

УДК 639.325

СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СРЫВА В КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

С.С. Заплатников, А.В. Хижняк, А.В. Шевяков

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

LOWERING OF FAILURE PROBABILITY IN CORRELATION TRACKING SYSTEMS OF OPTICALLY OBSERVABLE OBJECTS

S.S. Zaplatnikov, A.V. Khizhniak, A.V. Sheviakou

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Описана типовая корреляционная система автоматического сопровождения оптически наблюдаемых объектов. Рассмотрено влияние фоновых составляющих эталонного изображения на эффективность алгоритма сопровождения. Предложен и обоснован способ снижения вероятности срыва сопровождения, обусловленного влиянием фоновых составляющих. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих эффективность предлагаемого решения.

Ключевые слова: алгоритмы сопровождения, взаимные корреляционные функции изображений, срыв сопровождения, эталонные изображения.

The typical automatic tracking correlation system of optical observable objects is described. Influence of background components of the reference image on the efficiency of tracking algorithm is considered. The method of lowering of probability of tracking failure caused by the influence of background components is offered and justified. Results of the experiments confirming efficiency of the offered decision are presented.

Keywords: tracking algorithms, correlation functions of images, tracking failure, reference images.

Введение

На сегодняшний день разработано большое количество способов автоматического сопровождения оптически наблюдаемых объектов, но наибольшее распространение в системах охраны периметра и специальных системах получили корреляционные алгоритмы [1], [2]. Это обусловлено тем, что корреляционные алгоритмы сопровождения одинаково эффективно работают для любых типов и габаритов объектов [1]. Возможность работы по любым типам объектов особенно актуальна в условиях применения средств маскирования, искажающих их форму и восприятие. Возможность работы в широком диапазоне габаритов позволяет эффективно сопровождать как удаленные малоразмерные объекты, так и объекты на малом удалении. Однако, корреляционные алгоритмы обладают своими недостатками, основными из которых являются высокая вычислительная сложность при больших строках сопровождения и отсутствие различения объекта и фона в кадре, что может приводить к срыву сопровождения при наличии в эталонном изображении контрастных фоновых составляющих [3].

В статье предлагается способ снижения вероятности срыва сопровождения, обусловленного наличием в эталонном изображении фоновых составляющих путем их маскирования в процессе расчета взаимной корреляционной функции фрагментов текущего и эталонного изображения.

1 Типовой корреляционный алгоритм сопровождения

На рисунке 1.1 представлена обобщенная структурная схема типовой корреляционной системы сопровождения [3], [4].

Камера формирует текущие изображения F наблюдаемого пространства. Текущие изображения поступают по цифровому интерфейсу в вычислительное устройство для обработки. В вычислительном устройстве для каждого фрагмента текущего изображения, соответствующего возможному положению сопровождаемого объекта, рассчитывается значение некоторой взаимной корреляционной функции с эталонным изображением T , сформированным заранее. Эталонное изображение формируется в момент захвата объекта на сопровождение путем копирования фрагмента текущего изображения, соответствующего размерам строка захвата (сопровождения) в оперативную память. В процессе сопровождения эталонное изображение обновляется для того, чтобы сделать систему адаптивной к изменению формы и размеров сопровождаемого объекта [1]–[4]. Рассчитанное значение взаимной корреляционной функции для выбранного фрагмента текущего изображения записывается в соответствующую ячейку корреляционной матрицы S . После того, как рассчитаны значения корреляционной функции для всех фрагментов текущего изображения, соответствующим всем возможным положениям сопровождаемого объекта на новом

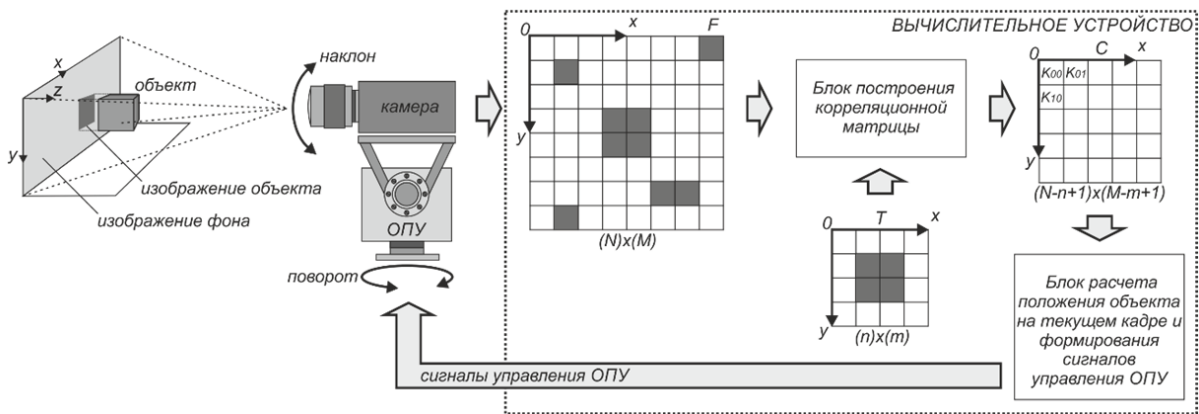


Рисунок 1.1 – Структура типовой корреляционной системы сопровождения (F – текущее изображение, формируемое камерой, ОПУ – опорно-поворотное устройство, T – эталонное изображение, C – корреляционная матрица)

кадре, производится поиск элемента корреляционной матрицы с максимальным значением. Положение элемента корреляционной матрицы с наибольшим значением будет указывать на наиболее вероятное положение сопровождаемого объекта на текущем кадре. На основании этой информации рассчитывается рассогласование текущего и предыдущего положения и формируются управляющие сигналы для приводов опорно-поворотного устройства.

В качестве взаимно корреляционной функции наибольшее распространение получила взаимная нормированная корреляционная функция или коэффициент корреляции [2], [4]:

$$K = \frac{M \{ [f(x) - M_f][t(x) - M_t] \}}{\sigma_f \sigma_t}, \quad (1.1)$$

где x – вектор координат элемента изображения; f – фрагмент текущего изображения; t – эталонное изображение; M – символ математического ожидания; M_f , M_t – математическое ожидание значений яркости пикселей фрагмента текущего и эталонного изображений соответственно; σ_f , σ_t – среднеквадратическое отклонение значений яркости пикселей фрагмента текущего и эталонного изображений соответственно.

Применительно к цифровым изображениям, учитывая отсутствие априорной информации о параметрах распределения значений яркости пикселей изображения, выражение (1.1) принимает следующий вид [3], [4]:

$$K = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m [(f(x,y) - M_f)(t(x,y) - M_t)]}{\sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f(x,y) - M_f)^2} \sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (t(x,y) - M_t)^2}}, \quad (1.2)$$

где n , m – количество пикселей изображений по вертикали и горизонтали соответственно (размеры

изображения); x , y – горизонтальная и вертикальная координаты пикселя изображения соответственно; $f(x,y)$, $t(x,y)$ – значения яркости пикселя изображений в указанных координатах (x, y).

2 Влияние фоновых составляющих эталонного изображения на эффективность корреляционного алгоритма сопровождения

Типовой алгоритм действий оператора системы автоматического сопровождения подразумевает постановку объекта на сопровождение после его визуального обнаружения на экране автоматизированного рабочего места. Для постановки объекта на сопровождение оператор должен подвести строб захвата на изображение объекта и выдать системе команду «Захват». Зачастую ввиду высокого нервного напряжения, дефицита времени и других факторов оператор не может или не успевает подстроить оптимальным образом размеры стога сопровождения или точно расположить строб захвата над объектом. На рисунке 2.1 представлены эталонные изображения при типовых ситуациях постановки объекта на сопровождение.

На рисунке 2.1 серым цветом отмечены пиксели, принадлежащие объекту, черным – пиксели контрастных объектов фона, а белым – остальные пиксели фона. На рисунке 2.1 (а) показан случай когда строб значительно меньше объекта и захват произведен за край объекта. На рисунке 2.1 (б) показана ситуация правильного выбора размеров стога. На рисунке 2.1 (в) показана ситуация, когда размер стога выбран больше требуемого. На всех рисунках видно, что в типовой ситуации в эталонное изображение попадает значительное количество элементов фона. Если обратиться к выражениям (1.1) и (1.2), то можно увидеть, что пиксели фона и пиксели объект имеют одинаковый вклад в

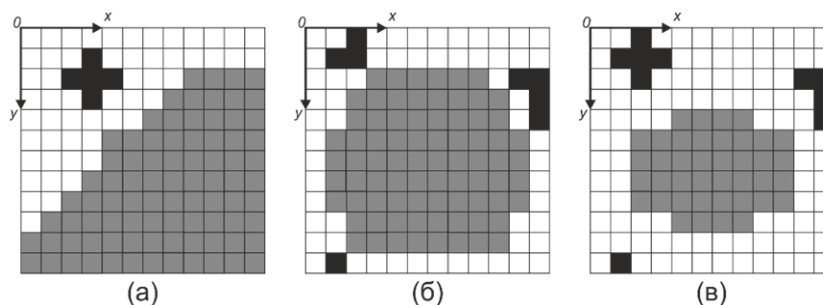


Рисунок 2.1 – Типовые ситуации формирования эталонного изображения

результатирующее значение коэффициента корреляции. В такой ситуации, при попадании в эталонное изображение контрастных объектов фона, значительно возрастает вероятность перенацеливания алгоритма на контрастные объекты фона в текущем изображении (срыв сопровождения). Очевидно, что для снижения вероятности срыва сопровождения необходимо некоторым образом снизить влияние фоновых пикселей эталонного изображения на результаты расчетов.

3 Способ снижения влияния фоновых составляющих эталонного изображения

Если обратиться к структурной схеме типовой корреляционной системы сопровождения (рисунок 1.1), то можно выделить 5 возможных путей решения указанных проблем:

1. Предварительная обработка изображений с целью устранения мешающего фона (объектов фона) [5]. Данный способ изначально предполагает наличие алгоритмов распознавания, одинаково эффективная реализация которых для широкого класса условий затруднительна.

2. Обновление эталонного изображения. Обновление эталонного изображения позволяет адаптироваться к изменению формы и размеров объекта, а также к изменению условий наблюдения и является основным элементом корреляционного алгоритма, во многом определяющим его эффективность [4]. Каким бы эффективным ни был алгоритм обновления эталонного изображения, он не решает проблемы учета пикселей фона в результирующем значении коэффициента корреляции, а производит лишь их сглаживание и усреднение.

3. Учет траекторной информации по сопровождаемому объекту, основанный на проверке гипотез о законе движения объекта [4]. Данный метод может существенно повысить эффективность системы сопровождения, но всегда требует индивидуального подхода в каждой технической системе. По этой причине в данной статье этот подход не рассматривается.

4. Обработка уже сформированной корреляционной матрицы или проверка ее локальных характеристик для различных элементов [6], [7].

Данный способ сложно реализуем ввиду случайности формы корреляционной поверхности и опосредованности в закономерностях ее формирования, что затрудняет поиск универсальных закономерностей и правил. Также этот способ не устраняет рассматриваемую первопричину: влияние фоновых составляющих на результат вычислений.

5. Изменение самого принципа расчета корреляционной функции с учетом оценки вероятности принадлежности пикселя к изображению объекта. Далее в статье рассматривается и обосновывается эффективность данного способа.

Для снижения вклада того или иного пикселя в расчете корреляционной функции необходимо каждому пикселу поставить в соответствие некоторый вес, указывающий на вероятность того, что пиксел принадлежит изображению объекта. При использовании весовых коэффициентов выражения (1.1) и (1.2) примут следующий вид:

$$K = \frac{M \{ [f(x) - M_f] [t(x) - M_t] \cdot m(x) \}}{\sigma_f \sigma_t}, \quad (3.1)$$

$$K =$$

$$= \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m [(f(x, y) - M_f)(t(x, y) - M_t) m(x, y)]}{\sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f(x, y) - M_f)^2} \sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (t(x, y) - M_t)^2}}, \quad (3.2)$$

где $m(x, y)$ – значение матрицы весов (маски).

Представленные выражения являются новыми корреляционными функциями, в основе которых лежит выражение для коэффициента корреляции. Таким образом, маска должна представлять собой матрицу размерами равными размерам эталонного изображения. Значения элементов маски являются весами для соответствующих пикселей при расчете коэффициента корреляции. Использование весов для каждого пикселя позволит учитывать положение объекта на изображении и снизит вероятность срыва.

4 Расчет вероятности срыва сопровождения

Для доказательства эффективности предлагаемого способа смоделирована следующая ситуация.

Пусть имеется некоторое заранее сформированное эталонное изображение T с заранее известным среднеквадратическим отклонением яркости пикселей σ_t и математическим ожиданием M_t . Пусть имеется некоторое изображение F , пиксели которого являются независимыми нормально распределенными случайными величинами со среднеквадратическим отклонением σ_f и математическим ожиданием M_f . Также пусть имеется некоторое изображение I , часть первых пикселей (N_0) которого идентичны соответствующим пикселям эталонного изображения, а другая часть пикселей ($N - N_0$) изображения являются независимыми нормально распределенными случайными величинами с параметрами $\sigma_i = \sigma_f$ и $M_i = M_f$. Как видно из выражений (1.1) и (1.2), при расчете коэффициента корреляции не учитываются соседние пиксели и в выражениях отсутствуют слагаемые, определяющие зависимости результата от положения пиксела на изображении. При расчете коэффициента корреляции имеет значение только соответствие пикселей между собой в двух изображениях. На основании вышесказанного для упрощения аналитических записей и расчетов правомерно перейти к одномерному представлению изображений, где каждая последующая строка изображения занимает последовательные блоки элементов одномерного массива. Для начала рассмотрим случай бинарной маски, когда ее элементы принимают значения 0 – соответствует пикселу с наибольшей достоверностью относящемуся к фону, и 1 – пикселу с наибольшей достоверностью относящемуся к объекту. Также предположим, что переменное количество нулевых элементов маски (N_m) располагается только в конце ее одномерного массива. В таком случае наличие нулевых элементов маски в конце будет эквивалентно отсутствию N_m последних слагаемых под знаком суммы. Принимая во внимание сделанные предположения и переходя от математического ожидания к его оценке [8], [9] – среднему значению яркости пикселей изображения, выражение (3.1) для изображения F и эталонного изображения T примет следующий вид:

$$K_1 = \frac{\sum_{x=1}^{N-N_m} \{(f(x) - M_f)(t(x) - M_t)\}}{N\sigma_f\sigma_t}, \quad (4.1)$$

где x – индекс положения пиксела в одномерном массиве изображений; $f(x)$ – одномерный массив изображения со всеми случайными элементами; $t(x)$ – одномерный массив эталонного изображения.

Для изображения I и эталонного изображения T , с учетом сделанных допущений, выражение (3.2) примет следующий вид:

$$K_2 = \left(\sum_{x=0}^{N_0} (t(x) - M_t)^2 + \sum_{x=N_0+1}^{N-N_m} \{(I(x) - M_t)(t(x) - M_t)\} \right) / (N\sigma_t\sigma_t), \quad (4.2)$$

где $I(x)$ – одномерный массив изображения с $N - N_0$ случайными пикселями.

Таким образом, мы имеем эталонное изображение T , N_0 пикселей которого относятся к объекту, а остальные к фону. Также мы имеем изображение I , где пиксели, относящиеся к объекту, идентичны соответствующим пикселям эталонного изображения, а остальные $N - N_0$ пикселей имеют значения, изменяющиеся по случайному закону. Кроме этого, мы имеем изображение F , где все пиксели имеют случайные значения. Таким образом, мы моделируем ситуацию, когда имеется заранее сформированное эталонное изображение с элементами фона, имеется объект от кадра к кадру, располагающийся на различной фоновой обстановке (изображение I) и имеем изображение, где находятся только элементы фона. Срывом сопровождения будем называть ситуацию, когда коэффициент корреляции между изображением T и F (4.1) окажется больше либо равен коэффициенту корреляции между изображениями T и I (4.2). Следовательно, срывом сопровождения можно назвать ситуацию, когда отношение коэффициентов корреляции K_1 и K_2 будет больше либо равно единице:

$$P = \frac{K_1}{K_2} \geq 1. \quad (4.3)$$

Для определения вероятности срыва сопровождения необходимо найти плотность распределения случайной величины P . Как видно из выражений (4.1) и (4.2), коэффициенты корреляции являются линейными комбинациями независимых нормально распределенных случайных величин (согласно начальным условиям). Следовательно, коэффициенты корреляции также будут распределены нормально [8] со следующими математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями:

$$\sigma_{K_1} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-N_m} \left\{ \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_f\sigma_t} \right)^2 \sigma_f^2 \right\}}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_{K_2} = \sqrt{\sum_{i=N_0+1}^{N-N_m} \left\{ \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_t\sigma_t} \right)^2 \sigma_t^2 \right\}}, \quad (4.5)$$

$$M_{K_2} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{(t(x) - M_t)^2}{N\sigma_t\sigma_t}. \quad (4.6)$$

Математическое ожидание коэффициента корреляции K_1 равно нулю ($M_{K_1} = 0$). Для нахождения плотности распределения P необходимо

найти плотность распределения системы случайных величин (K_1, K_2) [8], [9]. Ввиду того, что случайные величины независимы, плотность распределения системы случайных величин будет равна произведению их плотностей распределения [8], [9]:

$$f(K_1, K_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{K_1}\sigma_{K_2}} e^{-\left[\frac{K_1^2}{2\sigma_{K_1}^2} + \frac{(K_2 - M_{K_2})^2}{2\sigma_{K_2}^2}\right]}. \quad (4.7)$$

Соответственно плотность распределения частного случайных величин K_1 и K_2 будет иметь следующий вид [9]:

$$f(P) = \int_{-\infty}^0 [K_2 f(PK_2, K_2)] dK_2 + \int_0^{\infty} [K_2 f(PK_2, K_2)] dK_2, \quad (4.8)$$

где $f(PK_2, K_2)$ – плотность распределения системы случайных величин (K_1, K_2) (4.7) с эквивалентной подстановкой $K_1 = PK_2$ согласно выражения (4.3).

Соответственно вероятность срыва сопровождения в данном случае будет рассчитывается согласно выражения [9]:

$$p(P \geq 1) = \int_1^{\infty} f(P) dP. \quad (4.9)$$

Примем следующие начальные условия для проведения расчетов: $\sigma_f = \sigma_t = \sigma_r = 30$, $M_t = M_f = M_r = 128$ (возможные значения яркости пикселей от 0 до 255), $N = 16$, $N_0 = 8$, N_m изменяется от 0 до 7, $t(x) = \{98, 158, 98, 158, 98, 158, 98, 158, 98, 158, 98, 158, 98, 158\}$. Значение элементов эталонного изображения $t(x)$ выбраны так, чтобы оценка среднеквадратического отклонения соответствовала начальным условиям $\sigma_t = \sigma_r = 30$. При данных начальных условиях график зависимости вероятности срыва сопровождения от количества нулевых элементов маски будет иметь вид, изображенный на рисунке 4.1 (сплошная линия). Как видно из рисунка 4.1, вероятность срыва сопровождения значительно снижается при увеличении количества «замаскированных» пикселей фона в эталонном изображении: от 0.049 при отсутствии маскирования (типовой корреляционный алгоритм) до 0.005 при маскировании практически всех фоновых составляющих.

Для подтверждения аналитических расчетов был проведен эксперимент с использованием предложенной корреляционной функции (3.2). Схема эксперимента аналогична схеме аналитического доказательства. При каждом отдельном опыте изображение F и I представляли собой реализацию многомерного нормального процесса. Требуемое количество экспериментов для

каждого значения N_m равнялось 316179 исходя из доверительной вероятности $Q = 0.99$ и доверительного интервала $\beta = 0.001$ для определения частоты срыва сопровождения. Как видно из графика зависимости частоты срыва сопровождения (пунктирная линия на рисунке 4.1), результаты эксперимента отличаются от аналитических расчетов не более чем на 0.001, что говорит о верности предположений и справедливости допущений. Используя метод математической индукции, полученные закономерности можно распространить и на изображения большего размера. В таком случае результаты расчетов и эксперимента должны быть сопоставимы (снижение вероятности срыва сопровождение до 10 раз) при том же соотношении количества «замаскированных» пикселей фона в изображениях (6.25%, 12.5%, 18.75%, 25%, 31.25%, 37.5% и 43.75%) и при количестве неизменных пикселей изображения I (идентичных эталонному) в 50%.

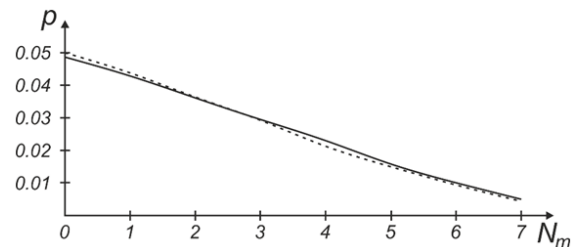


Рисунок 4.1 – Зависимость вероятности срыва сопровождения от количества замаскированных элементов фона в эталонном изображении

5 Расширение результатов на случай небинарной маски

Принятое предположение, что маска является бинарной, т. е. 0 соответствует пикселу с наибольшей вероятностью принадлежащему фону, а 1 – объекту, является «идеальным» случаем. В действительности в начальный момент времени при постановке объекта на сопровождение элементы маски будут иметь единичное значение. В процессе сопровождения на основании некоторых статистик изменения значений пикселей, значение элементов маски должно изменяться от 1 до 0. Докажем, что приведенные выше утверждения об эффективности маскирования фоновых элементов в процессе вычисления корреляционной функции справедливы и для случая небинарной маски.

Пусть все элементы маски имеют единичное значение, а последний элемент изменяется от 0 до 1. При этом начальные условия аналитического доказательства и эксперимента остаются теми же, что и для случая бинарной маски. В данном случае плотность распределения случайной величины P остается неизменной (4.8), изменяются лишь выражения для среднеквадратических отклонений:

$$\sigma_{K_1} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_T} \right)^2 + \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_T} \right)^2} m^2, \quad (5.1)$$

$$\sigma_{K_2} = \sqrt{\sum_{i=N_0+1}^{N-1} \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_T} \right)^2 + \left(\frac{t(x) - M_t}{N\sigma_T} \right)^2} \cdot m^2, \quad (5.2)$$

где m – значение последнего элемента маски.

На рисунке 5.1 показан график теоретической зависимости вероятности срыва сопровождения при изменении одного элемента небинарной маски от 0 до 1 (непрерывная линия), а также результаты эксперимента (пунктирная линия).

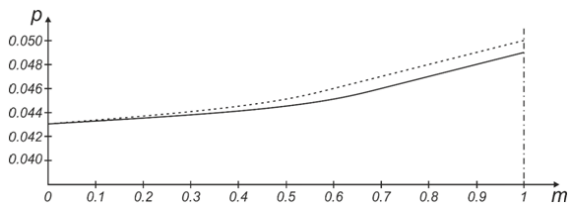


Рисунок 5.1 – Зависимость вероятности срыва сопровождения от значения элемента небинарной маски

Как видно из результатов аналитических расчетов и эксперимента, при уменьшении значения даже одного элемента маски, соответствующего пикселу фона в эталонном изображении, вероятность срыва сопровождения уменьшается. Когда элемент маски равен единице (при остальных единичных элементах) вероятность срыва сопровождения соответствует типовому алгоритму, а когда элемент маски равен нулю вероятность срыва сопровождения соответствует результатам расчетов для случая бинарной маски. Расхождение результатов теоретических расчетов и эксперимента составило не более 0.001, что говорит о справедливости предположений и допущений.

Таким образом, маскирование элементов фона на этапе расчета взаимной корреляционной функции изображений эффективно, но для успешного применения указанного подхода необходимо разработать алгоритм формирования маски в процессе сопровождения объекта. Как правило, сопровождаемый объект движется относительно фона, следовательно объект в строке сопровождения располагается на нестационарном фоне [10]. В начальный момент (в момент захвата на сопровождение) все элементы маски должны иметь единичное значение, а в процессе сопровождения уменьшаться должны те элементы, которые соответствуют элементам фона. Возможный вариант алгоритма формирования маски может быть следующим. Производится накопление некоторого количества изображений строка сопровождения с последующим расчетом среднеквадратического отклонения значений яркости каждого пиксела. В этом случае пиксела, значения

которых изменяются быстро будут соответствовать высокие значения среднеквадратического отклонения, а пиксела, значения яркости которых изменяются медленно (предположительно пиксела объекта) будут соответствовать малые значения среднеквадратического отклонения. Если нормировать полученные значения и вычитать их из единицы, то можно получить матрицу, «поведение» которой при сопровождении объекта будет соответствовать требуемому «поведению» маски.

Заключение

В статье предложен способ повышения эффективности корреляционных алгоритмов, основанный на маскировании фоновых составляющих при расчете корреляционной функции изображений. Показано, что возможно значительно уменьшить вероятность срыва сопровождения, обусловленного наличием в эталонном изображении элементов фона, до 10 раз при условии того, что количество пикселей, принадлежащих объекту составляет 50%, а количество «замаскированных» пикселей составляет 43.75% от всех пикселей изображения. При этом предлагаемый способ повышения эффективности корреляционных алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов может быть скомбинирован с уже известными способами повышения эффективности, такими, как предварительная обработка изображений, сложные алгоритмы анализа и изменения эталонного изображения в процессе сопровождения, обработка корреляционной матрицы и анализ траекторной информации без необходимости их адаптации. Таким образом, применение предлагаемого способа является перспективным и не требует значительных дополнительных вычислительных ресурсов. Описанные в статье подходы с успехом были применены при разработке охранных систем, оснащенных опико-электронными каналами наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклицкий, В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
2. Wong, S. Advanced Correlation Tracking of Objects in Cluttered Imagery / S. Wong // The Proceedings of SPIE: Acquisition, Tracking and Pointing. – 2005. – Vol. 19.
3. Заплатников, С.С. Корреляционно-фильтровой способ сопровождения оптически-наблюдаемых объектов / С.С. Заплатников, А.В. Хижняк, А.В. Шевяков // Электроника-инфо. – 2012. – № 5. – С. 44–47.
4. Алпатов, Б.А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.

5. Садыхов, Р.Х. Обработка изображений и идентификация объектов в системах технического зрения / Р.Х. Садыхов, А.А. Дудкин // Штучный интеллект. – 2006. – № 3. – С. 644–643.

6. *Chunyan, X.* Quaternion correlation filters for face recognition in wavelet domain / X. Chunyan, M. Savvides, B.V.K.V. Kumar. – Pittsburgh: Carnegie Mellon University Department of Electrical and Computer Engineering, 2005. – P. 85–88.

7. *Kerekes, R.* Multiple target detection in video using quadratic multi-frame correlation filtering / R. Kerekes. – Pittsburgh: Oak Ridge National Laboratory, 2008. – P. 1–37.

8. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель,

Л.А. Овчаров // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.

9. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

10. *Заплатников, С.С.* Снижение влияния нестационарного неравномерного фона на эффективность оптико-электронных корреляционно-экстремальных систем сопровождения / С.С. Заплатников, А.В. Хижняк, А.В. Шевяков // Белорусско-Российская научно-практическая конференция по военно-техническому сотрудничеству: сб. тезисов / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск, 2012. – С 120–122.

Поступила в редакцию 28.02.15.