

УДК 62-521

## МОДЕЛЬ НАБЛЮДАЕМОСТИ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ АВИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

Н.В. Ким, М.М. Мокрова (*mary.mokrova@mail.ru*)  
МАИ, Москва

**Аннотация.** В статье предложен подход к выбору оптимальной высоты полета беспилотного летательного аппарата (БЛА) при мониторинге пожарной обстановки на основе использования эвристической модели наблюдаемости искомым объектов. Разработанная модель наблюдаемости основана на учете изменяемой контрастности наблюдаемой сцены от параметров пожара и высоты полета БЛА. Показано, что уменьшение контрастности увеличивает ошибки правильного обнаружения объектов поиска и, соответственно ухудшает эффективность мониторинга.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, мониторинг пожаров, наблюдаемость, контрастность, ошибки обнаружения объектов.

### Введение

Пожары являются одной из причин самых масштабных по размеру урона катастроф. На текущий момент в современном мире используется множество технологий для предотвращения развития стихийного развития пожаров и их подавления, предотвращения человеческих жертв и сокращения материального ущерба. Для решения данной проблемы эффективным средством является авиационный мониторинг областей, охваченных пожаром, в частности с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Важнейшим показателем эффективности таких операций является достоверность обнаружения объектов поиска (людей, техники и пр.).

В условиях пожара из-за наличия пламени и дыма видимость объектов интереса хуже, чем в нормальных условиях наблюдения. В зависимости от интенсивности дыма, эффективная дальность наблюдения меняется, что приводит к изменениям вероятности правильного обнаружения или распознавания объектов. Требуемой вероятности обнаружения можно добиться, выбирая определенную высоту полета БЛА. Однако управление высотой возможно только при наличии соответствующих моделей

наблюдаемости объектов интереса, формирование которых чрезвычайно сложно.

В данной статье предлагается использовать приближенную эвристическую модель наблюдаемости объектов интереса, учитывающую высоту полета БЛА и некоторые атрибуты пожарной обстановки. Использование описываемой модели может увеличить эффективность поиска и распознавания объектов интереса.

## 1 Критерий эффективности мониторинга

Эффективность операции обнаружения объектов интереса зависит от вероятности правильного обнаружения  $P_d(h, \beta, Y_0|X_0)$ , где  $h$  – высота полета БЛА,  $\beta = (\sigma_s/\sigma_n)^2$  – отношение сигнал/шум,  $Y_0$  – значение принимаемого признака объекта,  $X_0$  – факт присутствия объекта поиска.

Не обнаружение присутствующего объекта (пропуск цели) в условиях пожара является катастрофической ошибкой поиска

$$P_{10}(h, \beta|X_0) = 1 - P_d(h, \beta, Y_0|X_0). \quad (1)$$

В общем случае минимизация потерь связана со снижением высоты полета БЛА. Однако необходимо учитывать, что влияние дыма и тепловых факторов (на малых высотах полета) могут привести к аварии БЛА.

Примем, что показателем эффективности, на основании которого производится выбор рабочей высоты полета  $h_r$ , является уровень допустимой вероятности  $P_r$ , связанной с пропуском цели,

$$h_r = \arg [P_{10}(h, \beta|X_0) \leq P_r]. \quad (2)$$

Таким образом, основной задачей управления становится выбор оптимальной высоты полета БЛА, при которой вероятность обнаружения максимальна или ограничена снизу, а вероятность потери БЛА соответственно ограничена или минимальна.

Для нахождения данной зависимости необходимо описать модель наблюдаемости.

## 2 Эвристическая модель наблюдаемости объекта интереса

В разработанной модели наблюдаемости учитываются следующие факторы, влияющие на качество получаемого изображения и достоверность обнаружения на нем объектов интереса:

- Условия, в которых производится наблюдение, в том числе характеристики пожара и параметры местности, охваченной огнем.
- Контрастность, обусловленная наличие дыма на наблюдаемой сцене.

Исходя из разработанного вида модели наблюдаемости, можно получить формулу расчета вероятности ошибок обнаружения, а также вид критерия эффективности мониторинга.

## 2.1 Изменение контрастности изображения

Мониторинг пожарной обстановки происходит в условиях задымленности, что уменьшает контрастность получаемых для обработки, поиска и распознавания изображений. Данный эффект обусловлен тем, что в дыме во взвешенном состоянии находятся мелкие твердые частицы [Сарманаев и др., 2015]. Если обследуемая область состоит из  $F$  участков, на которых условия пожара различны, то результаты обнаружения объектов будут зависеть от задымленности конкретного участка и высоты полета БЛА.

Для описания зависимости изменения уровня контрастности получаемого изображения от высоты зададимся сигмоидой вида

$$K_f(h) = K_{fmax} [1 - 1 / (1 + e^{-k_f (h - h_f)})], \quad (3)$$

где  $h$  – высота полета БЛА,  $k_f$  – эмпирический коэффициент, зависящий от условий пожара, атмосферных условий и пр.,  $h_f$  – высота, при которой контрастность равна  $0.5 * K_{fmax}$ ,  $f \in F$  – индекс области пожара,  $F$  – количество участков пожара с постоянными параметрами задымленности,  $K_{fmax}$  – максимальная контрастность.

При демонстрации работы предлагаемого алгоритма для большей наглядности будем использовать объект – автомобиль (рисунок 1).

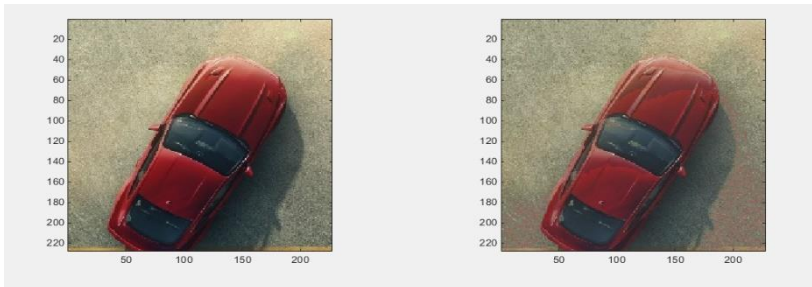


Рис. 1. Понижение контрастности на 0.15.

Однако необходимо заметить, что объект наблюдения может быть любым. В зависимости от вида объекта наблюдения изменяются коэффициенты, выбор которых описан в разделе 2.2 настоящей статьи.

В качестве примера зададимся исходными условиями:  $k_f = 0.43$ ,  $K_{fmax} = 3$ , высота полета  $h = 4$ м,  $h_f = 8$ м, в таком случае  $K_f(4) = 2.54$ . При данных исходных условиях результат работы модели контрастности изображения показан на рисунке 1. На данном рисунке изображен объект, контрастность которого понижена на 15% от максимальной, т.е. контрастности эталона с текущей местностью на высоте  $h = 0$ м.

Таким образом, при мониторинге участка пожара  $f$  на высоте  $h$  принимаемое изображение сцены

$$B(i, j, h) = B_r[i, j, K_f(h)] + n(i, j), \quad (4)$$

где  $B(i, j, h)$  – яркость в точке изображения с координатами  $i, j$ ;  $B_r[i, j, K_f(h)]$  – математическое ожидание яркости;  $n(i, j)$  – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_n(i, j)$ .

На рисунке 2 представлены итоговые изображения, используемые для работы модели с уменьшением контрастности изображения, как показано на рисунке 1 данной статьи, и наложением шума при отношении сигнал/шум равном 7 и 5 соответственно.

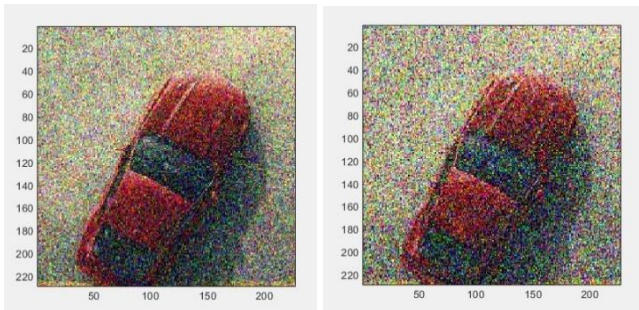


Рис.2. Добавление шума  $\beta=7$  и  $\beta=5$ .

## 2.2 Условия наблюдения

Значительное влияние на достоверность обнаружения объектов оказывают условия, в которых проводится наблюдение. При различных условиях на одной и той же высоте полета над наблюдаемой сценой вероятность обнаружения различна, что и отражено в модели наблюдаемости в виде коэффициентов условий наблюдения, являющихся параметрами модели наблюдаемости:

- $k_f$  – эмпирический коэффициент, зависящий от условий наблюдения и расположения объектов интереса.
- $h_f$  – высота полета БЛА, при которой достоверность обнаружения людей равна 0.5.

Ниже приведены примеры правил, обеспечивающих оценку параметров моделей наблюдаемости:

- Если поверхность – лес и пожар сильный, и влажность высокая, то  $0.7 < k_f < 0.9$ .
- Если поверхность – лес и пожар слабый, и лес редкий, и влажность низкая, то  $h_f > 0.7 h_t$ ,  $0.4 < k_f < 0.6$ , где  $h_t$  – высота деревьев.
- Если поверхность – лес и высота деревьев  $h_t$ , то  $h_f > h_t$ .
- Если поверхность – поле, и пожар сильный, и влажность низкая, то  $h_f > 3m$ .
- Если поверхность – поле, пожар сильный, и влажность высокая, то  $h_f > 5m$ .

Коэффициент  $k_f$  (размерность 1/метр или  $1/m$ ) и значения высот  $h_f$  (размерность -  $m$ ) могут быть определены на основе сформированных заранее баз знаний исходя из предыдущего опыта обследования аналогичных особых ситуаций.

При отсутствии баз знаний, описываемые выше коэффициенты могут быть выбраны на основе визуального анализа пожарной обстановки. Так на рисунке 3(а) представлена ситуация, когда видимый уровень пламени выше  $h_t$ , исходя из этого коэффициент  $k_f$  задается в диапазоне  $0.7 < k_f < 0.9$ , конкретное значение в данном диапазоне выбирается в зависимости от влажности воздуха в данной местности – чем влажность выше, тем коэффициент ближе к значению 0.9.

Уровень наблюдаемости зависит от наличия и интенсивности дыма при пожаре. На представленном изображении дым плотный и его верхняя кромка существенно выше верхней кромки пламени. Параметр  $h_f$  выбирается равным 1.2 от высоты пламени.

По изображению местности, представленному на рисунке 3(б), видно, что в данном случае лес редкий, плотность дыма низкая, поэтому коэффициент  $k_f$  принимает значение из диапазона  $0.2 < k_f < 0.7$ . Параметр  $h_f$  определяется исходя из условий  $h_f > 0.7 h_t$ .



а)



б)

Рис. 3. (а, б) Примеры пожарной обстановки.

Представленную базу правил для выбора коэффициентов модели наблюдаемости можно расширять, исходя из опыта экспертов и экспериментов, проводимых на натуральных моделях.

### 2.3 Эмпирическая зависимость вероятности

На основании исследований, проведенных методами статистического моделирования, и с учетом (3), (4), была получена следующая эмпирическая зависимость вероятности ошибок обнаружения (1):

$$P_{lo}(h, \beta) = [1 - 1/(1 + e^{-k_f(h-h_f)})] [1/(1 + e^{-(\beta-\beta_0)})]. \quad (5)$$

При различных уровнях  $\beta$  зависимость вероятности ошибок обнаружения от высоты может иметь вид, представленный на рис.4.

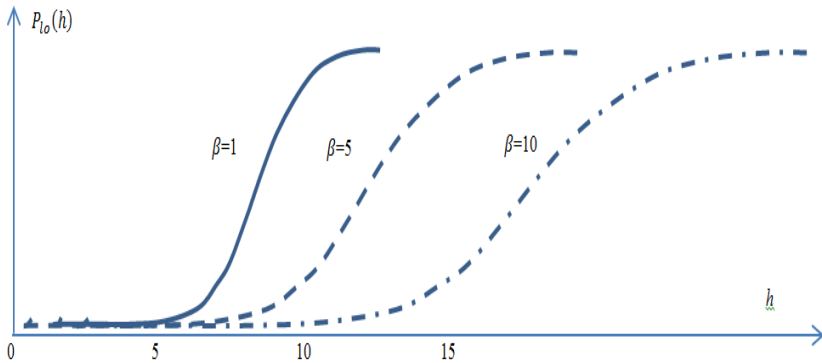


Рис. 4. Вероятности ошибок обнаружения.

Как видно из (5), уровень наблюдаемости зависит не только от  $\beta$ , но также от описанных в разделе 2.2 коэффициентов.

Так при уменьшении коэффициента  $k_f$  графики сигмоид, изображенных на рисунке 4, становятся более пологими, что соответствует повышению вероятности правильного обнаружения на одной высоте при улучшении условий наблюдения (увеличению разреженности дыма).

Параметр  $h_f$  влияет на сдвиг графика относительно оси  $P_{lo}$  влево или вправо при уменьшении или увеличении  $h_f$ , соответственно. Следовательно, при рассмотрении полета на одной и той же высоте и при увеличении значения  $h_f$  (высоты, обеспечивающей вероятность обнаружения равную 0,5) вероятность ошибки уменьшается.

Представленная в формуле (5) зависимость может быть использована для расчета рабочей высоты полета  $h_r$  (2) авиационного мониторинга пожара, описываемого в разделе 1 настоящей статьи.

Так, для принятых ранее параметров пожара и допустимой вероятности ошибки  $P_r = 0,1$  и  $\beta = 5$ , высота полета должна быть  $h_r \leq 6$  м, а для  $\beta = 10$ ,  $h_r \leq 12$  м, что видно из представленного выше рисунка 3.

Таким образом, проведение мониторинга на высоте  $h_r = 12$  м при  $\beta = 10$  обеспечивает  $P_{lo}(h, \beta|X_0) = 0,1$ , но если при  $\beta = 5$  мониторинг проводится на высоте  $h_r = 12$  м, то вероятность пропуска цели составит  $P_{lo}(h, \beta|X_0) = 0,5$ ,

что показывает существенное ухудшение эффективности поиска объектов интереса.

## Заключение

В работе предложена эвристическая модель наблюдаемости объектов интереса, учитывающая высоту полета БЛА и некоторые атрибуты пожарной обстановки. Использование описываемой модели позволяет увеличить эффективность поиска и распознавания объектов интереса за счет выбора необходимой высоты полета, в соответствии с условием (2).

Предложенная эвристическая модель может быть использована при выборе рабочей высоты полета БЛА при проведении мониторинга пожарной обстановки. Моделирование показало, что данная модель наблюдаемости устойчива и эффективна при осуществлении поиска и распознавания объектов интереса.

## Список литературы

- [Гостев, 2010] Гостев И.М. О влиянии точности представления изображений на качество распознавания графических образов // Вестник РУДН. Серия: Математика, информатика, физика. 2010. №3-2. – <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-tochnosti-predstavleniya-izobrazheniy-na-kachestvo-raspoznavaniya-graficheskikh-obrazov> (дата обращения: 04.02.2019).
- [Сарманаев и др., 2015] Сарманаев С.Х., Башарин В.А., Толкач П.Г., Шербашов К.А. Токсико-химическое поражение на пожаре // Биомедицинский журнал «Medline.ru», том 16, токсикология, 26 марта 2015. – [http://www.medline.ru/public/pdf/16\\_041.pdf](http://www.medline.ru/public/pdf/16_041.pdf)
- [Kim et al, 2018] Kim N., Bodunkov N. «Computer Vision in Control Systems - 3: Aerial and Satellite Image Processing», Volume 3, Editors M. Favorskaya, Lakhmi C. Jain, Springer 2018. – 343 p.
- [Евдокименков и др., 2018] Евдокименков В.Н., Ким Н.В., Мокрова М.И. Мониторинг пожарной обстановки беспилотными летательными аппаратами. Материалы XI Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара «Аэрокосмическая декада». – М., 2018. – С.30
- [Мокрова, 2018] Мокрова М.И. Алгоритм оптимального выбора высоты полета и разделения функциональной группы БЛА при мониторинге пожарной обстановки. Тезисы докладов IV Общероссийской молодежной научно-технической конференции. СПб., 2018. – С.57.