

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Л. Андреев, Н.А. Бурдова, В.В. Коротаев

Рассматривается алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов в автоматизированных системах наблюдения за подвижными объектами в сложной фоновой обстановке. Приводится анализ взаимосвязанных факторов, предопределяющих характеристики обнаружения. Даются зависимости, на основе которых возможна оперативная организация управления решающим правилом в системе, обладающей способностью оптимизации и самоадаптации параметров алгоритма в изменяющихся условиях наблюдения в режимах обнаружения и последующего слежения за подвижными объектами.

Ключевые слова: межкадровый разностный сигнал, пространственная фильтрация, накопление сигнала по площади области изменений, характеристики обнаружения, оптимизация параметров.

Введение

В общем виде процесс автоматического выделения информации о подвижных объектах предполагает анализ не одного, а нескольких (как минимум двух) изображений, полученных в различные моменты времени. В результате такого анализа автоматизированной видеоинформационной системой (АВС) может осуществляться не только обнаружение объектов, но и определение габаритов, координат, скорости и направления перемещения в пространстве.

Наибольший интерес представляет случай, когда менее контрастные подвижные объекты наблюдаются на фоне значительно более контрастных предметов, находящихся в угловом поле АВС. В такой ситуации процесс выделения информации о подвижных объектах распадается на два этапа:

- 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, соответствующие неподвижным объектам, находящимся в кадре;
- оптимальная обработка МРС с целью выделения необходимой информации с максимальной достоверностью.

Пусть, например, на некотором неоднородном фоне, содержащем неподвижные предметы, перемещается объект A (рис. 1).

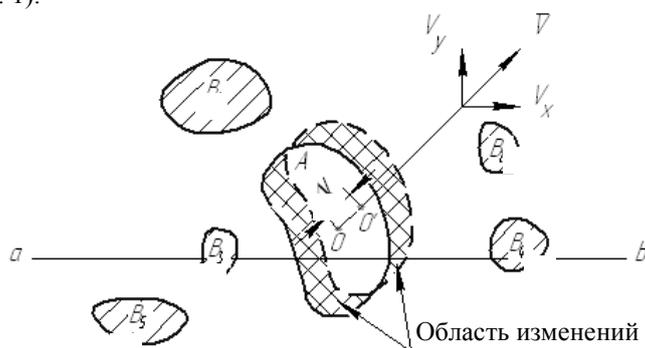


Рис. 1. Пример изображения, содержащего подвижный объект A и неподвижные предметы B_1, \dots, B_5 в зоне наблюдения

За время, равное периоду следования сравниваемых кадров ΔT_k , объект сместится на некоторое расстояние Δl . В общем случае $\Delta T_k = kT_k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа натурального ряда; T_k – период следования смежных кадров. Конкретное значение k выбирается с учетом динамики перемещения объекта, исходя из оптимальных условий формирования МРС. Как видно из рис. 1, МРС, выделяемый при сравнении сигналов, соответствующих строке ab n -го и $(n+k)$ -го кадров, должен нести определенную информацию о параметрах объекта – о положении, габаритах, направлении и скорости перемещения. Соответствующие этим признакам параметры МРС можно использовать для управления параметрами решающего правила в режиме слежения за объектами с целью оптимизации режима работы автоматизированной системы наблюдения. Заметим, что такие параметры, как скорость и направление перемещения объекта, могут быть с наибольшей достоверностью определены при анализе последовательности разностных сигналов, полученной в результате сравнения видеосигналов как минимум двух пар кадров:

$$\begin{aligned} Z^I[E_{i,j}] &= [E_{i,j}^{(n+k)}] - [E_{i,j}^{(n)}], \\ Z^{II}[E_{i,j}] &= [E_{i,j}^{(n+2k)}] - [E_{i,j}^{(n+k)}]. \end{aligned} \quad (1)$$

Дополнительные возможности улучшения вероятностных характеристик обнаружения в сложных условиях наблюдения при высоком уровне помех могут быть реализованы путем использования в составе решающего правила принципа пространственного накопления МРС по площади области изменений.

Целью работы является определение зависимостей, на основе которых возможна организация оперативного управления решающим правилом в автоматизированной системе, обладающей способностью оптимизации и самоадаптации параметров алгоритма в изменяющихся условиях наблюдения в режимах обнаружения и последующего слежения за подвижными объектами.

Анализ источников помех и ошибок обнаружения

При решении задачи обнаружения подвижных объектов могут иметь место ошибки двух родов.

- Ошибка первого рода, называемая ложной тревогой, заключается в принятии автоматическим устройством ошибочного решения о наличии сигнала об изменениях в содержании кадра, когда такой сигнал отсутствует, вследствие превышения в каком-либо элементе массива шумовой составляющей порогового уровня Π_0 :

$$|Z[E_{i,j(ш)}]| \geq \Pi_0, \tag{2}$$

здесь $|Z[E_{i,j(ш)}]|$ – абсолютное значение шумовой составляющей в межкадровом разностном сигнале.

- Ошибка второго рода – пропуск сигнала – возникает в том случае, если в результате взаимодействия сигнала с шумом на входе порогового устройства суммарное напряжение окажется меньше напряжения порога:

$$|Z[E_{i,j(ш)}] + Z[E_{i,j}]| \leq \Pi_0. \tag{3}$$

Выбор порога ограничения Π_0 определяется соображениями эффективного подавления помехи, присутствующей в разностном сигнале. Считая, что шум на входе порогового устройства имеет нормальное распределение, и учитывая симметричность функции, описывающей закон нормального распределения, вероятность ложной тревоги при двухстороннем пороге ограничения $\pm \varepsilon$ может быть рассчитана по формуле

$$P_{лт} = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Pi_0/\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - 2 \cdot \Phi\left[\frac{\Pi_0}{\sigma}\right], \tag{4}$$

где σ – среднеквадратическое значение шумовой составляющей в МРС.

Условная вероятность правильного обнаружения сигнала от объекта

$$P_{прав} = 2\Phi[\mu_{(pc)} - \varepsilon / \sigma], \tag{5}$$

где $\mu_{(pc)}$ – отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале (1).

В выражениях (4) и (5) $\Phi[v] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – интеграл вероятностей.

Важно отметить, что отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале $\mu_{(pc)}$ всегда меньше отношения сигнал/шум μ в исходных сигналах сравниваемых кадров.

Примем следующие обозначения: v – скорость перемещения изображения объекта в плоскости изображения; d – пространственный период элементов фотоприемного устройства (ФПУ); T_n – время накопления сигнала в ФПУ; T_k – период смены кадров; $\Delta T_k = k \cdot T_k$ – интервал времени между сравниваемыми кадрами; $k = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа натурального ряда.

Рассмотрим вначале случай относительно медленных перемещений, когда за время накопления изображение подвижного объекта успеет переместиться на расстояние значительно меньшее одного пространственного периода элементов: $T_n \cdot v \ll d$. Чтобы зарегистрировать максимально возможные изменения в кадре, связанные с перемещением наблюдаемого объекта, необходимо выполнение условия $k \gg 1$ (т.е. $\Delta T_k \gg T_k$). В этом случае шумовые составляющие в каждом из сравниваемых кадров можно рассматривать как случайные не коррелированные между собой процессы. Тогда отношение сигнал/шум в разностном сигнале $\mu_{(pc)}$ равно

$$\mu_{(pc)} \approx \mu/\sqrt{2}. \tag{6}$$

В случае быстрых перемещений изображения наблюдаемого объекта, когда $T_n \cdot v \gg d$, фактическое время накопления T'_n , определяющее величину сигнала от подвижного объекта, уменьшается пропорционально скорости $T'_n = d/v$. Тогда величину $T_n / T'_n = T_n \cdot v / d$ можно рассматривать как коэффициент дополнительного уменьшения отношения сигнал/шум при быстрых перемещениях объекта. Таким образом, фактическое отношение сигнал/шум в разностном сигнале при быстрых перемещениях можно оценивать по приближенной формуле

$$\mu_{(pc)} \approx \mu / (\sqrt{2} \cdot T_n \cdot v/d). \quad (7)$$

Дополнительные возможности внутрикадровой обработки

Ниже рассмотрим дополнительные возможности повышения обнаружительной способности АВС, основанные на использовании внутрикадровой пространственной корреляции в анализируемых изображениях.

Обычно изменения, происходящие в кадре в результате перемещения объектов, находящихся в угловом поле телевизионной системы, занимают площадь, в несколько раз большую, чем площадь одного элемента изображения. Таким образом, на этапе обработки МРС представляется возможным использовать алгоритм накопления сигналов по площади области изменений, позволяющий существенно повысить чувствительность автоматизированной системы наблюдения к обнаружению малоконтрастных подвижных объектов при наличии значительных шумов во входном сигнале [1–3]. Указанный алгоритм заключается в следующем.

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 накопления была полностью расположена в области изменений (рис. 2).

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

$$P_{лт}(T_k) = 1 - \prod_{k=1}^N [1 - P_{лт}(k)], \quad (8)$$

где N – число зон накопления в кадре, равное отношению полного числа элементов изображения к числу элементов элементарной зоны накопления,

$$N = K/(m \times n). \quad (9)$$

Учитывая, что ложные обнаружения в любой из зон равновероятны, выражение (8) можно записать иначе:

$$P_{лт}(T_k) = 1 - [1 - P_{лт}(k)]^N. \quad (10)$$

Величина $P_{лт}(k)$ обычно настолько мала ($P_{лт}(k) \ll 1$), что выражение можно значительно упростить, ограничившись всего одним членом полинома:

$$P_{лт}(T_k) \approx N \cdot P_{лт}(k). \quad (11)$$

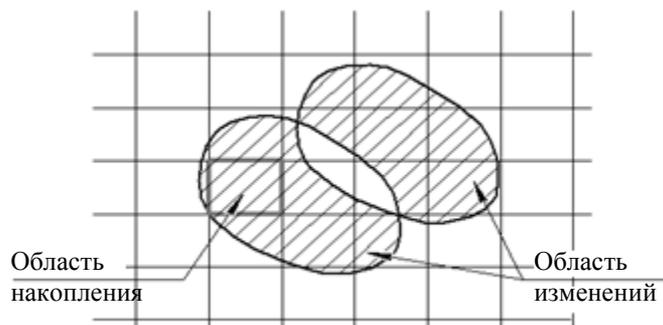


Рис. 2. Выбор размеров дискретной области накопления

Решение об обнаружении подвижного объекта в k -ой зоне накопления принимается в том случае, если число элементов (в пределах данной зоны накопления), в которых межкадровый разностный сигнал 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 (3) в не меньшем, чем p , числе элементов в k -ой зоне накопления.

При этом вероятность ложной тревоги в k -той зоне накопления можно вычислить по формуле

$$P_{лт}(k) = \sum_{l=p}^q C_q^l [P_{лт}]^l \cdot [1 - P_{лт}]^{q-l}, \quad (12)$$

где $P_{лт}$ – вероятность выполнения события, описываемого условием (2), т.е. вероятность регистрации выброса шума за установленный порог ограничения, которая может быть рассчитана по формуле (5); C_q^l – число сочетаний из q по l .

Вероятность ошибки второго рода – пропуска объекта – при использовании рассмотренного алгоритма накопления равна

$$P_{\text{проп}}^{(H)} = 1 - P_{\text{прав}}^{(H)} = \sum_{l=q-p+1}^q C_q^l [P_{\text{проп}}]^l \cdot [1 - P_{\text{проп}}]^{q-l}, \quad (13)$$

где $P_{\text{проп}}$ – вероятность выполнения события, описываемого условием (3) т.е. условная вероятность пропуска сигнала в одном из элементов зоны накопления, которая может быть рассчитана по формуле (6).

На рис. 3 в качестве примера приведен фрагмент характеристик обнаружения, иллюстрирующий зависимость вероятности правильного обнаружения $P_{\text{прав}} = 1 - P_{\text{проп}}^{(H)}$ от величины $[\mu_{(pc)} - \varepsilon/\sigma_{(pc)}]$, при соотношениях p/q , предопределяющих решающее правило в случае использования алгоритма накопления сигналов по площади области изменений в кадре (см. выше).

Дополнительный эффект повышения надежности АВС с точки зрения улучшения характеристик обнаружения и снижения вероятности ложных тревог может дать многоканальный принцип построения архитектуры системы. При наличии нескольких (например, трех) независимых каналов наблюдения за объектами, различающихся используемым спектральным оптическим диапазоном или какими-либо другими параметрами, вероятности ошибок первого и второго рода могут оцениваться следующим образом:

$$P_{лт} = P_{лт(1)} \cdot P_{лт(2)} \cdot [1 - P_{лт(3)}] + P_{лт(2)} \cdot P_{лт(3)} \cdot [1 - P_{лт(1)}] + P_{лт(1)} \cdot P_{лт(3)} \cdot [1 - P_{лт(2)}] + P_{лт(1)} \cdot P_{лт(2)} \cdot P_{лт(3)}, \quad (14)$$

$$P_{\text{проп}} = P_{\text{проп}(1)} \cdot P_{\text{проп}(2)} \cdot [1 - P_{\text{проп}(3)}] + P_{\text{проп}(2)} \cdot P_{\text{проп}(3)} \cdot [1 - P_{\text{проп}(1)}] + P_{\text{проп}(1)} \cdot P_{\text{проп}(3)} \cdot [1 - P_{\text{проп}(2)}] + P_{\text{проп}(1)} \cdot P_{\text{проп}(2)} \cdot P_{\text{проп}(3)}, \quad (15)$$

где $P_{лт(1),(2),(3)}$ и $P_{\text{проп}(1),(2),(3)}$ – вероятности ложных обнаружений и пропусков в первом, втором и третьем каналах. Эти выражения соответствуют условию принятия решения об обнаружении объекта по правилу «2 из 3-х», т.е. условию совпадения результатов обнаружения не менее чем в 2-х из 3-х независимых каналах.

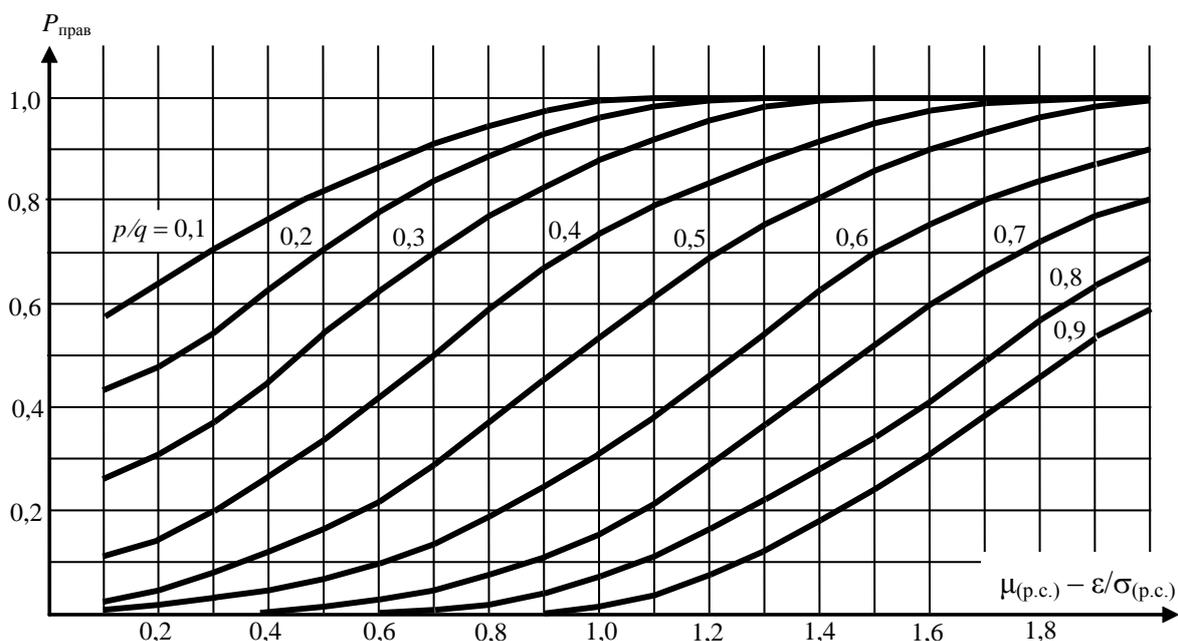


Рис. 3. Фрагмент характеристик обнаружения при различных соотношениях p/q

Заключение

При наличии информации о возможных размерах, диапазоне скоростей, относительном контрасте и других параметрах объектов наблюдения можно, используя выражения (2)–(15), оптимизировать параметры алгоритма обнаружения. Однако, учитывая достаточно сложный характер взаимосвязей множества различных, рассмотренных выше параметров (μ , ε , σ , p , q , N , m , n , v , d , k , T_k и др.), решение подобной задачи может быть с наибольшей эффективностью реализовано путем компьютерного моделирования [4, 5].

Очевидно, что при использовании встроенных вычислительных средств на основе полученных зависимостей возможно создание автоматизированных видеоинформационных систем наблюдения за объ-

ектами, обладающих способностью адаптации и самоадаптации к возможным изменениям реальных условий функционирования в режимах обнаружения и последующего слежения за объектами.

Работа проведена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. по государственному контракту № П695 от 12 августа 2009 г.

Литература

1. Андреев А.Л. Устройство подавления помех. Авт. свид. СССР № 713497 от 5.10.1979 г.
2. Андреев А.Л. Оптико-электронный датчик для автоматического обнаружения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1984. – № 2. – С. 79–85.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н. Перестраиваемый телевизионный датчик на ПЗС для оптико-электронных систем обнаружения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1989. – № 10. – С. 73–76.
4. Андреев А.Л., Тоткайло С.В. Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сборник трудов VII Международной конференции «Прикладная оптика-2006». Т. 1. Оптическое приборостроение. – СПб, 2006. – С. 48–52.
5. Андреев А.Л., Лбова Т.П. Разработка структуры комплексной модели оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5(63). – С. 10–15.

- Андреев Андрей Леонидович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, and-andr@yandex.ru
- Бурдова Наталья Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Bagira_koshara@mail.ru
- Коротаев Валерий Викторович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru