

А. Л. АНДРЕЕВ, А. П. ВАРАТКОВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ МЕЖКАДРОВОГО РАЗНОСТНОГО СИГНАЛА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

Исследуется алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов в автоматизированных системах наблюдения за подвижными объектами в сложной фоновой обстановке. Приводятся результаты статистического моделирования, подтверждающие эффективность рассматриваемого алгоритма.

Ключевые слова: межкадровый разностный сигнал, пространственная фильтрация, накопление сигнала, площадь области изменений, виртуальная модель, характеристики обнаружения, оптимизация параметров.

Алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов, может использоваться в автоматизированных системах наблюдения (АСН) за подвижными объектами [1]. В сложной фоновой обстановке, когда малоконтрастные подвижные объекты наблюдаются на фоне значительно более контрастных предметов или перепадов яркости в поле зрения АСН, процесс обнаружения подвижных объектов распадается на два этапа:

1) формирование межкадрового разностного сигнала (МРС), в котором сосредоточена вся информация об изменениях, происходящих в изображении, и в то же время отсутствуют (или значительно подавлены) мешающие перепады уровня сигнала, соответствующие находящимся в кадре неподвижным объектам и деталям фона;

2) принятие решения о наличии или отсутствии объектов в зоне наблюдения на основе анализа небольшого сегмента изображения в окрестности каждой „подозрительной“ точки, в которой МРС по абсолютной величине превышает установленный порог $U_{п}$.

На рис. 1 представлены фрагмент исходного изображения зоны наблюдения (а); изображение, иллюстрирующее формирование межкадрового разностного сигнала (б); соответствующие этим изображениям осциллограммы выделенной строки (в и г).

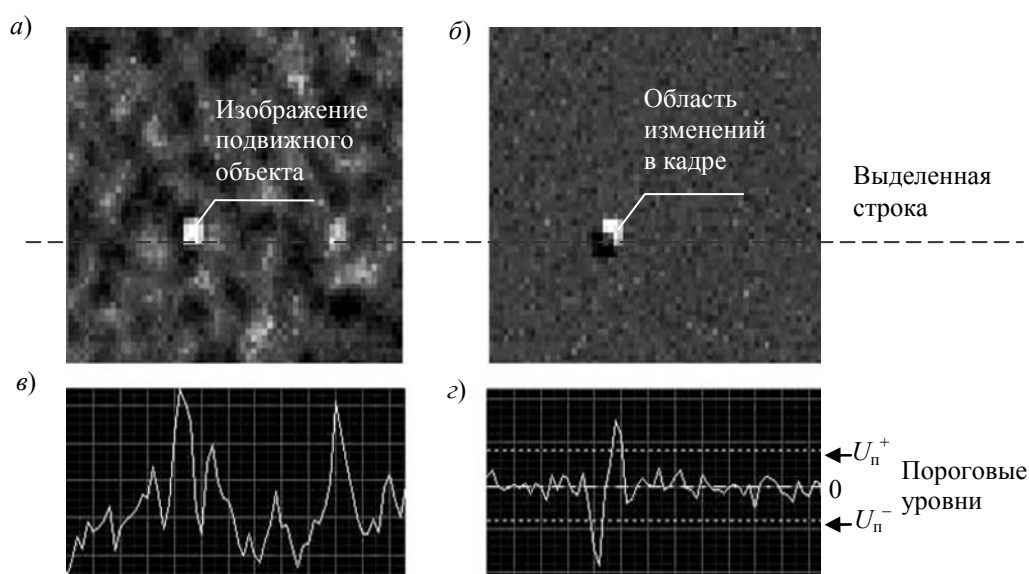


Рис. 1

При проектировании АСН, решающих задачи обнаружения объектов, целесообразно использовать понятие отношения сигнал/шум:

$$\mu = U_{c \max} / U_{\sigma \text{ ш}},$$

где $U_{c \max}$ — максимальное (пиковое) значение напряжения полезного сигнала в электронном тракте АСН; $U_{\sigma \text{ ш}}$ — среднеквадратическое значение шумового напряжения, обусловленного влиянием всех составляющих шумов, действующих в АСН, включая внутренние шумы фотоприемного устройства (ФПУ) и шумы, обусловленные квантовой природой поглощения оптического излучения.

Однако следует иметь в виду, что реальное отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале ($\mu_{p.c}$) всегда меньше отношения сигнал/шум μ в исходных сигналах сравниваемых кадров.

Введем следующие обозначения:

v — скорость перемещения объекта в плоскости изображения;

d — пространственный период элементов ФПУ;

T_n — время накопления сигнала в ФПУ (КМОП, ФПЗС и др.);

T_k — период смены кадров;

$\Delta T_k = nT_k$ — интервал времени между сравниваемыми кадрами, где $n = 1, 2, 3 \dots$ — целые числа натурального ряда.

Рассмотрим вначале случай *относительно медленных перемещений*, когда за время накопления сигнала изображение подвижного объекта успевает переместиться на расстояние, значительно меньшее одного пространственного периода элементов: $T_n v \ll d$. Чтобы обнаружить заметные изменения в кадре, связанные с перемещением наблюдаемого объекта, необходимо выполнение условия $n \gg 1$ (т.е. $\Delta T_k \gg T_k$). В этом случае шумовые составляющие в каждом из сравниваемых кадров можно рассматривать как случайные между собой не коррелированные процессы. При этом отношение сигнал/шум в разностном сигнале примерно в $\sqrt{2}$ раз меньше отношения сигнал/шум в сравниваемых кадрах: $\mu_{p.c} \approx \mu / \sqrt{2}$.

В случае *быстрых перемещений* изображения наблюдаемого объекта ($T_n v \gg d$) фактическое время накопления T'_n , определяющее величину сигнала подвижного объекта, уменьшается пропорционально скорости: $T'_n = d/v$. Тогда величину $T_n / T'_n = T_n v / d$ можно рассматривать как коэффициент уменьшения отношения сигнал/шум при быстрых перемещениях объекта. Таким образом, фактическое значение $\mu_{p.c}$ при быстрых перемещениях можно оценивать по приближенной формуле:

$$\mu_{p.c} \approx \mu / (\sqrt{2} \cdot T_n v / d). \quad (1)$$

Перечисленные факторы необходимо учитывать при определении оптимальной величины решающего порога, с которой сравнивается абсолютное значение МРС.

Обычно изменения, происходящие в кадре в результате перемещения находящихся в поле зрения АСН объектов, занимают площадь как минимум несколько раз большую, чем площадь одного элемента изображения. Поэтому на этапе обработки МРС представляется возможным использовать алгоритм *накопления сигналов по площади области изменений*, позволяющий значительно повысить чувствительность АСН к обнаружению малоконтрастных подвижных объектов при наличии значительных шумов во входном сигнале [1].

Площадь кадра разбивается на большое число дискретных участков, каждый из которых анализируется отдельно и является элементарной зоной накопления. Зона накопления представляет собой прямоугольный участок кадра, состоящий из $m \times n$ элементов. Размеры дискретной области накопления нужно выбирать с таким расчетом, чтобы при любых изменениях в кадре, вызванных перемещением объектов, хотя бы одна из дискретных областей была полностью расположена в области изменений.

Обозначим через $P_{л.т}(k)$ вероятность ложного обнаружения сигнала об изменениях в k -й зоне накопления. Тогда вероятность ложной тревоги при анализе сигнала целого кадра можно записать в следующем виде:

$$P_{л.т}(T_k) = 1 - \prod_{k=1}^Q [1 - P_{л.т}(k)], \quad (2)$$

где Q — число зон накопления в кадре, равное отношению полного числа элементов изображения ($M \times N$) к числу элементов в зоне накопления:

$$Q = (M \times N) / (m \times n).$$

Учитывая, что ложные обнаружения в любой из зон равновероятны, выражение (2) можно записать иначе:

$$P_{л.т}(T_k) = 1 - [1 - P_{л.т}(k)]^Q. \quad (3)$$

Решение об обнаружении подвижного объекта в k -й зоне накопления принимается в случае, если число элементов изображения (в пределах данной зоны накопления), в которых напряжение межкадрового разностного сигнала ($U_{МРС}$) по абсолютной величине превышает значение заданного порога, больше или равно p при общем числе $q = m \times n$ элементов ($p \leq q$). Иначе говоря, выполняется условие $|U_{МРС}| \geq U_p$ при числе элементов k -й зоны накопления не меньшем чем p . При этом вероятность ложной тревоги в k -й зоне накопления можно вычислить по формуле

$$P_{л.т}(k) = \sum_{l=p}^q C_q^l [P_{р.в}]^l [1 - P_{р.в}]^{q-l},$$

где $P_{р.в}$ — вероятность регистрации выброса шума за установленный порог ограничения; C_q^l — число сочетаний из q по l .

Вероятность ошибки второго рода — пропуска объекта — при использовании рассмотренного алгоритма накопления определяется как

$$P_{пр}^H = 1 - P_{прав} = \sum_{l=q-p+1}^q C_q^l [P_{пр}]^l [1 - P_{пр}]^{q-l},$$

где $P_{пр}$ — условная вероятность пропуска сигнала в одном из элементов зоны накопления; $P_{прав}$ — вероятность правильного обнаружения при отсутствии алгоритма накопления.

При наличии априорной информации о возможных размерах, диапазоне скоростей, относительном контрасте и других параметрах объектов наблюдения можно оптимизировать параметры алгоритма обнаружения и, следовательно, работу АСН в целом.

Однако, учитывая достаточно сложный характер взаимосвязей множества факторов и физических процессов, протекающих в различных звеньях оптико-электронного тракта АСН, наиболее эффективным методом решения подобной задачи представляется использование виртуальной компьютерной модели АСН, позволяющей реализовать метод статистических испытаний исследуемого алгоритма (метод Монте-Карло). Приведем некоторые результаты, полученные с помощью модели, общие принципы реализации которой рассмотрены, например, в работе [2].

В модели АСН в качестве скользящей зоны пространственного анализа в окрестности „подозрительной“ точки рассматривался сегмент размером 3×3 элемента изображения (т.е. $q = 9$). Решение о наличии объекта в зоне анализа принималось в случае, когда не менее чем в p элементах этого сегмента МРС по абсолютной величине превышал установленный пороговый уровень ($p \leq 9$).

На рис. 2 показаны зависимости относительного числа ложных обнаружений (ложных тревог) $N_{л.т.}^*$ (сплошные линии) и относительного числа пропусков объекта $N_{пр.}^*$ (пунктирные линии) от величины относительного порога $U_{п.}/U_{\sigma_{ш}}$ при различных значениях параметра p . Каждое значение получено при статистической обработке не менее 350 реализаций для фрагмента изображения зоны наблюдения размером 64×64 элемента.

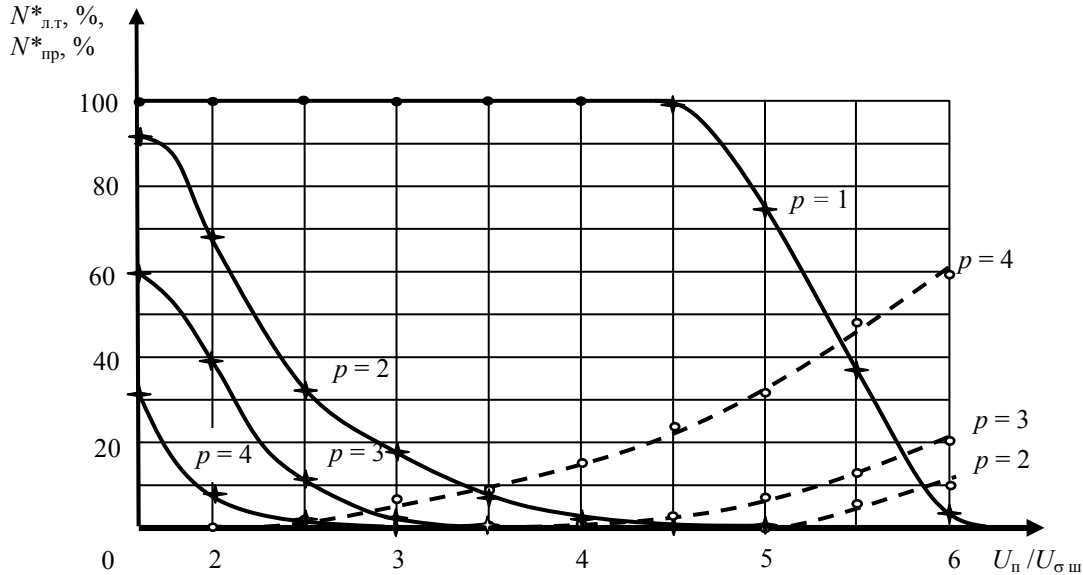


Рис. 2

Результаты, приведенные на рис. 2, получены при моделировании достаточно сложных условий наблюдения объекта размером 4×4 элемента в плоскости анализа изображения. Относительная величина электрического сигнала подвижного объекта в исходном видеосигнале составляла в среднем 0,7 от величины сигнала, соответствующего неравномерности фоновой составляющей (см. рис. 1, а, в). Интервал пространственной корреляции фоновой помехи задавался равным 8 элементам изображения. Относительная скорость перемещения изображения объекта (по диагонали вверх и направо) составляла $1,5d$ за время ΔT_k . При этом с учетом фотонной составляющей шумов и уровня внутреннего шума ФПУ эффективное значение отношения сигнал/шум в исходном видеосигнале $\mu \approx 3,7$. Тем не менее, например, при сочетании значений $U_{п.}/U_{\sigma_{ш}} = 5$, $p = 2$ (или $U_{п.}/U_{\sigma_{ш}} = 3,5$, $p = 3$) практически не было зарегистрировано ошибок обнаружения типа „ложной тревоги“ или пропуска объекта. Это говорит о достаточно высокой эффективности рассматриваемых алгоритмов, сочетающих процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов при обнаружении малоразмерных и мало-контрастных подвижных объектов на неоднородном фоне в зоне наблюдения.

Очевидно, что результаты моделирования, полученные для фрагмента изображения зоны наблюдения размером 64×64 элемента, могут быть экстраполированы на больший формат изображения. В частности, вероятность ошибки первого рода (ложное обнаружение объекта) при анализе полного кадра изображения зоны наблюдения может быть оценена с помощью приближенного выражения, аналогичного формуле (3):

$$P_{л.т.}(T_k) = 1 - \left[1 - P_{л.т.}(64 \times 64) \right]^K,$$

где K — число фрагментов, содержащихся в полном кадре изображения размером $M \times N$ элементов, $K = (M \times N) / (4096)$; $P_{л.т.}(64 \times 64)$ — оценка вероятности ложной тревоги, полученная в результате моделирования фрагмента такого изображения.

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от величины среднего контраста η изображения подвижного объекта размером 4×4 элемента при различных скоростях V^* его перемещения (по диагонали вверх и направо).

Заметим, что реальное значение оптического контраста изображения меняется в зависимости от текущего положения объекта на различных участках неоднородного фона. При этом, естественно, меняется и отношение сигнал/шум. Так, например, при среднем значении $\eta=6$ отношение сигнал/шум изменялось в пределах от 1,2 до 6,1 (с учетом заданных условий эксперимента, предопределяющих суммарный уровень шумов в исходном видеосигнале).

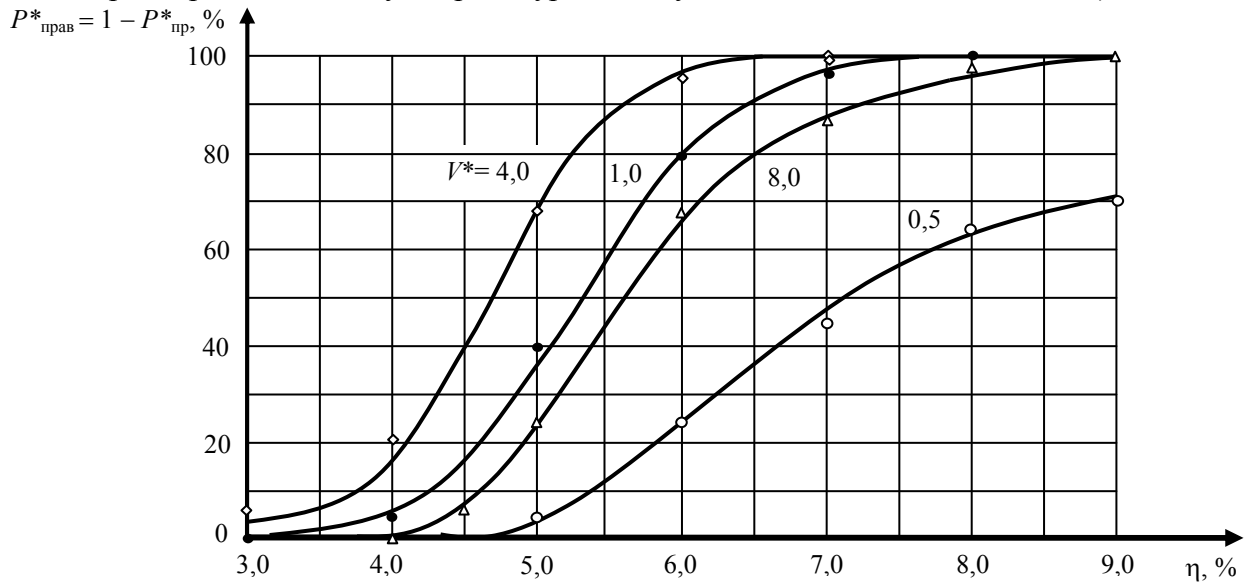


Рис. 3

Численное значение скорости V^* перемещения объекта (в плоскости анализа изображения) оценивалось числом пространственных периодов, соответствующим перемещению изображения объекта за время ΔT_k . Каждая точка, показанная на графиках, получена в результате статистической обработки 350 реализаций. При этом задавались параметры ($U_n/U_{\text{шн}} = 3,5$, $p = 3$), при которых в рамках проводимого эксперимента не наблюдалось появление ошибок типа „ложной тревоги“ (см. рис. 2).

Снижение обнаружительной способности АСН при относительно малых скоростях перемещения объекта ($V^* < 4$) связано с уменьшением размеров области изменений в кадре, в пределах которой возможно использование эффекта пространственного накопления сигнала в соответствии с решающим правилом „ p из q “. Существенное улучшение характеристик обнаружения при малых скоростях перемещения ($V^* < 1$) возможно путем увеличения интервала времени между сравниваемыми кадрами: $\Delta T_k = nT_k$ при $n > 1$. При сравнительно большой скорости ($V^* = 8$) снижение обнаружительной способности АСН наблюдается ввиду заметного уменьшения реального времени накопления сигнала подвижного объекта в элементах фотоприемника и, как следствие, уменьшения реального отношения сигнал/шум в разностном сигнале (см. формулу (1)).

Приведенные примеры отражают результаты, полученные для определенных частных условий наблюдения за объектами. Однако по этим результатам можно сделать вывод, что рассмотренный алгоритм формирования и обработки межкадрового разностного сигнала позволяет при интенсивном уровне помех добиться надежного обнаружения подвижных объектов, средний оптический контраст которых составляет единицы процентов относительно элементов окружающего фона с размерами, соизмеримыми с размерами объекта.

Использование виртуальной компьютерной модели позволяет на ранних стадиях проектирования АСН решать задачи оптимизации параметров используемого алгоритма и обоснования требований к отдельным звеньям аппаратной структуры АСН, а также прогнозировать поведение проектируемой системы в заданных условиях наблюдения за объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. Л., Бурдова Н. А., Коротаев В. В. Алгоритм пространственной временной селекции сигналов в адаптивных системах наблюдения за подвижными объектами // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74).
2. Андреев А. Л., Тоткайло С. В. Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сб. тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика—2006“. Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.

Сведения об авторах

- Андрей Леонидович Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: and-andr@yandex.ru
- Александра Павловна Вараткова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: varatkova@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.