

Вдовин Олег Витальевич,
магистр инфокоммуникационных технологий и систем связи,
Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи

Молдазым Нурбек Мухаметкалийулы, доктор PhD,
старший научный сотрудник управления научной деятельности,
Пограничная академия Комитета национальной
безопасности Республики Казахстан

БОРТОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ БПЛА В КОНТУРЕ ПРИОРИТИЗАЦИИ УГРОЗ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ

Аннотация. Рассмотрен контур, в котором результаты бортовой обработки видеопотока БПЛА формируют признаки приоритета угрозы и распределения сил. Предложены модель вероятности обнаружения очага, оценка скорости кромки по маскам сегментации и схема передачи признаков в индекс приоритета. Имитация показала сокращение времени обнаружения с 21,8 до 10,5 мин.

Ключевые слова: Техническое зрение, беспилотные летательные аппараты, приоритизация угроз, распределение сил и средств, имитационное моделирование.

Функционирование государственной системы гражданской защиты Республики Казахстан регламентировано Законом «О гражданской защите» [1]. Единая платформа ситуационного управления объединяет данные беспилотных аппаратов, датчиков и службы 112. Существенная часть времени до прибытия сил приходится не на выдвижение, а на обнаружение события: при ландшафтных пожарах и подтоплениях в малонаселённой местности сообщение от очевидцев поступает с задержкой в десятки минут. Поэтому основной резерв сокращения времени реагирования заключён в канале обнаружения – периодическом патрулировании беспилотными аппаратами с бортовым техническим зрением [2].

Цель работы – разработка и проверка контура, в котором результаты бортовой обработки видеопотока формируют признаки для оценки приоритета угрозы и распределения сил. Новизна состоит в раздельной оценке влияния полноты и точности детектора на показатели реагирования: в условиях дефицита сил точность важнее полноты, поскольку ложные срабатывания отвлекают расчёты на проверку.

Бортовое техническое зрение. Обработка видеопотока размещается на борту аппарата (рис. 1): передача полного видео с нескольких аппаратов по радиоканалу невозможна, тогда как результат обработки – координаты, класс объекта, маска зоны поражения и несколько опорных кадров – занимает единицы килобайт. Такая организация [3] допускает наблюдение при потере связи. Обнаружение объектов выполняется однопроходным детектором семейства YOLO [4], выделение границ зоны поражения – сетью сегментации U-Net [5].



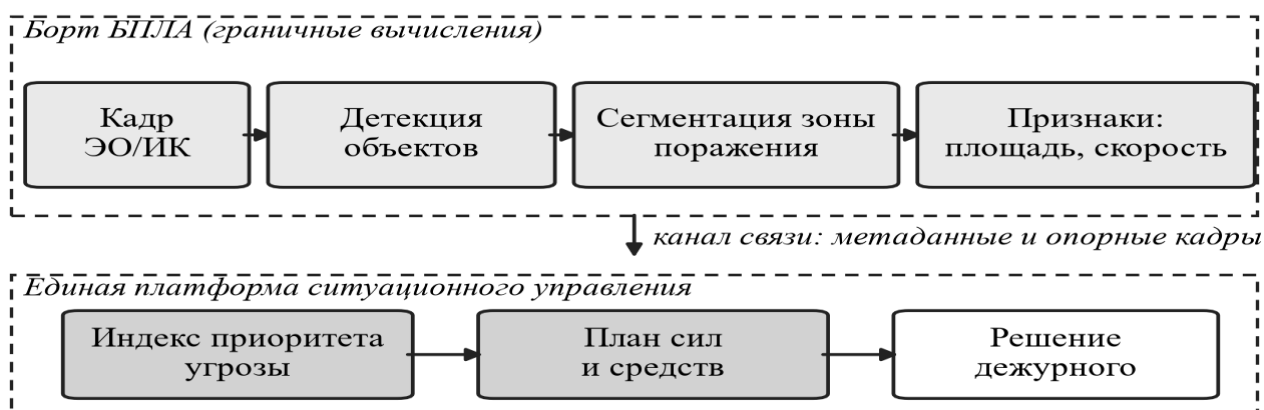


Рисунок 1. Бортовой контур технического зрения и его стык с платформой

Обнаружение при периодическом патрулировании. Маршрут патрулирования строится так, чтобы полоса обзора перекрывала контролируемый участок с периодом T . Если вероятность правильного обнаружения очага за один пролёт равна R , то вероятность обнаружения за n пролётов составляет

$$P_d(n) = 1 - (1 - R)^n \quad (1)$$

где R – полнота (recall) бортового детектора; n – число пролётов над участком. При $R = 0,70$ два пролёта дают вероятность обнаружения 0,91, три – 0,973. Отсюда следует: умеренная полнота бортовой модели компенсируется периодичностью облёта, и требование $R \rightarrow 1$ не обязательно.

От маски сегментации к признаку угрозы. Два последовательных пролёта дают две маски зоны поражения площадью S_1 и S_2 , полученные в моменты времени t_1 и t_2 . Аппроксимируя зону кругом эквивалентной площади, скорость распространения кромки оценивают как

$$v = \frac{\sqrt{\frac{S_2}{\pi}} - \sqrt{\frac{S_1}{\pi}}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – площади зоны поражения, m^2 ; t_1 и t_2 – моменты наблюдения, с. Величина v – прямая оценка динамики развития события, которая при оценке по сообщениям очевидцев задаётся экспертно и с большой погрешностью; она сопоставима с оценками физико-математических моделей пожаров [6]. Вместе с площадью зоны и числом обнаруженных людей она образует вектор признаков для платформы.

Оценка приоритета угрозы. Признаки нормируются к отрезку $[0; 1]$, после чего индекс приоритета формируется как их взвешенная свёртка

$$P(e) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(e) \quad (3)$$

где $f_i(e)$ – нормированное значение i -го критерия для события e ; w_i – вес критерия, сумма весов равна единице. Веса определены методом анализа иерархий [7] по попарным сравнениям группой специалистов: угроза жизни людей (0,34), динамика развития события (0,21), уязвимость объектов (0,17), плотность населения (0,12), метеоусловия (0,09), доступность зоны (0,07). Второй по значимости критерий вычисляется по формуле (2), то есть качество бортового зрения напрямую определяет качество приоритизации.

Распределение сил и средств. Задача относится к классу задач маршрутизации [8], однако точное решение неприменимо в оперативном контуре: обстановка меняется быстрее, чем завершается вычисление. Используется инкрементальная эвристика с правилом выбора пары «ресурс – инцидент».



$$s(i, j) = \frac{P_j \cdot (1 + \alpha \cdot \frac{\tau_j}{60})}{\max(t_{ij}, 1)} \rightarrow \max \quad (4)$$

где P_j – индекс приоритета инцидента; τ_j – время его ожидания, мин; t_{ij} – прогнозируемое время прибытия ресурса i , мин; α – коэффициент старения (принято $\alpha = 0,6$), исключающий бесконечное откладывание инцидентов низкого приоритета.

Имитационный эксперимент. Использована дискретно-событийная модель [9]: территория 60×60 км, 4 подразделения по 3 расчёта, скорость выдвижения 60 км/ч, горизонт 12 ч, неоднородный пуассоновский поток инцидентов, три класса инцидентов с весами 5, 3 и 1. Обнаружение моделировалось двумя каналами: обращения службы 112 (задержка экспоненциальная, среднее 22 мин) и патрулирование БПЛА (период осмотра участка 25 мин). Видеоданные повышают достоверность классификации приоритета (0,95 против 0,60), ложные срабатывания отвлекают расчёт на 15 мин. Выполнено по 400 прогонов Монте-Карло на сценарий; сравнивались четыре конфигурации наблюдения (табл. 1).

Таблица 1

Влияние бортового технического зрения на показатели реагирования

Показатель	Только 112	R = 0,70; P = 0,85	R = 0,90; P = 0,95	R = 0,90; P = 0,60
Время обнаружения критического инцидента, мин	21,8	12,4	10,5	10,5
Время от возникновения до прибытия, мин	53,7	45,2	42,6	48,4
Доля критических инцидентов в 45 мин, %	47,0	57,3	61,8	53,6
Ресурс на проверку ложных срабатываний, %	0,0	3,5	1,3	14,0
Ошибки классификации приоритета, %	39,9	24,9	21,9	21,9

Бортовое зрение сокращает среднее время обнаружения критического инцидента вдвое – с 21,8 до 10,5 мин, а время от возникновения события до прибытия сил – на 20,7 %, с 53,7 до 42,6 мин. Доля критических инцидентов, обслуженных в пределах 45 мин, возрастает с 47,0 до 61,8 %, а доля ошибочно назначенных приоритетов снижается с 39,9 до 21,9 %, поскольку признаки вычисляются по изображению, а не по устному описанию заявителя.

Наиболее значимо сопоставление второй и четвёртой конфигураций. Детектор с высокой полнотой, но низкой точностью (R = 0,90; P = 0,60) уступает детектору с меньшей полнотой и высокой точностью (R = 0,70; P = 0,85): время реагирования 48,4 против 45,2 мин. При точности 0,60 на проверку ложных срабатываний уходит 14,0 % ресурсного времени. Поэтому рабочую точку бортовой модели в условиях дефицита сил следует смещать в сторону точности, компенсируя потерю полноты частотой облёта согласно (1).

Ограничения: синтетические потоки инцидентов, упрощённая модель перемещения, постоянные полнота и точность детектора (в действительности они зависят от освещённости и задымления). Оценки подлежат уточнению на реальных данных аэросъёмки.

Заключение. Предложен контур, связывающий бортовое техническое зрение БПЛА с приоритизацией угроз и распределением сил (выражения (1)– (4)). Имитация подтвердила сокращение времени обнаружения вдвое и времени реагирования на одну пятую, а также приоритет точности детектора над полнотой. Далее – апробация на реальных записях аэросъёмки.



Список литературы:

1. Закон Республики Казахстан от 11 апреля 2014 года № 188-V «О гражданской защите» [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1400000188> (Дата обращения: 30.09.2026).
2. Erdelj M., Natalizio E., Chowdhury K.R., Akyildiz I.F. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management // IEEE Pervasive Computing, 2017. Vol. 16. № 1. P. 24-32.
3. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges // IEEE Internet of Things Journal, 2016. Vol. 3. № 5. P. 637-646.
4. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (Дата обращения: 30.09.2026).

