peacetime Spacecraft Multi-Purpose Space System. *Actual Problems of Designing*

of Space Systems and Complexes. Collection of Scientific Works of Graduate Students and Competitors of Scientific Degrees. Khimki: Nauchno-proizvodstvennoye obyedineniye im. S.A. Lavochkina Publ.; 2014. vol.15. p.89–106. (in Russ.)

22. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V. et al. Intellectual Control System of Unmanned Aerial Vehicles on the Basis of Complex Use of Technologies of Fuzzy Logic and Associative Memory. *Aerospace Instrument-Making*. 2002; 2:29–36. (in Russ.)

23. Zheltov S.Y., Vizilter Y.V. Prospects for the intellectualization of flying vehicle control systems by machine vision technologies. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (State University).* 2009;1(4):164–181. (in Russ.)

24. Pavlov A.M. The Principles of the Organization of Onboard Computing Systems of Advanced Aircraft. *Mir kompyuternoy avtomatizatsii.* 2001;4. (in Russ.)

25. Pantenkov D.G. Results of mathematical modeling of noise immunity of satellite radio navigation systems under the influence of deliberate interference. *Achievements of Modern Radioelectronics*. 2020;74(2):57–68. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700784-202002-05

26. Vikulov O.V., Dobychin V.D., Dragalin V.V. Modern state and prospects of development of the aviation electronic warfare. *Foreign Radioelectronics. Achievements of Modern Radioelectronics.* 1998;12:3–16. (in Russ.)

27. Osipov G.S., Tikhomirov I.A., Khachumov V.M., Yakovlev K.S. Intelligent Vehicle Control Systems: Standards, Projects, Achievements. *Aerospace Instrument-Making.* 2009;6:34–43. (in Russ.)

28. Sentyabrev O.I., Malyshev V.A. Application of Artificial Intelligence Elements to Solve the Problems of Aircraft Protection from Guided Missiles in Air Combat. *Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Cybernetics and High Technologies of the XXI Century", C&T-2011, 11–13 May 2011, Voronezh, Russia*. Voronezh: Voronezh State University Publ.; 2011. vol.2. p.497–503. (in Russ.)

29. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. Algorithms of Formation and Processing of Radio Signals of Command and Telemetry Radio Lines and Technical Proposals for Their Implementation. *Bulletin of the Voronezh State Technical University.* 2020;16(2):90–105. (in Russ.) DOI:10.25987/VSTU.2020.16.2.014

30. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. Digital statistical simulation model of signal processing in navigation equipment of consumers of satellite radio navigation systems. *Bulletin of the Voronezh State Technical University.* 2020;16(1):87–99. (in Russ.) DOI:10.25987/VSTU.2020.16.1.011

31. Khalil M. Intellectual Technologies of decision-making on management of technical means in Information Processing Systems. *Bulletin of Voronezh State Technical University.* 2009;5(7):10–13. (in Russ.)

32. Ovsyannikov V.A. *System Assessment and Optimization of Non-Scanning Thermal Imaging Devices*. DSc Thesis. Kazan: State Institute of Applied Optics Publ.; 2007. 387 p. (in Russ.)

33. Komarov A.A., Kondratenkov G.S., Kurilov N.N., Lavrov A.A., Sablin V.N. et al. *Radar Stations of Air Reconnaissance*. Moscow: Voenizdat Publ.; 1983. (in Russ.)

34. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarsky B.G. Ilchuk, A.R., Gerasimov A.A. *Aviation Radar Systems*. Moscow: Air Force Engineering Academy named after N.E. Zhukovsky Publ.; 2006. 1112 p. (in Russ.)

35. Kondratenkov G.S. *Aviation System Radiovision*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2015. 648 p. (Scientific series "Airborne Air Navigation Systems"). (in Russ.)

36. Samarin O.F., Soloviev A.A., Sharova T.V. *Radar Systems of Multifunctional Aircraft. Vol. 3. Computing Radar System Multifunctional Aircraft.* Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2007. 280 p. (in Russ.)

37. Bolkhovitinov O.V. *Combat Aviation Complexes and Their Effectiveness*. Moscow: Air Force Engineering Academy named after N.E. Zhukovsky Publ.; 2008. 226 p. (in Russ.)

38. Makarenko S.I. *Information Warfare and Electronic Warfare in Network-Centric Wars of the Beginning of the XXI Century*. St. Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii Publ.; 2017. 546 p. (in Russ.)

39. Slobodyan M.G., Mozhaeva E.I., Podstrigaev A.S. Ways and Means of Countering Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Radio Electronics*", 3–4 May 2018, Krasnoyarsk, Russia. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ.; 2018. p.46–50. (in Russ.)

40. Ksendzuk A.V. Unmanned Aerial Vehicle Detection and Jamming Radio Complex. *Issues of radio electronics*. 2018;3:19–24. (in Russ.)

Сведения об авторе:

ПАНТЕНКОВ Дмитрий Геннадьевич

кандидат технических наук, заместитель Главного конструктора по радиосвязи Московского филиала по беспилотному направлению АО «Кронштадт»,
pantenkov88@mail.ru
https://orcid.org//0000-0002-1753-2746