

УДК 004.942

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛА

М.И. Мокрова (*mary.mokrova@mail.ru*)

Московский Авиационный институт

(национальный исследовательский университет), Москва

**Аннотация.** Мониторинг пожаров, происходящих в лесной местности с целью поиска и распознавания объектов интереса, таких как автомобили, техника, люди, одна из актуальнейших на данный момент и важнейших с точки зрения объемов наносимого ущерба задач. Для её решения наиболее эффективным средством является авиационный мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Однако, выбор высоты полёта БЛА, с которой следует производить мониторинг пожара, представляет собой двухкритериальную задачу: существует необходимость минимизировать тепловое воздействие пожара на аппарат, а также максимизировать распознаваемость объектов. В работе описаны возможные критерии оптимальности выбора высоты полёты БЛА над наблюдаемой сценой, учитывающие меняющиеся во времени характеристики пожара, а также тип обследуемой местности.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** высота полета, безопасность, мониторинг, БЛА, поиск объектов, потери, критерий оптимальности.

### Введение

Авиационный мониторинг наземной обстановки является важным этапом процессов экологического контроля, обследования мест чрезвычайных ситуаций, в частности, анализа пожарной обстановки, поиска людей, техники, других объектов.

Существует большое количество средств мониторинга местности и одним из наиболее перспективных направлений в мониторинге пожаров является использование БЛА [Кузьмин, 2020].

Современные БЛА, оснащенные системами технического зрения (СТЗ), позволяют проводить обследование районов пожара и автоматически обнаруживать людей и различные объекты поиска. Процесс мониторинга

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00613-а).

обследуемой области реализуется путем управления поисковыми средствами, например, траекторией и высотой полета БЛА. Мониторинг обстановки следует проводить, учитывая особые условия функционирования летательных аппаратов, возможное расположение объектов поиска и условия их наблюдения. При мониторинге районов чрезвычайных ситуаций, в частности, пожаров, условия наблюдения не всегда могут быть точно определены заранее, на этапе планирования траекторий полета. Однако, управление плановыми координатами БЛА в процессе выполнения мониторинга является уже решенной на достаточном уровне задачей [Скуднева, 2020].

На эффективность выполнения целевых задач при мониторинге, в частности, пожарной обстановки существенное влияние оказывают сложные условия выполнения операции, такие как задымленность, турбулентность атмосферы из-за теплового воздействия пожара, риск потери БЛА при попадании в пламя пожара. На данный момент остается нерешенной задача выбора оптимальной высоты полета для обследования местности в данных условиях. Уменьшение высоты полета может быть опасно для аппарата, однако, без снижения аппарата над наблюдаемой сценой объекты интереса остаются невозможными для обнаружения и распознавания. Исходя из выше сказанного, учёт экстремальных условий функционирования, а также анализ наблюдаемости постилающей поверхности позволяют выбрать оптимальную с точки зрения безопасности полета аппарата и максимизации вероятности обнаружения объектов интереса высоту полета. В работе описаны возможные критерии оптимальности выбора высоты полета БЛА над наблюдаемой сценой, учитывающие меняющиеся во времени характеристики пожара, а также тип обследуемой местности.

## 1 Методика

При проведении мониторинга пожарной обстановки в следствие оказываемого влияния факторов дыма и пламени на БЛА и СТЗ, достоверность обнаружения объектов интереса и безопасность полета БЛА изменяют свой уровень в зависимости от выбранной высоты полета. При снижении БЛА над областью пожарной обстановки до значительно низких высот, что способствует увеличению достоверности обнаружения объектов интереса, влечет за собой понижение безопасности полета. Таким образом выбор оптимальной высоты с точки зрения эффективности полета представляет собой двухкритериальную задачу.

При приближении к области интереса на расстоянии несколько сотен метров СТЗ БЛА уже имеет возможность выделить границы верхних кромок дыма и огня, что в свою очередь позволяет уточнить

характеристики пожарной обстановки [Merino, 2012]. Именно на уточнении этих параметров автором предлагается обосновать расчет критерия эффективности и в последующем выбора стратегии управления высотой полета БЛА в процессе обследования пожарной обстановки с целью поиска объектов интереса.

Примем, что оценка эффективности обследования каждой локальной области интереса будет определяться потерями (1), которые в свою очередь аккумулируют в себе потери двух видов: по наблюдаемости и по безопасности полета.

$$R_{\Sigma}(h) = a_a R_a(h) + a_s R_s(h), \quad (1)$$

где  $R_a(h)$  – потери, связанные с ошибками обнаружения объектов интереса (ошибка типа «пропуск цели» или ошибка «ложной тревоги»);  $R_s(h)$  – потери, связанные с безопасностью полета БЛА (возможность получения повреждений или аварии);  $h$  – текущая высота полета БЛА;  $a_a, a_s$  – весовые коэффициенты потерь. Выбор коэффициентов  $a_a, a_s$  производится на основе экспертной оценки.

Оптимальная высота полета БЛА  $h_{opt}$  определяется в соответствии с минимумом предложенного критерия

$$h_{opt} = \arg [\min R_{\Sigma}(h)]. \quad (2)$$

Таким образом, рассчитываемая высота (2), соответствующая минимуму функции общих потерь (1), зависит от вида и параметров функций  $R_a(h)$  и  $R_s(h)$ , а также выбора коэффициентов ранжирования  $a_a, a_s$ . Для определения вида данных функций потерь предлагается использовать разработанные автором модели наблюдаемости объектов и безопасности полета БЛА в зависимости от определенных на этапе подлета к локальной области пожарной обстановки характеристик условий пожарной обстановки и местности (типа подстилающей поверхности), а также высоты полета.

Описание данных процессов на основе общих физических законов является достаточно сложной аналитической задачей, предлагается использовать описанные ниже в данной работе эвристические модели наблюдаемости и безопасности полета БЛА.

Проведенные исследования, включающие в себя проведение полунатурного эксперимента, показали, что в рамках предлагаемого

потери, связанные с наблюдаемостью объектов интереса, могут быть определены как:

$$R_a(h) = \left(1 - \frac{1}{1+e^{-k_f(h-h_f)}}\right) \frac{1}{1+e^{-\Delta\beta}} \quad (3)$$

где  $k_f$  – эмпирический коэффициент, учитывающий скорость изменения контрастности изображений объекта от высоты положения СТЗ;  $h_f$  – эмпирический коэффициент, определяющийся в соответствии с характеристиками пожарной обстановки,  $f \in F$  – индекс области пожара;  $F$  – количество участков с постоянными параметрами задымленности;  $K_{f\max}$  – максимальная контрастность, обеспечивающая безошибочное обнаружение объекта поиска;  $\Delta\beta$  – диапазон изменения отношения сигнал/шум.

Потери, связанные с повреждениями БЛА предлагается определять следующим образом:

$$R_s(h) = \frac{1}{1+e^{-k_s(h-h_s)}} \quad (4)$$

где  $k_s$  – эмпирический коэффициент, учитывающий скорость изменения безопасности БЛА от высоты полета;  $h_s$  – эмпирический коэффициент, определяющийся в соответствии с характеристиками местности.

При  $R_a(h) = 0$  обнаружение объектов производится без потерь, что означает  $P_a(h) = 1$  – достоверность правильного обнаружения объекта.  $R_a(h) \rightarrow \max$  соответствует случаю, когда условия наблюдения не позволяют обнаружить присутствующий объект ( $P_a(h) = 0$ ).

При  $R_s(h) = 0$  условия полета абсолютно безопасны, это означает что  $P_s(h) = 0$  – достоверность аварии БЛА, при  $R_s(h) \rightarrow \max$  БЛА терпит аварию, приводящую к его разрушению ( $P_s(h) = 1$ ).

Общие потери (1) при мониторинге, в соответствие с (3) и (4), определяются как:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma}(h) &= a_a R_a(h) + a_s R_s(h) \\ &= a_f \left[1 - \frac{1}{1+e^{-k_f(h-h_f)}}\right] \left[\frac{1}{1+e^{-\Delta\beta}}\right] + a_s \frac{1}{1+e^{-k_s(h-h_s)}}. \end{aligned}$$

Минимум данной функции определяет оптимальную высоту полета БЛА над конкретной областью  $f$  пожарной обстановки.

Стратегия выбора оптимальной высоты полета БЛА в соответствии с (2) включает:

1. Выбор коэффициентов ранжирования потерь  $a_a, a_s$ ;
2. Оценка параметров моделей  $k_f, h_f, k_s, h_s$ ;
3. Расчет потерь  $R_{\Sigma}(h)$  для различных высот  $h$  (2);
4. Выбор оптимальной высоты полета БЛА в соответствии с (2).

## 2 Анализ результатов

Для оценки эффективности предлагаемой методики выбора оптимальной высоты полета БЛА при поиске объектов было проведено моделирование процессов поиска.

Ниже представлены результаты расчетов по оценке потерь при обследовании двух областей интереса. Параметры моделей приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры моделей пожарной обстановки

№ очага пожара	1	2
Коэффициент $h_a$	11	7
Коэффициент $k_a$	0.8	0.5
Коэффициент $h_s$	9	3
Коэффициент $k_s$	0.7	0.8

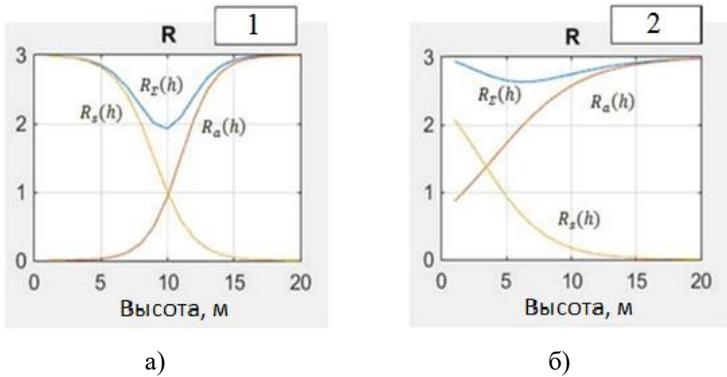


Рис. 1. Потери при мониторинге пожара для очагов:  
а) очаг 1; б) очаг 2

При равенстве коэффициентов ранжирования  $a_a = a_s$ , то для очага 1 (рис.1(а)) минимум потерь будет при полете на высоте  $h_{opt,1} = 9.82h_{opt}$  м, а для очага 2 (рис.1(б))  $h_{opt,2} = 5.17h_{opt}$  м, при этом вероятности правильного обнаружения, вероятности аварии и средние потери представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты моделирования мониторинга пожара на различных высотах полета БЛА для равных коэффициентов ранжирования.

	$R_a(h_1)$	$R_a(h_2)$	$R_s(h_1)$	$R_s(h_2)$	$R_{\Sigma cp}$
$h_{opt}$	0,72	0,71	0,64	0,85	1,6
$h = 10\text{м}$	0,69	0,18	0,66	0,99	2,2
$h = 7\text{м}$	0,96	0,5	0,19	0,96	2,1

В случае изменения соотношения коэффициентов ранжирования, например, увеличением значимости потерь по наблюдаемости относительно потерь по безопасности в два раза:  $a_a = 2 \cdot a_s$ , оптимальная высота полета для очага 1 будет  $h_{opt,1} = 8.52h_{opt}$  м, а для очага 2  $h_{opt,2} = 4.21h_{opt}$  м, при этом средние потери будут  $R_{\Sigma cp}(h_{opt}) = 1,5$ ;  $R_{\Sigma cp}(h = 10\text{м}) = 2,6$ ;  $R_{\Sigma cp}(h = 7\text{м}) = 1,9$ .

### 3 Заключение

Проведенное компьютерное моделирование процесса работы предлагаемого в данной работе алгоритма выбора оптимальной высоты полета над очагами местности, охваченной пожаром, имеющими различные характеристики местности, огня и пламени. При анализе результатов моделирования выявлено, что предложенный подход показал уменьшение средних потерь по сравнению с полетом на постоянной высоте над всеми областями  $h = 10$  м на 27%, а для высоты полета  $h = 7$  м уменьшение потерь составило 23% при равных коэффициентах ранжирования.

При увеличении значимости наблюдаемости в 2 раза уменьшение средних потерь для высоты  $h = 10$  м составило 34%, а для высоты  $h = 7$  м уменьшение потерь составило 21%.

Полученные результаты показывают повышение производительности мониторинга пожарной обстановки с помощью БЛА при использовании представленного алгоритма.

### Список литературы

- [Кузьмин, 2020] Создание модели беспилотного летательного аппарата для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области / О.В. Кузьмин, М.В. Лавлинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. Т. 66 № 2. – С. 136 – 143. – ISSN: 1813-9108.
- [Скуднева, 2020] Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров / О.В. Скуднева, С.В. Коптев, С.В. Иванцов // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 194 – 203. – ISSN: 0536-1036.
- [Merino, 2012] An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement / Merino L., Caballero F., De Dios J.R.M., Maza I., Ollero A. // Journal of Intelligent and Robotic Systems, 65 (1). 2012. С. 533-548.
- [Кудрин, 2006] Анализ современных средств и способов борьбы с природными пожарами / А.Ю. Кудрин, Ю.В. Подрезов // Технологии гражданской безопасности. 2006. №4. С.27-32. ISSN: 1996-8493.