

УДК 621.396.067.7

Селекция ложных целей при обнаружении камер скрытого видеонаблюдения с помощью цифровой обработки

*Рахманин М.Ю., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Вязовых М.В. к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
baryshnikov@bmstu.ru*

Введение

В настоящее время широкое развитие электроники, оптики и интегральных технологий позволяет производить малогабаритные видеокамеры на основе ПЗС или КМОП матриц, имеющие объективы с диаметрами входного зрачка до 1 мм (объективы типа *pinhole*). Такие видеокамеры позволяют вести несанкционированное скрытое видеонаблюдение (СВИД), поскольку, благодаря малым габаритам, могут быть замаскированы в предметах интерьера, встраиваться в стены или предметы одежды. Развитие подобных систем СВИД вызывает необходимость разработки систем обнаружения камер скрытого видеонаблюдения. Такие системы должны обеспечивать высокую вероятность обнаружения камер с объективами типа *pinhole* на дальностях от 1 до 40-50 метров.

Действие подобных систем основано на эффекте световозвращения. Любая система СВИД имеет в своём составе объектив и фоточувствительную ПЗС-матрицу, установленную в заднюю фокальную плоскость объектива. Эти два элемента образуют автоколлимационную систему, обладающую свойствами световозвращения. Очевидно, что наиболее эффективным методом обнаружения таких систем является метод лазерной локации. Однако, учитывая экстремально низкие ПСВ целей и небольшие дальности обнаружения, возникает большое количество "ложных" бликов от диффузных отражателей, интенсивность которых не только не меньше интенсивности "полезных" бликов, но, зачастую, и больше.

Поэтому возникает необходимость разработки алгоритма селекции световозвращающих бликов от диффузно-отражающих с применением методов цифровой обработки изображений. При этом также необходимо разработать методику расчёта или

выбора оптимальных настроек системы (длительность импульса лазерной подсветки и времени накопления ПЗС-матрицы).

Описание алгоритма

На входе алгоритма необработанное изображение содержит полутонные объекты, соответствующие световозвращённым и диффузно-отражённым бликам. "Полезные" блики от камер СВИД, в зависимости от дальности до объекта, будут занимать от одного до нескольких десятков пикселей, причём эта величина практически не меняется от мощности лазерного излучения, при этом их форма будет близка к кругу. "Ложные" же блики от диффузно-отражённых объектов будут иметь произвольную форму, а их площадь будет зависеть от мощности лазерного излучения и положения объекта относительно системы обнаружения. Именно на этих особенностях и основывается алгоритм цифровой селекции.

Первым этапом обработки изображения, как и в классических алгоритмах, является получение разностного кадра, путём вычитания двух соседних "активного" и "пассивного" кадров. Далее следует пороговая обработка разностного кадра. Учитывая, что форма и размеры "ложных" бликов от диффузно-отражающих объектов сильно зависят мощности лазерного излучения, целесообразно использовать несколько порогов. Анализируя бинарные изображения, сформированные после обработки разностного кадра с применением большого порогового значения, не превышающего значений интенсивности "полезных" бликов, и меньшего порогового значения, можно выделить объекты, мало изменяющие свою форму и размеры, которые и будут соответствовать световозвращающим объектам.

Теперь рассмотрим непосредственно основные этапы алгоритма цифровой селекции.

Основные этапы алгоритма.

1. Вычисление разностного кадра.

$$\Delta X(m, n) = X_A(m, n) - X_P(m, n).$$

где X_A - "активный" кадр, X_P - "пассивный" кадр.

"Активный" кадр - это кадр, образованный отражёнными фоновым и лазерным излучениями.

"Пассивный" кадр - это кадр, образованный только отражённым фоновым излучением.

Данный этап алгоритма позволяет исключить из последующей обработки отражённое фоновое излучение от объектов, находящихся в зоне подсвета лазера.



Рис. 1. Разностный кадр

2. Вычисление основного T_0 и двух дополнительных пороговых значений T_1, T_2 .

В связи с тем, что объектам, расположенным на различных расстояниях от системы, будут соответствовать изображения с различной интенсивностью пикселей, вычисление основного и дополнительных пороговых значений следует проводить не для всего кадра в целом, а отдельно для каждой области кадра размером 5x5 пикселей. Для k -й области изображения основное пороговое значение определяется выражением 1:

$$T_{0k} = 3\sigma + \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \Delta X \left[\left(\left\lfloor \frac{k * 5}{N} \right\rfloor - 1 \right) * 5 + i, \left(\text{mod} \left(\frac{k}{N} \right) - 1 \right) * 5 + j \right], (1)$$

где функция *mod* вычисляет остаток от деления, σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) значения шума изображения, N - число пикселей в строке изображения.

Благодаря такому разбиению пороговые значения будут адаптивно меняться, в зависимости от интенсивности пикселей, лежащих внутри каждой из областей, и величины СКО шума изображения. Исследования, проведённые в программе MATLAB, показали, что наиболее целесообразно использовать два дополнительных

пороговых значения. В ходе экспериментов установлены оптимальные значения первого дополнительного порогового значения $T_1=0,7T_0$ и второго дополнительного порогового значения $T_2=1,55T_0$. Также значение T_1 не должно превышать число 255 для 8-битного полутонового изображения, а значение T_2 не должно быть меньше величины 3σ .

СКО значения шума изображения вычисляется по одному пикселю для последовательности разностных кадров NF . Пиксель был выбран на крае матрицы, куда не попадает отраженное лазерное излучение вследствие того, что поле зрения приемного канала системы обнаружения немного больше поля подсвета, формируемого передающим каналом. Математическое выражение СКО записано в формуле 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NF-1} \sum_{i=1}^{NF} [\Delta X_i(m, n) - \overline{\Delta X}(m, n)]^2}; \quad (2)$$

3. Формирование бинарных изображений при помощи дополнительных пороговых значений T_1 и T_2 .

Формирование бинарных изображений происходит путём сравнения значения интенсивности каждого пикселя разностного кадра с величиной порогового значения и присвоения соответствующему пикселю бинарного изображения единицы, в случае превышения им порогового значения, и нуля в обратном случае.

$$B_i(m, n) = \begin{cases} 1, & \Delta X(m, n) \geq T_i \\ 0, & \Delta X(m, n) < T_i \end{cases}, i = 1, 2;$$

Из рисунка 2 видно, что после применения пороговой обработки на бинарных изображениях остаётся большое количество бликов, значит для селекции световозврательных объектов необходима дальнейшая обработка и фильтрация изображения.

4. Морфологическая обработка полученных бинарных изображений.

Проведём морфологическую обработку бинарных изображений. Для изображения, полученного после обработки с помощью порогового значения T_1 целесообразно провести морфологическую операцию *размыкание*, так как это изображение было получено после обработки меньшим порогом. *Размыкание* позволяет сгладить границы объектов, избавившись от мелких выступов и зубцов. Математически операция *размыкание* определяется выражением 3.

$$B_i = B_i \circ SE_p = (B_i \ominus SE_p) \oplus SE_p, i = 1; \quad (3)$$

где SE_p - это структурообразующий элемент.

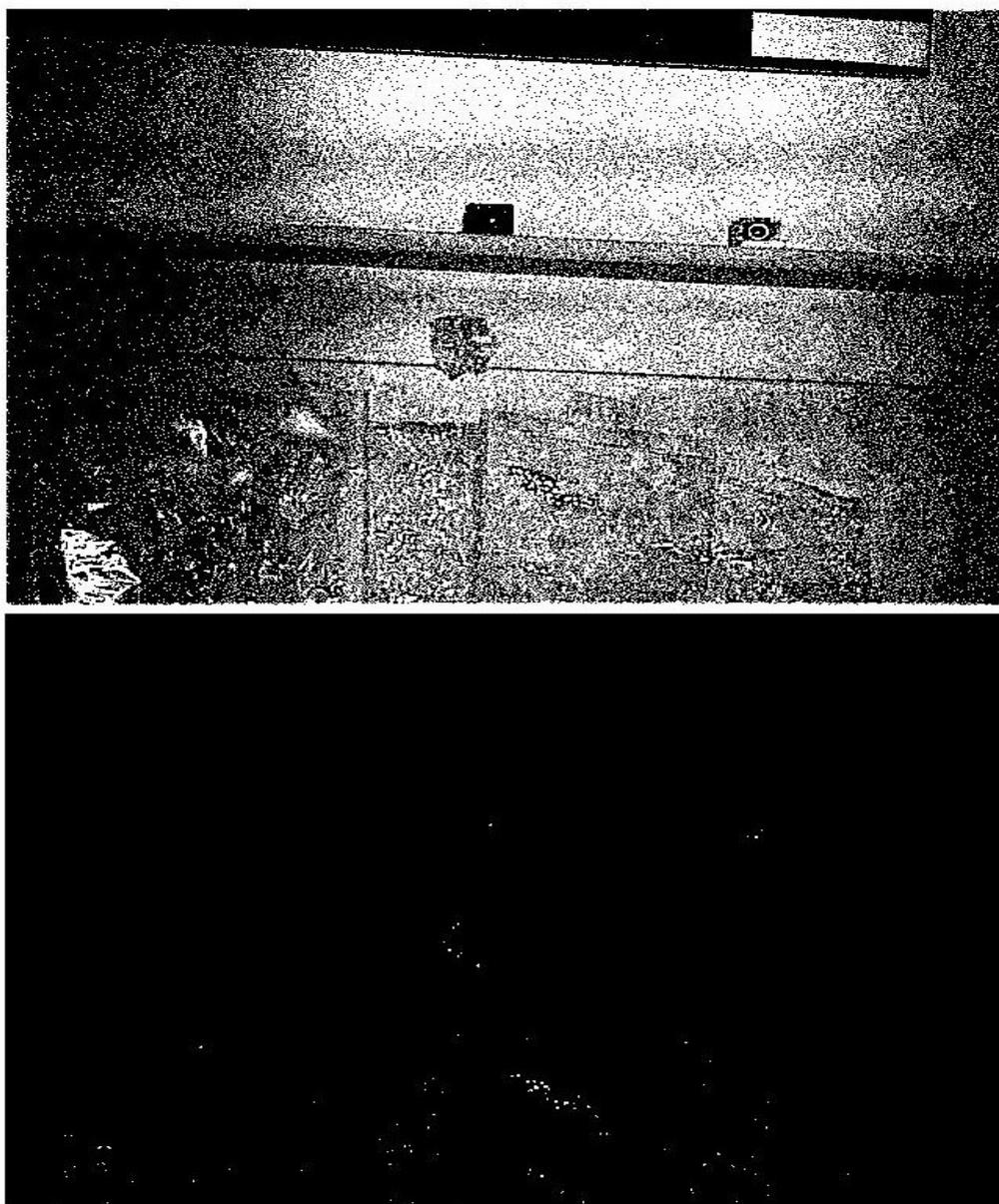


Рис.2. Бинарные изображения после обработки с применением порога T_1 (верхнее) и T_2 (нижнее)

При выборе структурообразующего элемента для *размыкания* необходимо учитывать, что блики от световозвращающих объектов имеют площадь от 1 до 12 пикселей, поэтому он должен иметь небольшие размеры, чтобы не удалить "полезные" блики. В ходе экспериментов установлено, что оптимальным структурообразующим элементом для операции *размыкание* является квадратный примитив размером 2×2 .

Затем, теперь уже для каждого из бинарных изображений, проведём морфологическую операцию *замыкание*. В отличие от *размыкания*, *замыкание* "заливает"

длинные углубления малой ширины и заполняет малые отверстия, диаметр которых меньше размеров структурообразующего элемента. Применение данной операции позволит объединить близкорасположенные на изображении объекты, что увеличит площадь "ложных" бликов от диффузно-отражающих объектов, и позволит их отфильтровать на следующих этапах алгоритма. Математически операция *замыкание* определяется выражением 4.

$$B_i = B_i \circ SE_3 = (B_i \oplus SE_3) \ominus SE_3, i = 1, 2; (4)$$

где SE_3 - это структурообразующий элемент.

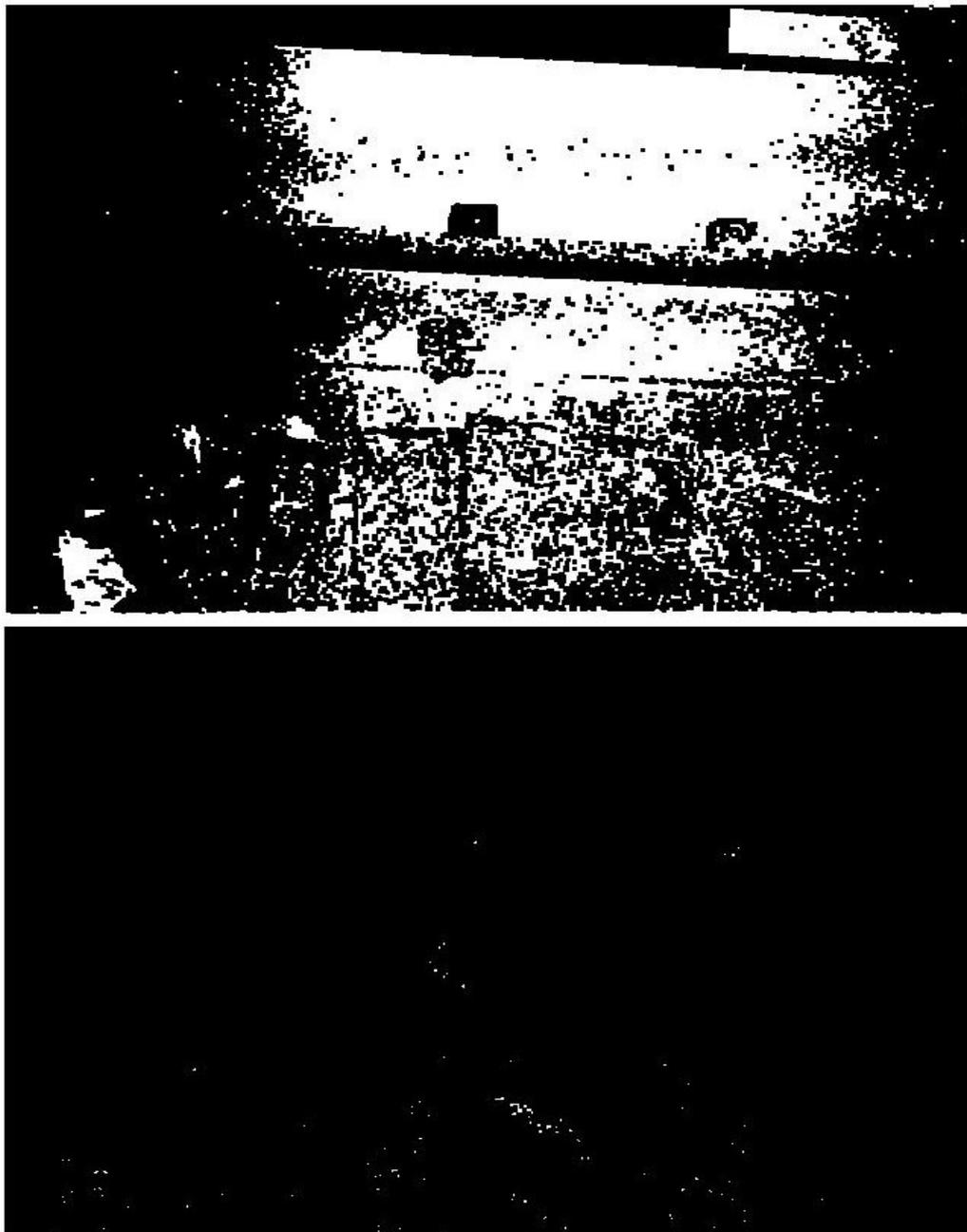


Рис. 3. Бинарные изображения после морфологической обработки: B_1 (сверху) и B_2 (снизу)

При выборе структурообразующего элемента следует быть осторожным, так как при слишком больших его размерах *замыкание* приведёт к слиянию не только бликов от диффузных объектов, но и "поглощению" "полезного" блика от световозвращающего объекта. В этом случае выделить его, как цель, будет невозможно. В ходе экспериментов установлено, что оптимальным значением структурообразующего элемента является квадратная единичная матрица размером 3x3.

5. Сегментация объектов на бинарных изображениях

После проведения морфологической обработки изображений необходимо провести их сегментацию, то есть выделение компонент связности - связанных областей переднего плана. В результате проведения сегментации будет выделен набор объектов, для которых вычисляется площадь, отношение квадрата полупериметра описанного вокруг объекта прямоугольника к площади объекта, соотношение длин сторон этого прямоугольника. Следует обратить внимание, что целесообразнее выделить 8-связанные структуры, так как в этом случае за один объект будут приниматься более крупные структуры, что позволит отфильтровать больше "ложных" бликов при анализе формы и размеров объектов.

6. Фильтрация ложных объектов на основе анализа формы и размеров объектов на каждом бинарном изображении.

Для каждого из объектов, выделенных на предыдущем этапе, и с использованием вычисленных для них параметров производится фильтрация объектов - удаление я бинарных изображений объектов, не удовлетворяющих хотя бы одному из следующих условий:

- площадь объекта $S_{об}$ не превышает максимально допустимое значение S_{max} ;
- отношение квадрата полупериметра описанного вокруг объекта прямоугольника к площади объекта находится в диапазоне $4 \leq p^2/S_{об} \leq 8$;
- отношение сторон прямоугольника лежит в диапазоне $0,5 \leq W/H \leq 2$.

Первое условие является фильтрацией по максимально возможному размеру объекта, последние два по форме объекта.

7. Фильтрация ложных объектов на основе анализа изменения площади объектов.

Как было сказано выше, "полезные" блики от световозвращающих объектов не меняют свою площадь в зависимости от мощности лазерного излучения, следовательно



Рис. 4. Бинарные изображения после фильтрации по форме и максимальной площади B_1 (сверху) и B_2 (снизу)

их площадь не изменится и на бинарных изображениях, полученных при обработке разностного кадра различными пороговыми значениями. Для фильтрации объектов, изменяющих свою площадь, проведём следующие операции. Вычтем из бинарного изображения B_1 изображение B_2 . На результирующем изображении объекты, не

изменившие свою площадь, будут отсутствовать, а от объектов, увеличивших свою площадь, останется "корона", т.е. пиксели, на которые увеличился размер объектов. Далее проведём *реконструкцию* изображения V_1 по маске $V_1 - V_2$. *Реконструкция* восстанавливает только те объекты, имеющиеся на изображении V_1 , части которых присутствуют на маске $V_1 - V_2$. В результате получится бинарное изображение, эквивалентное V_1 , но на котором присутствуют только те объекты, которые изменили свою площадь. Соответственно, для получения изображения с объектами, не изменившими свою площадь достаточно вычестить из исходного изображения V_1 изображение, полученное после реконструкции.

$$V'_1 = V_1 - V_2; V''_1 = V_1 - \text{реконструкция}(V_1, V'_1);$$

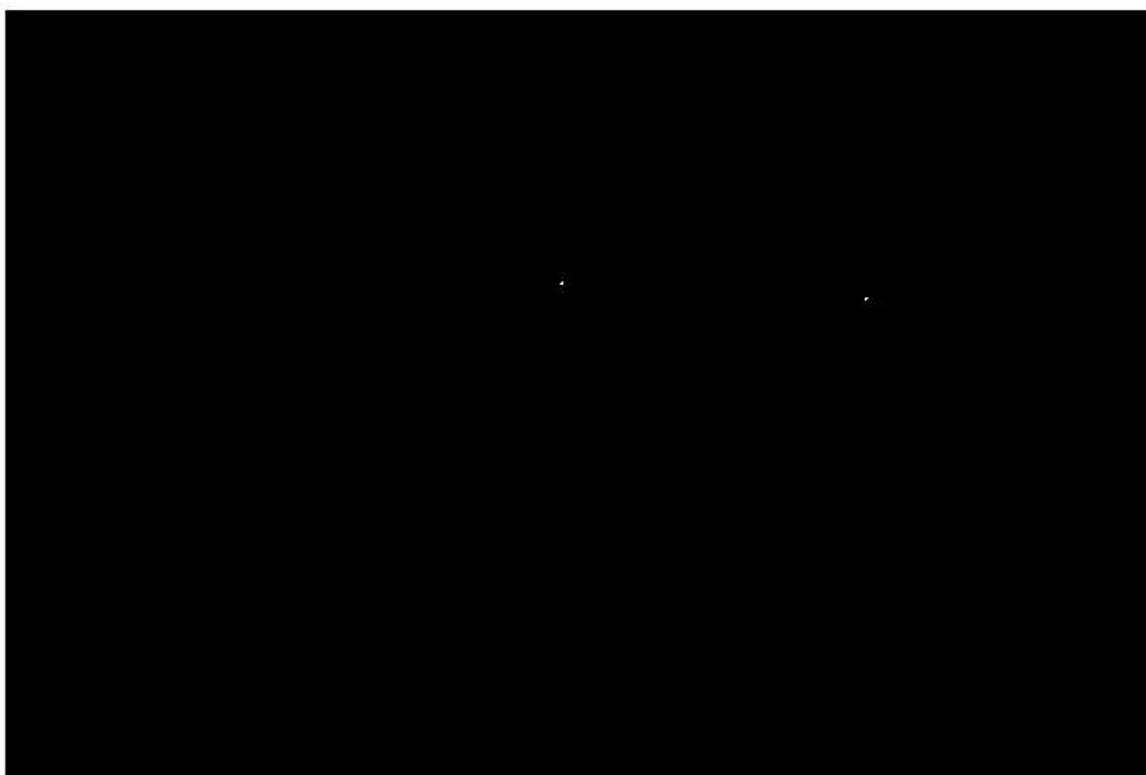


Рис. 5. Бинарное изображение после фильтрации объектов изменяющих площадь

Отметим, также, что, фактически, в ходе этой операции было произведено логическое умножение изображений V_1 и V_2 .

Выделим обнаруженные цели, поместив на разностный кадр графические метки в точки, соответствующие центрам объектов, присутствующих на конечном бинарном изображении.

Структурная схема алгоритма представлена в Приложении 1.

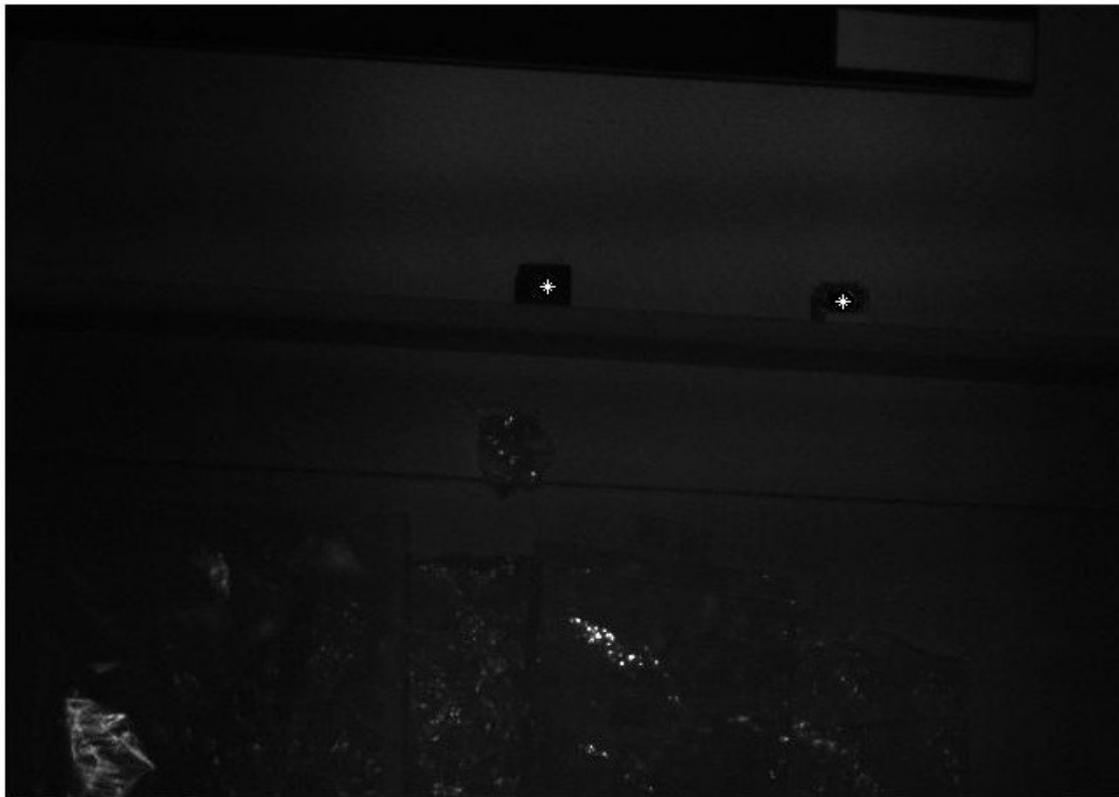


Рис. 6. Разностный кадр с графическим выделением обнаруженных видеокамер СВИД

Исследование статистических характеристик прибора обнаружения СВИД

Для исследования влияния длительности импульса лазерной подсветки и времени накопления ПЗС-матрицы на статистические характеристики прибора обнаружения СВИД была собрана следующая экспериментальная установка.

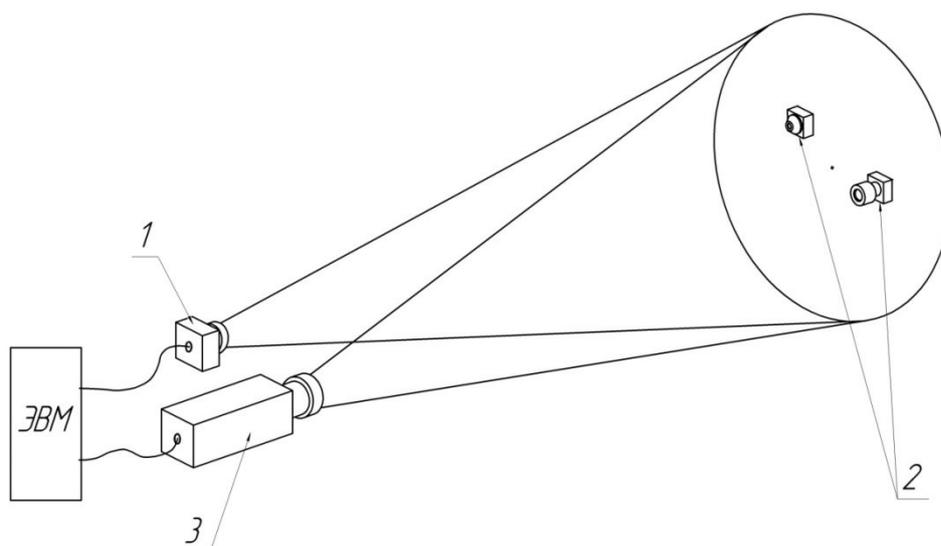


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Излучение от источника излучения 1 подсвечивает пространство предметов, в котором находятся две видеокамеры 2 с объективами типа *pinhole*. Отражённое излучение от видеокамер 2 и диффузно-отражающих объектов регистрируется приёмной видеосистемой 3. Источником излучения служил лазерный диод. Источник излучения и приёмная ПЗС-матрица синхронизированы между собой и управляются с помощью компьютера, на который, также, передаётся видеопоток с приёмной видеосистемы. В ходе эксперимента был получен ряд видеофайлов, соответствующих разным настройкам системы обнаружения систем СВВД (длительности импульса лазерной подсветки и времени накопления ПЗС-матрицы). Полученные видеофайлы прошли покадровую обработку в среде MATLAB, в соответствии с рассмотренным алгоритмом.

Вероятность правильного обнаружения вычислялась по формуле 5:

$$P_{обн} = \frac{n_{обн}}{n_{ц} \cdot n_{к}} \quad (5)$$

где $n_{обн}$ - количество правильно обнаруженных целей в $n_{к}$ кадров, $n_{к}$ - число кадров в обрабатываемой выборке, $n_{ц}$ - априорное количество целей в одном кадре.

Частота ложной тревоги вычислялась по формуле 6:

$$\omega = \frac{n_{лт}}{n_{к}}; (6)$$

где $n_{лт}$ - количество ложных целей в $n_{к}$ кадров.

Изначально проведена обработка видеофайлов снятых при следующих настройках:

- время накопления ПЗС-матрицы - 500 мкс, длительность импульса лазерной подсветки меняется от 1 мкс до 10 мкс с шагом 1 мкс;
- длительность импульса лазерной подсветки - 5 мкс, время накопления ПЗС-матрицы меняется от 100 мкс до 1000 мкс с шагом 100 мкс.

Результаты обработки видеофайлов в соответствии с разработанным алгоритмом представлены на рисунках 8-9.

Таблица 1

Статистические характеристики при $T_{нак} = 500$ мкс

$T_{из}$, мкс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{обн}$	0,835	0,84	0,855	0,825	0,85	0,89	0,94	0,935	0,955	0,965
$\omega_{лт}, \frac{\text{шт.}}{\text{кадр}}$	4,56	2,18	1,23	0,52	0,43	0,39	0,22	0,52	0,47	0,46

Таблица 2

Статистические характеристики при $T_{\text{имп}} = 5$ мкс

$T_{\text{из}}$, мкс	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$P_{\text{обн}}$	0,78	0,755	0,865	0,83	0,85	0,865	0,85	0,885	0,89	0,83
$\omega_{\text{лт.}} \frac{\text{шт.}}{\text{кадр}}$	0,51	0,56	0,59	0,46	0,43	0,61	0,38	0,28	0,41	0,61

Полученные результаты укладываются в теоретическое представление о происходящем процессе. Как видно из рисунка 10, из-за использования в алгоритме вычитания кадров время накопления ПЗС-матрицы не оказывает большого влияния на обнаружительные характеристики прибора. Из рисунка 9 видно, что на начальном этапе при малых длительностях импульса лазерной подсветки частота ложной тревоги велика (до 5 ложных целей на кадр), так как фильтрация объектов на основе анализа изменения их площади малоэффективна из-за того, что сама площадь практически не изменяется, а фильтрация по максимальной площади почти не даёт результатов, так как на бинарном изображении после пороговой обработки площади объектов очень малы. Далее, по мере увеличения длительности импульса лазерной подсветки увеличивается эффективность селекции диффузных объектов и повышается вероятность обнаружения цели, так как площадь "полезного" блика от световозвращающего объекта приближается к максимальной. В то же время дальнейшее увеличение длительности импульса лазерной подсветки приводит к увеличению количества "ложных" бликов от диффузно-отражающих объектов и их площади, что может привести к "поглощению" "полезного" блика "разросшимися" "ложными" бликами. Для предотвращения подобной ситуации необходимо изменять пороговые уровни - увеличивать уровень V_1 для уменьшения размеров диффузных объектов, и, в то же время, увеличивать уровень V_2 для поддержания эффективности фильтрации объектов, изменяющих площадь, и снижения количества "ложных" бликов. При этом новые значения пороговых уровней каждый раз подбираются опытным путём.

Исходя из полученных результатов, произведём оптимизацию параметров алгоритма цифровой селекции и настроек самого прибора обнаружения видеокамер СВВД для получения оптимальных обнаружительных характеристик.

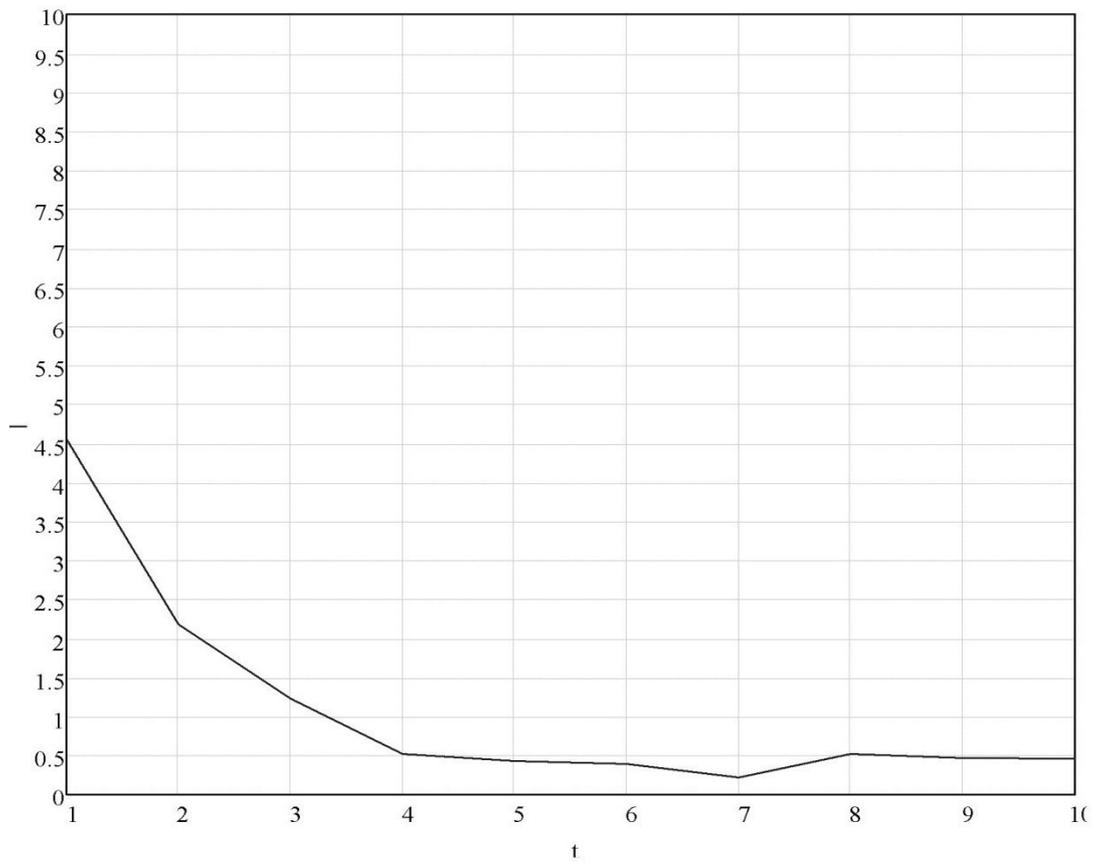
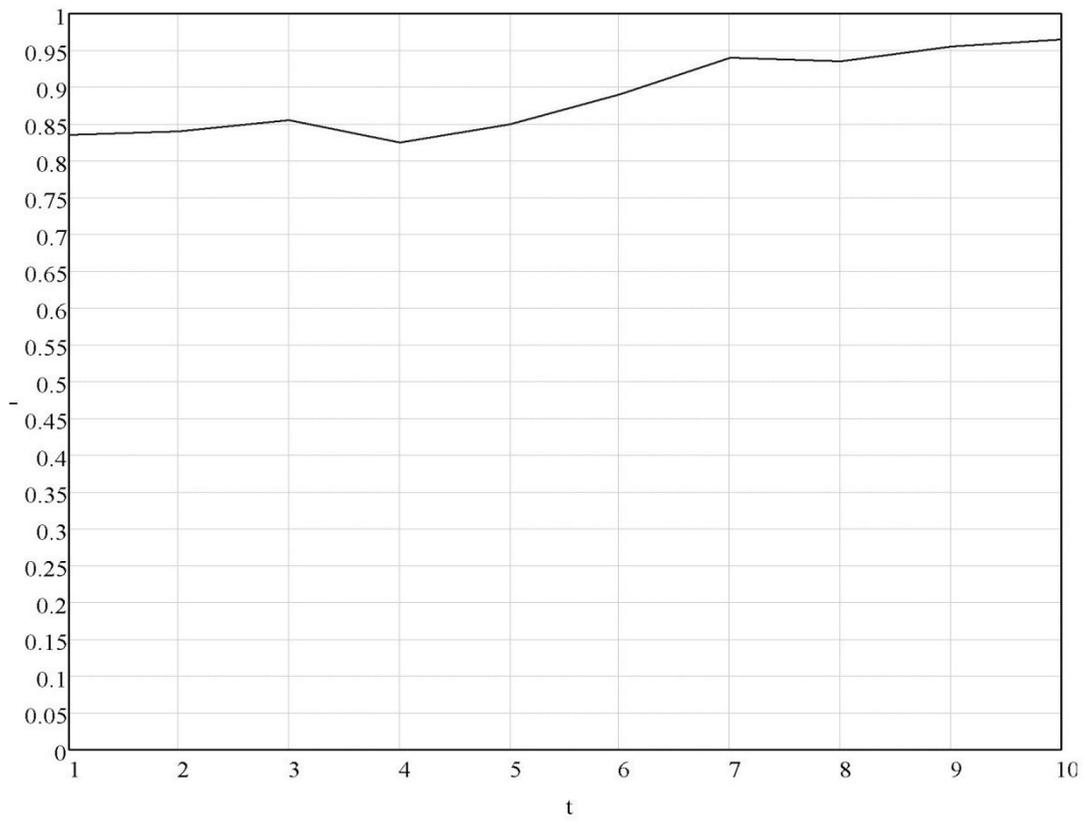


Рис. 8. Зависимости $P_{обн}$ и $\omega_{лт}$ от длительности импульса лазерной подсветки при времени накопления ПЗС-матрицы 500 мкс

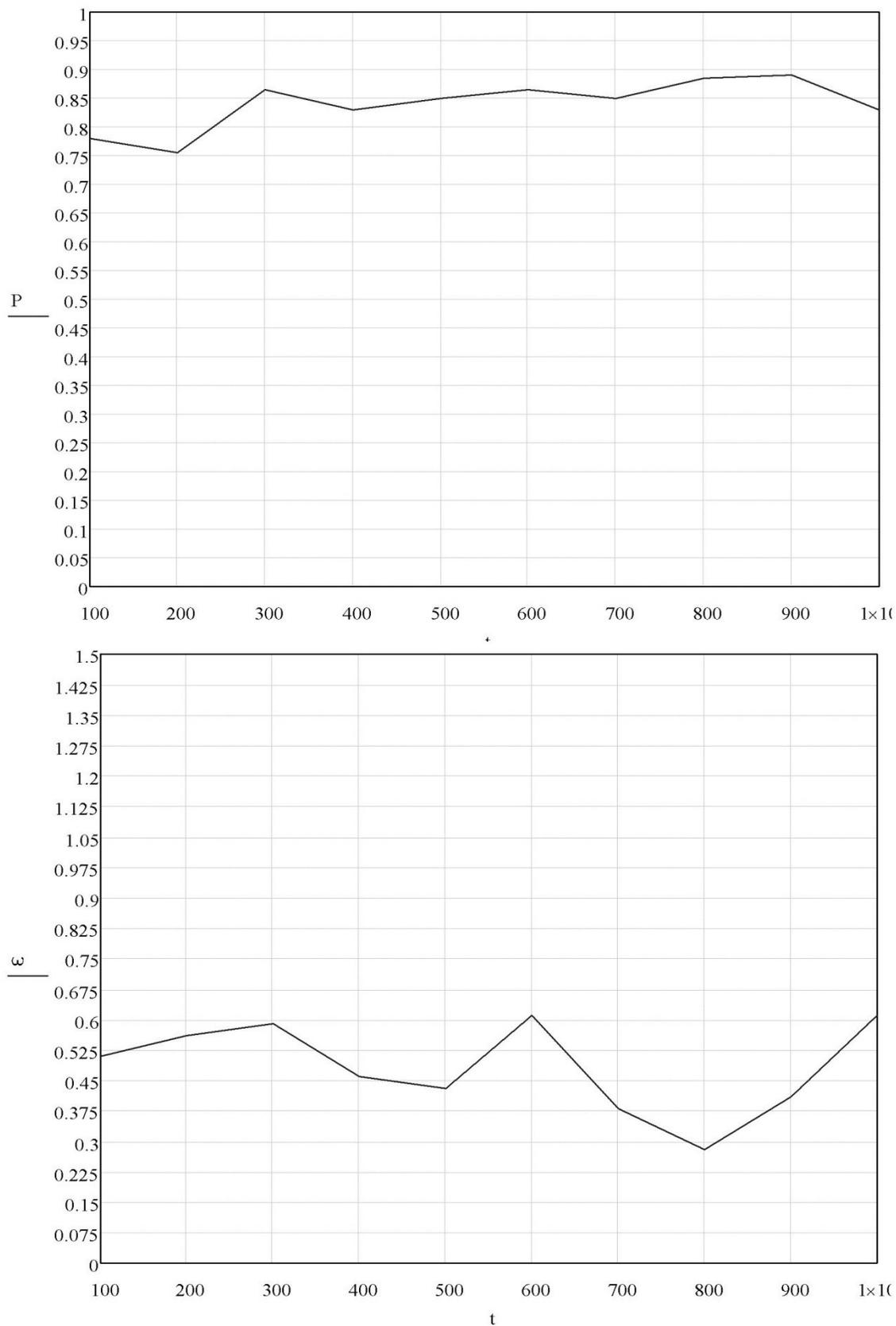


Рис. 9. Зависимости $P_{\text{обн}}$ и $\omega_{\text{лт}}$ от времени накопления ПЗС-матрицы при длительности импульса лазерной подсветки 5 мкс

Сначала, как отмечалось выше, увеличим длительность импульса лазерной подсветки. Так, при длительности импульса лазерной подсветки $T_{\text{и}}=15$ мкс и времени накопления ПЗС-матрицы $T_{\text{н}}=500$ мкс вероятность обнаружения цели $P_{\text{обн}}=0,905$, а частота ложной тревоги $\omega_{\text{лт}}=0,096$.

Далее, как отмечалось выше, проведём подбор оптимальных пороговых значений. Эмпирически подобраны следующие значения пороговых уровней:

$$B_1 = 0,75B_0;$$

$$B_2 = 2,15B_0$$

При этом вероятность обнаружения цели $P_{\text{обн}}=0,978$, а частота ложной тревоги $\omega_{\text{лт}}=0,176$.

Для уменьшения частоты ложной тревоги можно использовать метод "два из двух", то есть истинными считаются только те цели, которые присутствуют подряд на двух отфильтрованных кадрах. При таком подходе возможно снижение $P_{\text{обн}}$, однако значительно (до 5 раз) уменьшается частота ложной тревоги. Также использование критерия "два из двух" вдвое уменьшит быстродействие системы, однако при использовании современных видеокамер, работающих на частотах 200 Гц и выше, снижение быстродействия прибора в два раза, до 100 Гц, допустимо и не приведёт к ухудшению обнаружительных характеристик прибора из-за естественного тремора рук человека, имеющего частоту порядка 20-40 Гц. Для реализации данного метода необходимо произвести логическое умножение текущего и предыдущего отфильтрованных бинарных кадра.

$$B_{Fi} = B_i \& B_{i-1};$$

При этом вероятность обнаружения цели $P_{\text{обн}}=0,96$, а частота ложной тревоги $\omega_{\text{лт}}=0,036$. Видно, что вероятность обнаружения изменилась незначительно, а частота ложной тревоги уменьшилась почти в пять раз.

В таблице 3 приведены обнаружительные характеристики прибора на разных уровнях оптимизации. Видно, что оптимизация параметров алгоритма цифровой селекции и настроек самого прибора обнаружения видеокамер СВИД позволила получить высокую вероятность правильного обнаружения цели ($P_{\text{обн}}=0,96$) при небольшой (менее 4 ложных целей на 100 кадров) частоте ложной тревоги.

Таблица 3

Обнаружительные характеристики прибора на разных этапах оптимизации.

Уровень оптимизации	Без оптимизации	Без оптимизации	Оптимизация пороговых значений T_1 и T_2	Оптимизация пороговых значений T_1 и T_2 и использование метода "два из двух"
$T_{\text{имп}}, \text{мкс}$	10	15	15	15
$T_{\text{нак}}, \text{мкс}$	500	500	500	500
$P_{\text{обн}}$	0,965	0,905	0,978	0,96
$\omega_{\text{лт}}, \frac{\text{цель}}{\text{кадр}}$	0,46	0,096	0,176	0,036

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет обнаруживать камеры скрытого видеонаблюдения с высокой вероятностью ($P_{\text{обн}}=0,96$) при достаточно низкой вероятности появления ложных целей (частота возникновения ложных целей не превышает 4 на 100 кадров). Этого удалось добиться с помощью широкого применения цифровой обработки – как линейной, так и нелинейной. Проведенные эксперименты и последующее моделирование алгоритма позволили получить оптимальные значения параметров лазерной локационной системы (длительности импульса лазерной подсветки и времени накопления ПЗС-матрицы).

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB: пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 616 с. [Rafael C. Gonsales., Richard E. Woods. Digital Image Processing using MATLAB. Pearson Education, 2004. 625 p.]

2. Бокшанский В. Б., Е Тэ Вун, Вязовых М. В., Литвинов И. С. Метод селекции световозвращающих объектов от диффузных с помощью цифровой адаптивной обработки// Инженерный журнал: наука и инновации. 2013.- № 9(21). С. 42-54.
3. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Животовский И.В., Карасик В.Е. Анализ возможности дистанционного обнаружения камер скрытого видения на основе эффекта световозвращения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. Т.3, №4-5. С. 76-86.

Приложение 1

Структурная схема алгоритма цифровой селекции световозвращающих объектов

