

УДК 004.932

## КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ДОЗАПРАВКЕ В ВОЗДУХЕ

С. Е. Корепанов, ведущий инженер кафедры АИТУ РГРТУ; korepanov.s.e@rsreu.ru

*Рассматривается задача относительной навигации летательного аппарата (ЛА) при дозаправке в воздухе с использованием системы технического зрения (СТЗ), установленной на борту заправляемого ЛА и содержащей две видеокамеры и устройство анализа изображений. Цель работы заключается в разработке алгоритма, который позволяет обнаружить танкер и оценить его параметры в процессе сближения при дозаправке в воздухе. Для достижения цели применяется комплексный подход, сочетающий ряд алгоритмов, переключение между которыми осуществляется в зависимости от значений оценок размеров танкера и расстояния до него. В статье рассматривается этап сближения с объектом до выполнения маневра стыковки штанги заправляемого ЛА с заправочным конусом танкера. Экспериментальные исследования, проведенные на синтезированных сюжетах, подтверждают, что разработанный алгоритм позволяет обнаруживать и оценивать параметры объекта при отношении сигнал-шум не менее 5 и может быть использован при разработке бортовых СТЗ для обеспечения дозаправки ЛА в воздухе.*

**Ключевые слова:** дозаправка в воздухе, навигация ЛА, слежение, изменение размеров объекта, комплексный подход, оценка параметров.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-114-123

### Введение

Алгоритмы относительной навигации ЛА в бортовых СТЗ позволяют обнаруживать и оценивать параметры объектов в различных условиях наблюдения. Полученная информация необходима для системы управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также полезна во время пилотирования самолетов и вертолетов.

Несмотря на успехи в разработке таких алгоритмов, на сегодняшний день существует ряд актуальных задач, алгоритмы решения которых требуют усовершенствования. Характерными примерами таких задач являются дозаправка и стыковка в воздухе ЛА, в том числе и БПЛА, стыковка космических аппаратов и другие. Общая цель, объединяющая перечисленные задачи, заключается в обнаружении малоразмерного объекта, оценке положения и расстояния до него в процессе сближения, выделении характерной области на объекте и оценивании параметров этой области вплоть до стыковки или дозаправки.

Основное отличие описанных ситуаций состоит в разных типах условий наблюдения, поэтому в данной статье предлагается рассмотреть общий подход к решению таких задач и ограни-

читься решением задачи относительной навигации ЛА при дозаправке в воздухе.

Дозаправка в воздухе позволяет заправляемому самолету продлить время пребывания в небе, а также взлетать с большей полезной нагрузкой. В настоящее время существует два общепринятых метода дозаправки в воздухе: штанга-конус и штанга-приемник. В обоих методах дозаправки заправляемый самолет вначале должен расположиться за танкером, который занимает определенную высоту и движется прямолинейно с постоянной скоростью. Далее в методе штанга-конус танкер выпускает шланг, на конце которого расправляется конусовидное устройство, а на самолете-приемнике выдвигается штанга, после чего задача летчика заправляемого самолета заключается в попадании телескопической штангой в неуправляемый конус. В методе штанга-приемник заправляемый самолет со временем занимает позицию под бортом танкера, а оператор заправочной станции танкера, управляя телескопической штангой, совмещает наконечник штанги с приемным разъемом заправляемого самолета [1].

Дополнительную сложность в методе штан-

га-конус представляют спутный след от танкера и порывы ветра, из-за чего конус начинает совершать колебательные движения. Также дозаправка ЛА в воздухе может проходить в сложных условиях наблюдения, например ночью, что значительно повышает её сложность. В связи с вышесказанным обеспечение относительной навигации ЛА для дозаправки не является тривиальной задачей, и если для пилотируемых ЛА нагрузка ложится на пилотов, то для БПЛА требуется разработка специализированных бортовых систем видеослежения и алгоритмов обработки изображений.

В данной статье ограничимся методом штанга-конус для дозаправки ЛА в воздухе.

### Постановка задачи

Задачу относительной навигации для дозаправки в воздухе можно условно разбить на следующие фазы:

- поиск танкера на фоне неба;
- сближение с танкером;
- поиск конуса;
- выполнение маневра для осуществления стыковки штанги и конуса;
- полет в строю во время перекачки топлива на заправляемый самолет;
- снижение скорости до момента отстыковки штанги от конуса.

Будем рассматривать танкер в качестве объекта интереса, а конус – в качестве области интереса, принадлежащей объекту. Под расстоянием до объекта будем понимать расстояние от центра СТЗ до наблюдаемой поверхности объекта. Размеры объекта в данной работе соответствуют прямоугольнику, ограничивающему изображение объекта.

Бортовая СТЗ в данной статье включает стереосистему, содержащую две камеры с идентичными параметрами, установленными так, чтобы оптические оси видеодатчиков были расположены параллельно, и устройство анализа изображений, в котором должны быть реализованы алгоритмы обработки и анализа изображений. Отметим, что для решения задачи обнаружения объекта и оценки его положения используется левая камера стереосистемы, а для вычисления расстояния до объекта используются обе камеры стереосистемы. Полученную информацию об объекте предполагается использовать в блоке управления двигателями ЛА в процессе дозаправки.

Наблюдаемое изображение  $l(x, y, n)$  на  $n$ -м кадре видеопоследовательности, формируемой левой камерой, опишем известной моделью залога [2]:

$$l(x, y, n) = r(x, y, n) \cdot h(x, y, n) + (1 - r(x, y, n)) \cdot g(x, y, n) + \xi(x, y, n), \quad (1)$$

$$(x, y) \in R,$$

где  $g(x, y, n)$  – изображение фона,  $h(x, y, n)$  – изображение объекта интереса,  $r(x, y, n)$  – бинарное изображение, единичные точки которого соответствуют точкам объекта, нулевые – точкам фона,  $\xi(x, y, n)$  – гауссовский белый шум с нулевым средним,  $R$  – множество точек, на котором задано наблюдаемое изображение,  $x, y$  – координаты выбранной точки на изображении.

Преобразования над изображением объекта опишем с помощью модели, включающей операции сдвига, поворота и равномерного масштабирования [2]:

$$h(x, y, n) = h_0(T_h(x, y, n)),$$

$$\text{где } T_h(x, y, n) =$$

$$= (\lambda(n) \cdot (x \cos \varphi(n) + y \sin \varphi(n)) + v_{\Delta i}(n),$$

$$\lambda(n) \cdot (-x \sin \varphi(n) + y \cos \varphi(n)) + v_{\Delta j}(n)). \quad (2)$$

Преобразование фонового изображения представим в следующем виде:

$$g(x, y, n) = g_0(T_g(x, y, n)),$$

$$\text{где } T_g(x, y, n) =$$

$$= (x \cos \psi(n) + y \sin \psi(n) + v_{\Delta i}(n),$$

$$-x \sin \psi(n) + y \cos \psi(n) + v_{\Delta j}(n)). \quad (3)$$

Здесь  $h_0(x, y)$ ,  $g_0(x, y)$  – исходные изображения объекта и фона соответственно,  $v_{\Delta i}(n)$ ,  $v_{\Delta j}(n)$ ,  $v_{\Delta i}(n)$ ,  $v_{\Delta j}(n)$  – параметры смещения по горизонтали и вертикали,  $\varphi(n)$ ,  $\psi(n)$  – поворот наблюдаемого изображения,  $\lambda(n)$  – параметр изменения масштаба.

В данной статье будем рассматривать только первые две фазы дозаправки в воздухе. Таким образом, требуется обнаружить объект и получить оценки его координат  $\hat{x}_{цм}$ ,  $\hat{y}_{цм}$ , определяемые положением центра масс объекта, оценки размеров объекта  $\hat{\theta}_H$ ,  $\hat{\theta}_W$  и оценки расстояния до объекта  $\hat{D}(n)$  на каждом  $n$ -м кадре наблюдаемого изображения  $l(i, j, n)$ .

### Теоретическая часть

**Общий подход к решению задачи.** Для решения задачи навигации БПЛА обычно оснащают системой спутниковой навигации GPS или ГЛОНАСС, а также инерциальной системой навигации (ИНС). Впрочем, данные системы имеют существенные недостатки. Так, точность

спутниковой системы навигации может значительно снизиться, когда ЛА будет находиться над горной поверхностью, в сложных метеоусловиях и во время геомагнитных бурь. В случае когда заправляемый БПЛА находится близко от самолета-заправщика, танкер экранирует сигналы, приходящие от навигационных спутников, что может привести к сбою в работе системы глобальной навигации. Основным недостатком инерциальной системы заключается в накоплении ошибок перемещений в силу интегрального принципа работы [3, 4]. Таким образом, использование СТЗ по крайней мере является хорошим дополнением для описанных выше систем, а потенциально может служить и в качестве автономной системы навигации.

Несмотря на достаточно большое количество существующих подходов к решению задачи навигации ЛА при дозаправке в воздухе [1, 3], в настоящее время не удастся разработать универсальный алгоритм, который бы позволил решить поставленную задачу.

Одним из вариантов для решения задачи может быть комплексирование алгоритмов обработки информации. Метод основан на одновременном применении нескольких алгоритмов, называемых базовыми. Затем результаты, полученные от базовых алгоритмов, объединяются, что позволяет более точно обнаруживать и оценивать параметры объектов [5].

Для решения поставленной задачи требуется решить ряд подзадач, таких как обнаружение объекта, оценивание параметров объекта и обла-

сти интереса на объекте. Данные подзадачи сильно отличаются друг от друга, что сильно осложняет выбор базовых алгоритмов, и, таким образом, применение метода комплексирования алгоритмов видится неэффективным.

В данной работе предлагается применять комплексный подход [6], который заключается в последовательном использовании наиболее эффективных алгоритмов в составе комплексного алгоритма, переключение между которыми будет происходить в зависимости от оцененных параметров объекта.

В составе комплексного алгоритма предлагается использовать следующие алгоритмы:

- алгоритм обнаружения объектов (АО);
- алгоритм слежения за объектом малых и средних размеров (АС);
- алгоритм слежения за объектом больших размеров (АБ);
- алгоритм для слежения за конусом (АК).

Под малыми и средними размерами объекта понимаются размеры объекта на изображении от точечного до  $W_{б.мин} \times H_{б.мин}$ . Под большими – превышающие средние размеры и вплоть до выхода границ изображения объекта за пределы поля зрения камеры СТЗ. Пороговые значения  $W_{б.мин} \times H_{б.мин}$  требуется определить в ходе экспериментальных исследований.

Диаграмма состояний комплексного алгоритма представлена на рисунке 1. В данной статье подробно рассматриваются только алгоритмы АО, АС и АБ.



Рисунок 1 – Диаграмма состояний комплексного алгоритма

**Алгоритм обнаружения объектов.** Для успешного выделения и обнаружения объекта на фоне неба можно использовать алгоритм, опи-

санный в [7]. Данный алгоритм основан на методе пространственной фильтрации изображений видеопоследовательности. Выделение объекта

на изображении осуществляется в два этапа. На первом этапе изображение обрабатывается параллельно двумя фильтрами. В результате получаются два изображения, одно из которых соответствует оценке фона, а второе – оценке объекта. На втором этапе вычисляется разность между полученными изображениями и для каждой точки разностного изображения принимается решение принадлежности к фону или объекту, в зависимости от сравнения с параметром, зависящим от оценки среднеквадратического отклонения шума, вычисляемой во всей области кадра.

Если наблюдение за объектом происходит на фоне звездного неба, то в качестве метода сегментации изображения предлагается использовать пороговую обработку, поскольку в этом случае изображение представляет собой однородный фон, на котором располагаются объект небольших размеров и звезды, количество которых можно определить, задавшись максимальной звездной величиной, воспринимаемой видеокамерой при известном угле обзора [8]. Задав максимальный размер обнаруживаемого объекта, можно рассчитать приблизительное количество точек на изображении  $M'$ , которое соответствует звездам и объекту, по отношению ко всему изображению и выбор порога  $p(n)$  производить в соответствии с формулой:

$$p(n) = \max_{\sum_{k=p}^{p_{\max}} M(k,n) \geq M'} p, \quad (4)$$

где  $M(k,n)$  – число пикселей, относящихся к  $k$ -му яркостному уровню гистограммы наблюдаемого изображения  $I(x,y,n)$ .

Для получения информации об объекте требуется его обнаруживать на каждом кадре видеопоследовательности. Поскольку объект относительно звезд обычно перемещается или имеет большие размеры, чем звезды, то эти обстоятельства могут служить основными критериями при обнаружении объекта. Для получения информации о движении объекта относительно фона возникает задача оценить траекторию движения звезд и объекта во времени. Следует отметить, что для эффективного решения данной задачи требуется оценить сдвиг и поворот фона между соседними кадрами, а также выделить сегменты, соответствующие звездам и объекту на изображении.

Для решения вышеизложенных задач был разработан алгоритм обнаружения объекта на фоне звезд. Он включает в себя следующие шаги для последовательного выполнения на каждом кадре.

1. Для получения бинарного изображения

сцены выполняется пороговая обработка с вычисленным порогом по формуле (4). Поскольку яркость изображения может со временем незначительно изменяться, то в течение  $n_p$  кадров пороговое значение сглаживается экспоненциальным фильтром:

$$\hat{p}(n) = \frac{1}{n} \cdot p(n) + \frac{n-1}{n} \cdot \hat{p}(n-1), \quad (5)$$

где  $\hat{p}(n)$  – сглаженное значение порога на  $n$ -м кадре,  $\hat{p}(n-1)$  – сглаженное значение порога на  $(n-1)$ -м кадре.

2. Для получения списка параметров всех сегментов на изображении полученное бинарное изображение подвергается разметке и параметризации [2].

3. В связи с тем, что объект может иметь сложную форму, а звезды не быть точечными, вычисляются центры масс сегментов, которые далее рассматриваются в качестве их координат.

4. Производится вычисление оценки сдвига и поворота фона между соседними кадрами в три этапа.

4.1. Грубая оценка сдвига фона.

4.2. Установка соответствия между списками сегментов на текущем и предыдущем кадрах по полученной оценке сдвига фона.

4.3. Уточнение сдвига и определение поворота фона на основе заданной модели преобразования фонового изображения (2) и по полученным спискам на этапе 4.2.

Рассмотрим описанные этапы подробнее.

$$\text{Пусть } U(n) = \begin{bmatrix} x_1(n) & x_2(n) & \dots & x_{s_{\max}}(n) \\ y_1(n) & y_2(n) & \dots & y_{s_{\max}}(n) \end{bmatrix}^T -$$

матрица, состоящая из пар координат сегментов  $[x_s(n), y_s(n)]$ ,  $s = \overline{1, s_{\max}}$ , полученных на  $n$ -м кадре, где  $s_{\max}$  – число сегментов на  $n$ -м кадре. Координаты  $s$ -го сегмента из  $U(n)$  будем обозначать как  $U_s(n) = [x_s(n), y_s(n)]$ . Обозначим  $t_{\max}$  – число сегментов на  $(n-1)$ -м кадре.

На этапе 4.1 для вычисления сдвига фона между соседними кадрами  $\Delta X(n, n-1)$  производится сопоставление каждому сегменту  $s = \overline{1, s_{\max}}$  таких сегментов  $t = \overline{1, t_{\max}}$ , чтобы смещения между координатами этих сегментов не превышали максимально допустимого сдвига фона за кадр  $\Delta X_{\max}$ . Подсчитывается количество полученных пар смещений. Та пара смещений, которая наиболее часто встречается, и определяет грубую оценку сдвига фона  $\hat{\Delta X}(n, n-1)$ .

На этапе 4.2 происходит сопоставление

списков сегментов, полученных на соседних кадрах  $U(n-1)$  и  $U(n)$ , с использованием вычисленного сдвига  $\Delta\hat{X}(n, n-1)$ . Для этого для каждого  $t$ -го элемента из списка  $\hat{U}(n)$ , смещенного на  $\Delta\hat{X}(n, n-1)$ , производится поиск  $s$ -го элемента из списка  $U(n)$ , удаленного на расстояние, не превосходящее  $\Delta$ , где  $\Delta$  – предварительно заданная величина. Величина  $\Delta$  определяет размеры зоны поиска и должна быть задана таким образом, чтобы в дальнейшем можно было бы уточнить сдвиг и оценить поворот фона по спискам с установленным соответствием. При этом  $\Delta$  не должна иметь слишком большое значение, что привело бы к ошибочному соответствию элементов.

Если для  $t$ -го элемента ни одного  $s$ -го элемента не найдено, то проводится поиск для следующего  $t+1$  элемента. Если найдено несколько соответствующих элементов, то в качестве  $s$ -го элемента из них выбирается элемент, расстояние до которого наименьшее. В результате составляются новые списки сегментов  $\hat{U}(n-1)$  и  $\hat{U}(n)$ , соответствие между элементами которых определяется по номеру в списке.

На заключительном этапе 4.3 по всем найденным парам сегментов находятся оценки параметров сдвига и поворота изображения в соответствии с алгоритмом:

а) для каждой пары соответствующих элементов  $\hat{U}(n-1)$  и  $\hat{U}(n)$  записываются уравнения в соответствии с заданной моделью преобразования фона (2):

$$\begin{cases} \hat{x}_t(n) = \hat{x}_s(n-1) \cdot \cos(\Delta\psi(n, n-1)) + \\ + \hat{y}_s(n-1) \cdot \sin(\Delta\psi(n, n-1)) - \Delta x(n, n-1); \\ \hat{y}_t(n) = -\hat{x}_s(n-1) \cdot \sin(\Delta\psi(n, n-1)) + \\ + \hat{y}_s(n-1) \cdot \cos(\Delta\psi(n, n-1)) - \Delta y(n, n-1), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta\psi(n, n-1)$  – поворот изображения кадра  $n$  вокруг своего центра относительно кадра  $n-1$ . В результате уравнения вида (6), записанные для всех пар соответствующих элементов  $\hat{U}(n-1)$  и  $\hat{U}(n)$ , формируют систему уравнений;

б) находится псевдорешение системы:  $[\Delta\hat{x}(n, n-1), \Delta\hat{y}(n, n-1), \sin(\Delta\hat{\psi}(n, n-1)), \cos(\Delta\hat{\psi}(n, n-1))]^T$ . Из него находятся оценки параметров преобразований;

в) находится вектор невязки системы;

г) для всех пар сегментов, для которых значение невязки меньше заданной величины, со-

ставляется новая система вида (6);

д) находится её псевдорешение  $[\Delta\hat{x}(n, n-1), \Delta\hat{y}(n, n-1),$

$$\sin(\Delta\hat{\psi}(n, n-1)), \cos(\Delta\hat{\psi}(n, n-1))]^T,$$

из которого находятся окончательные оценки параметров преобразований, соответствующие  $v_{\Delta x}(n), v_{\Delta y}(n), \psi(n)$ .

5. Размер объекта может превосходить размеры звезд, что позволит легко его обнаружить. В связи с этим на текущем шаге производится удаление всех малоразмерных сегментов, размеры которых в заданное число раз меньше размеров наибольшего сегмента.

6. В результате бинаризации может быть несколько сегментов, соответствующих объекту. Для объединения изображения объекта проводится упрощенная морфологическая обработка, под которой понимается последовательное применение морфологических операций закрытия и открытия [9] со структурирующим элементом заданного размера к бинарному изображению, описанному списком сегментов.

7. Выполняется траекторная обработка списка сегментов [10]. Метод основан на теории графов, теории калмановской фильтрации и теории пространственно-временной обработки. В результате формируется новый список сегментов, в котором каждый сегмент описывается идентификатором сегмента, координатами центра  $\hat{i}_u(n)$ ,  $\hat{j}_u(n)$  и размерами сегмента  $\hat{\theta}_H(n)$ ,  $\hat{\theta}_W(n)$ , скоростью сегмента, флагом нахождения сегмента в прогнозе и параметром «время жизни сегмента».

8. Выполняется поиск объекта. Если в результате удаления малоразмерных сегментов остается один сегмент, то задача обнаружения по размеру становится тривиальной.

Если же сегментов несколько, то основным критерием обнаружения будет скорость сегмента относительно средней скорости фона, т.е. средней скорости сегментов, соответствующих звездам. Для рассмотрения сегментов, соответствующих звездам и объекту, можно использовать параметр времени жизни  $T_p$ , формируемый для каждого сегмента в процессе траекторной обработки.

Теперь можно использовать описанный выше критерий обнаружения и наблюдать за полученными объектами-кандидатами в течение заданного количества кадров. Для того чтобы понизить вероятность ложного обнаружения, вводится минимально допустимая скорость объекта  $\Delta V_{\min}$ . ЛА обычно резко не изменяет направление своего движения, поэтому углы между век-

торами скоростей объектов-кандидатов на соседних кадрах не должны изменяться больше чем на заданную величину.

Если указанным критериям в течение заданного числа кадров всё равно соответствует несколько объектов-кандидатов, то это скорее всего части одного объекта, и в качестве объекта выбирается сегмент с наибольшей площадью.

После того как принимается решение об обнаружении объекта, происходит переключение на АС.

**Алгоритм слежения за объектом малых и средних размеров.** Данный алгоритм основан на предыдущем алгоритме. Он включает в себя шаги с 1 по 7 и его отличие заключается в том, что на 8-м шаге объект слежения выбирается по идентификатору, который присваивается в процессе траекторной обработки. Также на данном этапе начинается оценивание расстояния до объекта.

На основе изображений, формируемых левой и правой камерами стереосистемы, оценка расстояния до объекта  $\hat{D}_h(n)$  вычисляется по формуле:

$$\hat{D}_h(n) = \frac{B \cdot Z}{2 \cdot Q(n) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{f}{2}\right)}, \quad (7)$$

где  $B$  – база стереосистемы в метрах,  $Z$  – разрешение изображения по горизонтали в пикселях,  $f$  – ширина поля зрения в градусах, а  $Q(n)$  – значение диспарантности в пикселях, вычисленное на  $n$ -м кадре.

Алгоритм для расчета диспарантности по поступившей паре изображений, параметрам найденного объекта на левом изображении и диспарантности, вычисленной на предыдущем шаге, состоит в выполнении следующих операций:

- формирование эталонного участка изображения объекта на левом изображении;

- формирование зоны поиска эталонного участка изображения объекта интереса на правом изображении;

- вычисление сдвига относительно диспарантности, рассчитанной на предыдущем шаге  $Q(n-1)$ , на основе корреляционного совмещения эталонного участка объекта интереса и зоны поиска эталонного участка объекта интереса [11]. На первом кадре  $Q(n-1)$  задается нулевым значением;

- субпиксельное уточнение полученного сдвига с использованием параболического интерполирования разностной критериальной функции в окрестности точки минимума;

- вычисление диспарантности на основе вы-

численного целочисленного сдвига и субпиксельного уточнения.

После получения расстояния до объекта измеренные координаты объекта можно вычислить относительно центра стереосистемы, если это потребуется. После достижения объектом больших размеров происходит переключение на алгоритм АБ.

**Алгоритм слежения за объектом больших размеров.** На этом этапе объект, после пороговой обработки как правило, состоит из нескольких достаточно больших сегментов и основная задача заключается в их объединении. В связи с этим алгоритм состоит из следующих шагов, выполняемых на каждом наблюдаемом изображении:

1. Пороговая обработка.

2. Разметка и параметризация.

3. Удаление малоразмерных сегментов.

4. Упрощенная морфологическая обработка с размером структурирующего элемента в зависимости от размеров объекта.

5. Поиск объекта с максимальным размером.

На этом этапе также вычисляется расстояние до объекта. После того как оцененное расстояние до объекта  $\hat{D}(n)$  становится меньше заданного порогового  $D_p$ , происходит поиск конуса на наблюдаемом изображении и осуществляется переключение на АК.

### Экспериментальные исследования

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма была построена система моделирования, включающая в себя программную часть, реализованную в системе MATLAB 2012a, и среду 3D моделирования для формирования сюжета дозаправки в воздухе. Было разработано специальное программное обеспечение для сопряжения указанных систем.

Для проведения экспериментов было синтезировано 11 сюжетов длительностью не менее 1500 кадров. Они были получены в системе моделирования в процессе "ручного" управления как заправляемым самолетом, так и танкером.

Тестирование комплексного алгоритма, запрограммированного в системе MATLAB, проводилось по кадрам, получаемым из системы моделирования.

Для проведения экспериментальных исследований были заданы следующие параметры:

- значения  $W_{б.мин}$  и  $H_{б.мин}$  выбраны равными 10, причем переход на АБ происходил при превышении порогового размера по высоте или по ширине;

- количество кадров для формирования по-

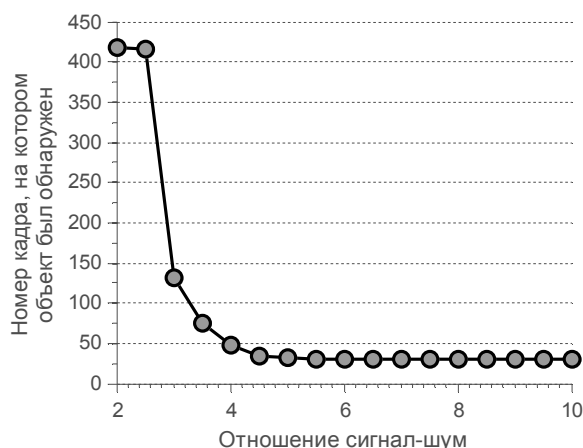
рогового значения  $n_p = 5$ ;

– величина для реализации алгоритма вычисления преобразований фона  $\Delta = 2$ ;

– минимальное время жизни сегмента для рассмотрения данного сегмента на этапе обнаружения  $T_p = 20$ ;

– минимальная скорость объекта относительно фона, достаточная для обнаружения объекта,  $\Delta V_{\min} = 0,1$  пиксель за кадр.

На рисунке 2 представлен график зависимости времени обнаружения объекта (номер кадра) от отношения сигнал-шум на изображении для одного из сюжетов.



**Рисунок 2 – График зависимости времени обнаружения объекта (номер кадра) от отношения сигнал-шум**

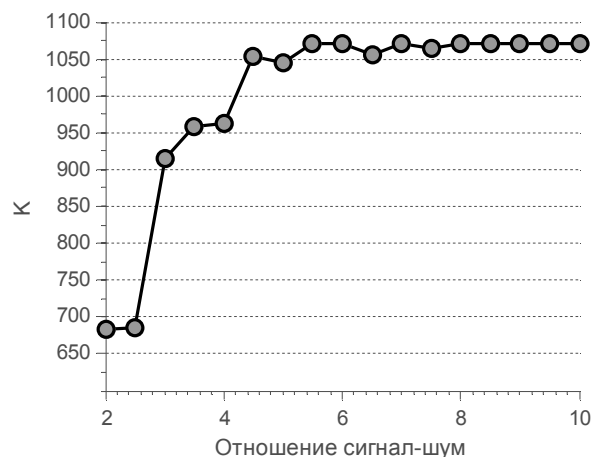
В ходе экспериментальных исследований, особенно при малом отношении сигнал-шум, происходили потеря и повторный захват объекта. На рисунке 3 изображена зависимость количества кадров, в течение которых осуществлялось слежение за объектом, от отношения сигнал-шум.

На графиках видно, что при отношении сигнал-шум не ниже 5 длительность слежения за объектом превышает 1050 кадров, а время обнаружения составляет примерно 30 кадров. Поскольку длительность сюжета, на котором требуется осуществлять слежение за объектом, составляет 1100 кадров, то приведенные выше числа по длительности слежения и времени обнаружения подтверждают способность разработанного алгоритма решать поставленную задачу.

Следует отметить, что среднеквадратическая ошибка вычисления центра масс объекта при

отношении сигнал-шум не менее 5 не превышает 1,1 пикселя, а среднеквадратическая ошибка вычисления размеров не превышает 4 пикселя на рассмотренных сюжетах.

Таким образом, разработанный комплексный алгоритм позволяет обнаруживать и оценивать параметры объекта при отношении сигнал/шум не менее 5.



**Рисунок 3 – Зависимость количества кадров, в течение которых осуществлялось слежение за объектом  $K$ , от отношения сигнал-шум**

На рисунке 4 представлены отдельные кадры, иллюстрирующие работу комплексного алгоритма. Для повышения наглядности рисунков изображения были инвертированы. Кроме того, на рисунках 4,д и 4,е отражены результаты работы алгоритма слежения за конусом.

### Выводы

Предложен комплексный алгоритм относительной навигации летательных аппаратов для дозаправки в воздухе в бортовых системах видеослежения. Данный алгоритм разработан на основе комплексного подхода, сочетающего четыре алгоритма, между которыми осуществляется переключение в зависимости от оцененных размеров и расстояния до объекта. Экспериментальные исследования, выполненные на синтезированных видеосюжетах, показали, что предлагаемый комплексный алгоритм может быть использован при разработке бортовых систем технического зрения для обеспечения дозаправки летательных аппаратов в воздухе.

*Исследования выполнены при использовании гранта для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-7116.2016.8*

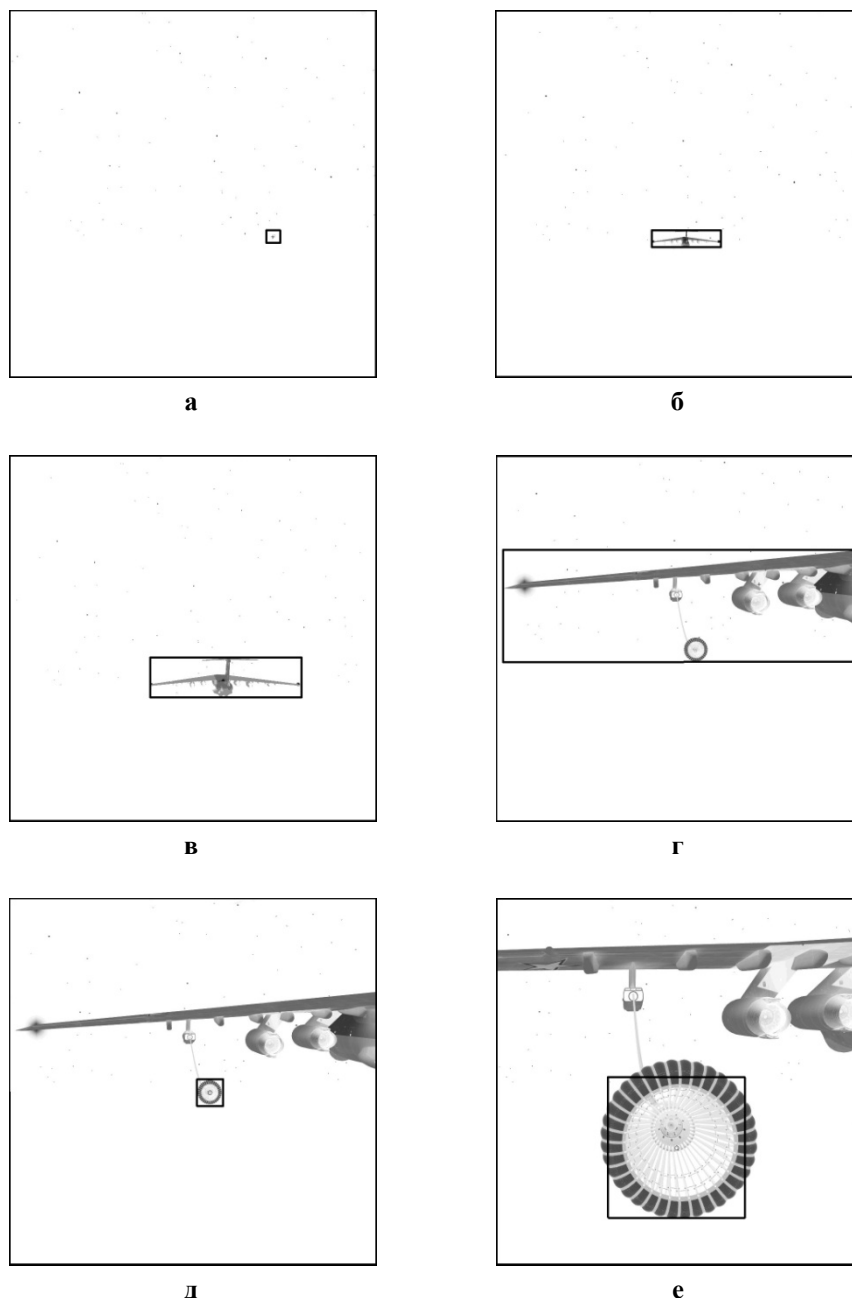


Рисунок 4 – Кадры, иллюстрирующие работу комплексного алгоритма. Прямоугольной рамкой отмечено расположение танкера или его заправочного конуса, вычисленное комплексным алгоритмом:

- а – обнаружение объекта алгоритмом АО (кадр № 35);
- б – слежение за объектом алгоритмом АС (кадр № 400);
- в – слежение за объектом больших размеров алгоритмом АБ (кадр № 700);
- г – слежение за объектом больших размеров алгоритмом АБ (кадр № 1099);
- д – обнаружение конуса (кадр № 1100);
- е – слежение за конусом алгоритмом АК (кадр № 1300)

#### Библиографический список

1. Чеглаков Д. И. История исследований в области автоматизации процесса дозаправки топливом в воздухе летательных аппаратов // Новый университет. Сер. Технические науки. 2011. № 4. С. 34-47.
2. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
3. Borui Li, Chundi Mu, Botao Wu. A Survey of

Vision Based Autonomous Aerial Refueling for Unmanned Aerial Vehicles // 2012 Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing, July 15-17, 2012 – Dalian, China.

4. Бондарев В. Г. Видеонавигация летательного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №213. С. 65-72.

5. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Смирнов С. А. Комбинированный алгоритм слежения за воздушными объектами // Вестник Рязанского государственного

го радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 7-12.

6. Стротов В. В., Корепанов С. Е. Слежение за объектом со значительно изменяющимися во времени размерами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-1. С. 9-14.

7. Алпатов Б. А., Муравьев В. С., Муравьев С. И. Обработка и анализ изображений в системах автоматического обнаружения и сопровождения воздушных объектов. Рязань, 2012. 112 с.

8. Аванесов Г. А., Жуков Б. С., Краснопецева Е. Б. Задачи, решаемые телевизионной системой «Фобос-грунт» // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппара-

тов: Материалы первой Всероссийской научно-технической конференции. 2008. С. 239-250.

9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

10. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Муравьев В. С. Анализ траекторий движения объектов в сложных условиях наблюдения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: тез. докл. 13-й междунар. науч.-техн. конф. 2004. С. 92-93.

11. Баклицкий В. К., Бочкарёв А. М. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.

UDC 004.932

## COMBINED OBJECT DETECTION AND PARAMETERS ESTIMATION ALGORITHM FOR AERIAL NAVIGATION REFUELING VISION SYSTEM

S. E. Korepanov, leading engineer, AITC dept., RSREU; korepanov.s.e@rsreu.ru

*In this paper the task of relative aircraft navigation during an aerial refueling using technical vision system is considered. Technical vision system is situated on the board of refueled aircraft and consists of two video cameras and video processing device. The goal of this work is creation of combined tanker detection and tracking algorithm. The detection and tracking are performed before the docking to the tanker. The algorithm is based on the combination of a number of algorithms. Switching between algorithms depends on the values of estimated tanker size and estimated distance to it. Experimental studies are carried out on the synthesized video. The results confirm that the developed complex algorithm can detect and estimate the parameters of the object in the signal to noise ratio of at least 5. Complex algorithm can be used in the development of on-board technical vision system for aerial refueling.*

**Keywords:** aerial refueling, aircraft navigation, object tracking, parameters estimation, algorithm fusion.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-114-123

### References

1. Cheglakov D. I. Istorija issledovanij v oblasti avtomatizacii processa dozapravki toplivom v vozduhe letatel'nyh apparatov // Novyj Universitet. Ser. Tehniceskie nauki. 2011, no. 4, pp. 34-47 (in Russian).

2. Alpatov B. A., Babajan P. V., Balashov O. E., Stepashkin A. I. *Metody avtomaticheskogo obnaruzhenija i soprovozhdenija ob#ektov. Obrabotka izobrazhenij i upravlenie* (The methods of automatic detecting and tracking of objects. Image processing and control). Moscow: Radiotekhnika. 2008, 176 p. (in Russian).

3. Borui Li, Chundi Mu, Botao Wu. A Survey of Vision Based Autonomous Aerial Refueling for Unmanned Aerial Vehicles // 2012 Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing, July 15-17, 2012 (in Dalian, China).

4. Bondarev V. G. Videonavigacija letatel'nogo aparata // Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2015, no. 213,

pp. 65-72 (in Russian).

5. Alpatov B. A., Babajan P. V., Smirnov S. A. Kombinirovannyj algoritm slezhenija za vozdušnymi ob#ektami // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhniceskogo universiteta. 2011, no. 37, pp. 7-12 (in Russian).

6. Strotov V. V., Korepanov S. E. Slezenie za ob#ektom so znachitel'no izmenjajushhimisja vo vremeni razmerami // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhniceskogo universiteta. 2012, no. 39-1, pp. 9-14 (in Russian).

7. Alpatov B. A., Murav'ev V. S., Murav'ev S. I. *Obrabotka i analiz izobrazhenij v sistemax avtomaticheskogo obnaruzhenija i soprovozhdenija vozdušnyx ob#ektov* (Image processing and image analyzing in automated object detection and tracking systems). Ryazan', 2012, 112 p. (in Russian).

8. Avanesov G. A., Zhukov B. S., Krasnopeceva E. B. Zadachi, reshaemye televizionnoj sistemoj «Fo-

bos-grunt» // Sovremennye problemy opredelenija orientacii i navigacii kosmicheskikh apparatov: Materialy pervoj Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. 2008, pp. 239-250 (in Russian).

9. **Gonzalez R., Woods R.** *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* (Digital image processing). Moscow: Tehnosfera, 2005, 1072 p. (in Russian).

10. **Alpatov B. A., Babajan P. V., Murav'ev V. S.** *Analiz traektorij dvizhenija ob'ektov v slozhnykh uslovi-*

*jah nabljudenija* // Problemy peredachi i obrabotki informacii v setjah i sistemah telekommunikacij. Tez. dokl. 13-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. 2004, pp. 92-93 (in Russian).

11. **Baklickij V. K., Bochkarov A. M.** *Metody fil'tracii signalov v korrelyacionno-jekstremal'nykh sistemah navigacii* (The methods of signal processing in correlation-extremal navigation system). Moscow: Radio i svjaz', 1986, 216 p. (in Russian).