

В.Б. Бокшанский, Е Тэ Вун,
М.В. Вязовых, И.С. Литвинов, А.Н. Перов

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖЕНИИ СВЕТОВОЗВРАЩАТЕЛЕЙ

Рассмотрены методы повышения помехоустойчивости лазерных локационных систем, предназначенных для автоматического обнаружения световозвращателей на сложном высококонтрастном фоне в широком поле зрения. Представлен алгоритм сегментации бинарного изображения, полученного после пороговой обработки межкадровой разности, с целью выделения локационных изображений объектов.

E-mail: vassily@bmstu.ru, nightcreak@gmail.com

Ключевые слова: лазерная локационная система, эффект световозвращения, IP-камера, пороговая обработка, бинарное изображение, стабилизация изображения, сегментация изображения, оконный фильтр, ПЛИС.

Обнаружение световозвращателей (СВ) (снайперский прицел, бинокль, скрытые видеокамеры и др.), ведущих встречное наблюдение, в настоящее время является актуальной задачей. С этой целью разработан ряд систем, позволяющих обнаруживать такие СВ дистанционно с расстояний от нескольких метров до нескольких километров и более. Их принцип действия основан на использовании эффекта световозвращения при зондировании области предполагаемого размещения СВ оптическим, как правило, лазерным, излучением. Лазерные локационные системы (ЛЛС) обнаружения СВ содержат приемный и передающий каналы, а также средство отображения информации о наблюдаемом пространстве и наличии/отсутствии СВ в поле зрения обнаружителя. ЛЛС позволяют оператору наблюдать блик от СВ непосредственно на экране монитора на фоне подстилающей поверхности. Однако зачастую малый контраст изображения блика от СВ на высококонтрастном фоне, а также небольшое время, предоставляемое для наблюдения, сильно затрудняют обнаружение СВ оператором. Поэтому для обеспечения уверенного обнаружения СВ требуется реализация автоматических режимов (без участия оператора), основанных на широком применении методов и алгоритмов цифровой обработки видеоизображений в реальном масштабе времени.

Цель данной работы — изложение нескольких методов повышения помехоустойчивости ЛЛС, предназначенных для автоматического обнаружения СВ, разработка усовершенствованного алгоритма

селекции целей по их пространственным характеристикам, например по площади и форме [1].

В ЛЛС объектив приемного канала формирует абберационно-дифракционное изображение входного зрачка объектива обнаруживаемого СВ в своей фокальной плоскости, совмещенной с плоскостью матричного приемника. На это изображение частично накладывается проекция индикатрисы отраженного от СВ зондирующего лазерного излучения.

В большинстве случаев изображения СВ на матричном приемнике имеют форму, близкую к кругу. Диаметр этой окружности

$$d_{\text{и}} \geq D_{\text{СВ}}\beta = D_{\text{СВ}} \frac{f'}{L}, \quad (1)$$

где $D_{\text{СВ}}$ — диаметр входного зрачка объектива СВ; β , f' — линейное увеличение и фокусное расстояние объектива приемного канала ЛЛС; L — дальность до СВ.

Из анализа выражения (1) следует, что чем дальше находится цель от системы обнаружения, тем меньшее число пикселей занимает ее изображение на матричном приемнике. Для оптимальной работы алгоритма целесообразно оценить максимальное и минимальное число пикселей, соответствующее линейному размеру изображений СВ на матричном приемнике, в зависимости от дальности. В качестве примера рассмотрим ЛЛС со следующими параметрами: размеры пиксела матрицы приемника $a \times a = 8 \times 8$ мкм, фокусное расстояние объектива приемного канала $f' = 35$ мм. В качестве целей используются видеокамеры со стандартным объективом, диаметр входного зрачка которого $D_{\text{СВ}} = 20$ мм, а также с объективом типа pinhole, у которого $D_{\text{СВ}} = 1$ мм. Минимальное расстояние, на котором можно обнаружить СВ, зависит от параллакса приемного и передающего каналов ЛЛС. Для компактных систем, предназначенных для обнаружения СВ на дальностях не более 100 м, минимальное расстояние ограничивается 1 м.

В результате проведенных расчетов минимальное и максимальное число пикселей, соответствующее линейному размеру изображений СВ на матричном приемнике, $n_{\text{min}} < 1$, $n_{\text{max}} \cong 90$.

Кроме того, на размер локационного изображения СВ на матричном приемнике оказывают влияние как дифракционные эффекты, так и абберации приемного объектива, регистрирующего индикатрису отраженного излучения.

Линейный размер дифракционного пятна определяется известным выражением $d = 2,44\lambda f' / D_{\text{пр}}$. При длине волны $\lambda = 0,8$ мкм,

фокусном расстоянии объектива $f' = 35$ мм и диаметре входного зрачка приемной системы $D_{\text{пр}} = 20$ мм $d = 3,42$ мкм. Другими словами, при работе на малых дальностях дифракция не будет оказывать существенного влияния на размер изображения СВ в фокальной плоскости приемного объектива. Таким образом, учитывая приведенные особенности формирования пятна, можно считать, что весь ретроотраженный поток от удаленных СВ будет сосредоточен всего на нескольких элементах приемника.

В современных ЛИС матричным приемником является видеокамера. В последнее время широкую популярность приобретают IP-камеры, представляющие собой цифровые видеокамеры, особенность которых заключается в передаче видеопотока в цифровом формате по сети Ethernet. В отличие от аналоговых камер при использовании IP-камер после получения видеокadra с ПЗС- или КМОП-матрицы камеры изображение остается цифровым вплоть до отображения на мониторе.

Благодаря тому что IP-камерам не требуется передавать аналоговый сигнал в формате *PAL* или *NTSC*, в них могут использоваться матрицы с большим разрешением. Стандартное разрешение видеокadra для сетевых камер 640×480 точек. Существуют мегапиксельные камеры с разрешениями видеокadra: 1280×1024 , 1600×1200 , 1920×1080 точек и более. Немаловажным преимуществом IP-камеры является возможность передачи видеокadров с требуемой частотой. На рынке сегодня представлены IP-камеры с частотой передачи больше 200 кадров в секунду.

В общем случае видеокadры $X_k(m,n)$ представляют собой цифровые данные о распределении интенсивности по дискретным координатам m и n в видеокadre под номером k . При этом подсветка пространства лазерным излучением осуществляется при регистрации каждого второго кадра. Другими словами, кадры разделяются на два типа: «активные» $X_{Акk}(m,n) = X_{2k+1}(m,n)$ и «пассивные» $X_{Пкk}(m,n) = X_{2k}(m,n)$. «Активные» кадры помимо изображения фона содержат локационное изображение, включающее блики от обнаруженных СВ, и изображения диффузноотражающих элементов наблюдаемого пространства. Напротив, «пассивные» кадры несут в себе информацию только о подстилающем фоне. Необходимо отметить, что различие между соседними кадрами заключается еще и в шумовой реализации $R_k(m,n)$, которая аддитивно добавляется к детерминированному изображению $E_k(m,n)$.

Матрица разности $S(m,n)$ «активного» и «пассивного» кадров содержит данные о локационном сигнале и шумовом поле. Для выделения только локационного сигнала применяется пороговая обработка.

Тогда можно записать:

$$X_k(m, n) = E_k(m, n) + R_k(m, n); \quad (2)$$

$$S(m, n) = X_{\Delta k}(m, n) - X_{\Pi k}(m, n); \quad (3)$$

$$B(m, n) = \begin{cases} 1, S(m, n) \geq U_{\text{пор}}; \\ 0, S(m, n) < U_{\text{пор}}; \end{cases} \quad (4)$$

где $B(m, n)$ — бинарное изображение; $U_{\text{пор}}$ — константа, задающая пороговое значение — порог.

Несмотря на простоту выражения (4), выбор порогового значения во многом определяет эффективность работы ЛЛС. По сути, именно на данной стадии принимается решение о наличии/отсутствии СВ в поле зрения ЛЛС. Следуя теории обнаружения, выбор порога $U_{\text{пор}}$ связан с заданной вероятностью правильного обнаружения/ложной тревоги, среднеквадратическим значением шума и выбранным вероятностным критерием.

Отсутствие у наблюдателя априорной информации о наличии в поле зрения ЛЛС СВ, а при его наличии — информации о его местоположении на экране монитора, существенно снижают вероятность правильного обнаружения при росте вероятности ложной тревоги. Это необходимо учитывать при выборе критерия, позволяющего определить пороговое значение воспринимаемого отношения сигнал/шум $\mu_{\text{пор}}$. Критерий Неймана — Пирсона наиболее полно удовлетворяет условиям поставленной задачи, поскольку не требует априорной информации об объекте и вероятностных характеристиках его обнаружения. Задав вероятность обнаружения цели $P_{\text{обн}} = 0,9999$ при вероятности ложной тревоги $P_{\text{л.т}} = 10^{-4}$, можно рассчитать пороговое значение отношения сигнал/шум [1]:

$$\mu_{\text{пор}} = \left[\Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}}) - \Phi^{-1}(1 - P_{\text{обн}}) \right]^2, \quad (5)$$

где $\Phi^{-1}(z)$ — функция, обратная функции Лапласа, причем

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (6)$$

В результате проведенных расчетов пороговое значение отношения сигнал/шум, соответствующее приведенным выше условиям, составит $\mu_{\text{пор}} = 54,8$. Так, при восьмибитном кодировании отсчетов яр-

кости изображения и среднеквадратическом значении шума $\sigma = 1,3$ единиц разрядной сетки соответствующее значение порога $U_{\text{пор}} \approx 70$.

На бинарном изображении помимо световозвращающих целей будут присутствовать ложные цели, возникающие из-за отражения лазерного излучения от диффузных объектов. Также ложные цели могут возникать после вычитания «активного» и «пассивного» кадров, если при экспозиции этих кадров видеокамера, входящая в состав ЛЛС, была сдвинута. Для компактных ручных ЛЛС, которые не предусматривают использование гиростабилизированной платформы, сдвиг обусловлен наличием тремора рук. Для устранения этой проблемы с целью повышения помехоустойчивости ЛЛС необходимо применять систему стабилизации видеоизображений.

В настоящее время широко применяются три метода стабилизации видеоизображений: оптический, электронный и цифровой [2].

При оптической стабилизации в объектив видеокамеры встраивается корректирующий линзовый элемент, который управляется электрическим приводом по сигналам от гиродатчиков, регистрирующих угловые скорости видеокамеры по горизонтали и вертикали. Отклонение линзового элемента приводит к тому, что проекция изображения на матрице полностью компенсирует колебания видеокамеры за время экспозиции. К оптической стабилизации также относится стабилизация изображения с подвижной матрицей. В этом варианте движение видеокамеры компенсирует не оптический элемент внутри объектива, а матричный приемник, закрепленный на подвижной платформе.

При электронном и цифровом методах стабилизации часть пикселей на матрице отводится на стабилизацию изображения и не участвует в формировании картинки. Это не особо критично для ЛЛС, так как их основная функция заключается не в изображении наблюдаемого пространства, а в правильном и надежном обнаружении целей. К тому же лазерное излучение подсвечивает только центральную область пространства, попадающего в поле зрения приемной системы.

Электронный метод стабилизации отличается от цифрового способом получения информации о величине и направлении сдвига видеокамеры. При электронном методе информация поступает от двух гиродатчиков, в то время как при цифровом методе величина и направление сдвига вычисляются процессором при обработке последовательности кадров. При дрожании видеокамеры изображение «плавает» по матрице, а процессор на основании полученной информации вносит коррекцию, используя резервные пиксели для компенсации дрожания.

Наиболее популярным методом стабилизации является цифровой метод, так как он не требует применения дополнительных аппарат-

ных компонентов в системе, которые увеличивают стоимость изделия, его массу и габариты.

Помимо стабилизации видеоизображений повысить помехоустойчивость ЛЛС позволяет сегментация бинарных изображений. Разработанный алгоритм сегментации выделяет в бинарном изображении объекты, форма которых близка к круглой. Для этого используется набор оконных фильтров разного размера. Оконный фильтр — это бинарная квадратная матрица, представляющая собой примитив с центральными элементами в виде круга и элементами на границах окна. Ниже приведено бинарное представление оконного фильтра размером 6×6 пикселей. Такой фильтр способен выделять на изображении объекты, площадь которых находится в диапазоне $4 \dots 16$ пикселей, что соответствует удаленным целям. При увеличении площади объектов следует выбирать оконный фильтр большего размера:

$$h_{o.\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

С точки зрения теории множеств [3] оконный фильтр состоит из двух объектов и его можно записать с помощью функции объединения:

$$h_{o.\phi} = h_{\text{тр}} \cup h_{\text{цтр}}, \quad (7)$$

где $h_{\text{тр}}$ — объект, элементы которого принадлежат границам фильтра; $h_{\text{цтр}}$ — объект, содержащий центральные элементы примитива.

Весь набор оконных фильтров скользит по бинарному изображению слева направо и сверху вниз параллельно. При этом в каждом положении проверяются пиксели изображения, соответствующие границам окна и некоторым контрольным элементам, лежащим внутри круга. Отклик фильтра будет сформирован только при выполнении следующих трех условий:

– отсутствие пикселей объекта на границах окна

$$\{w \mid w \in B_{\text{тр}}, B_{\text{тр}} \subseteq B(m, n)\} \cap h_{\text{тр}} = \emptyset; \quad (8)$$

– наличие всех контрольных пикселей объекта внутри окна

$$\{w \mid w \in B_k, B_k \subseteq B(m, n)\} \cap h_k \neq \emptyset; \quad (9)$$

– объект полностью покрывает круг примитива фильтра:

$$h_{\text{цтр}} \subseteq \{w \mid w \in B_{\text{цтр}}, B_{\text{цтр}} \subseteq B(m, n)\}, \quad (10)$$

где $B_{\text{гр}}$, B_k , $B_{\text{цтр}}$ — объекты бинарного изображения, образующиеся после наложения фильтра на изображение и соответствующие границам, контрольным и центральным элементам окна соответственно. Под контрольными элементами будем понимать часть центральных элементов, используемых в фильтрах большого размера для предварительной оценки попадания объектов в центр окна. Поскольку на большей части бинарного изображения объекты отсутствуют, благодаря контрольным элементам можно значительно сократить число вычислений, что существенно повысит скорость работы алгоритма. С увеличением размера фильтра увеличивается объем вычислений, связанный с проверкой покрытия объектом круга примитива, поэтому целесообразно сначала оценить контрольные точки. Если при наложении оконного фильтра на изображение выполняются первые два условия, то проверяется третье условие, иначе фильтр сдвигается вправо на один пиксел, и проверка начинается заново. По достижении фильтром правой границы бинарного изображения фильтр смещается на одну строчку вниз и занимает крайнее левое положение.

На рис. 1 представлены три оконных фильтра размером 6×6 ,

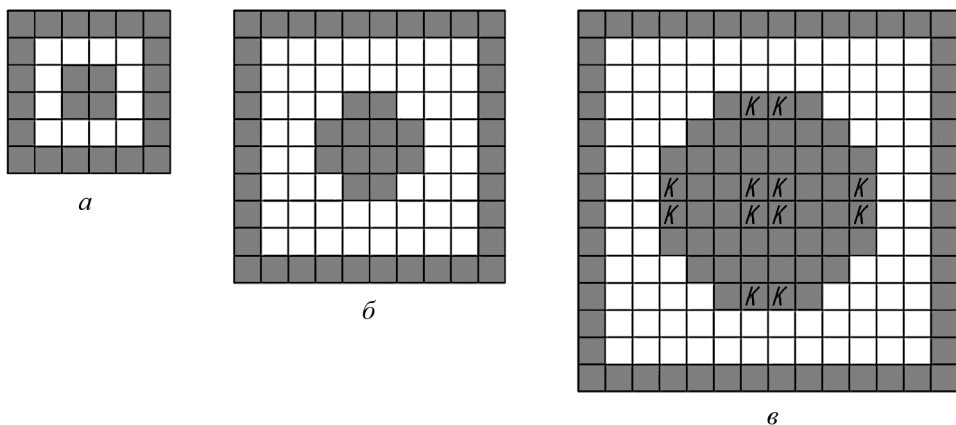


Рис. 1. Оконные фильтры, содержащие 6×6 (а), 10×10 (б) и 14×14 (в) элементов (затемненные области — элементы фильтра на границах окна и центральной части кругового примитива, К — контрольные элементы)

10×10, 14×14 элементов. Контрольные элементы целесообразно вводить при размере фильтра, превышающем 10×10 элементов. Начиная с фильтра размером 10×10 элементов, существует свободная зона по два пиксела с каждой стороны между элементами границ окна и центрального круга. Она предусмотрена для того, чтобы при помощи одного фильтра можно было выделять объекты, размеры которых отличаются на несколько пикселов. При этом уменьшается число используемых оконных фильтров. Второй причиной введения свободной зоны является тот факт, что бинарные изображения СВ будут иметь несколько отличающуюся от круга форму. Их реальная форма будет зависеть от положения изображения на матрице и порогового значения.

Поскольку приведенный алгоритм требует параллельной обработки бинарного изображения несколькими оконными фильтрами, он может быть реализован на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Использование ПЛИС также позволяет обрабатывать изображение с большим потоком данных в реальном времени.

Представленные в данной работе методы повышения помехоустойчивости ЛЛС при автоматическом обнаружении СВ на сложном фоне были апробированы с помощью изготовленного на кафедре РЛ-2 прибора «АнтиСВИС». Результаты испытаний показали высокую эффективность данного прибора при обнаружении СВ с малым показателем световозвращения (до 100 см²/ср) на дальностях до 20 м. Аппаратно алгоритм сегментации реализован на ПЛИС серии Cyclone-3 фирмы Altera.

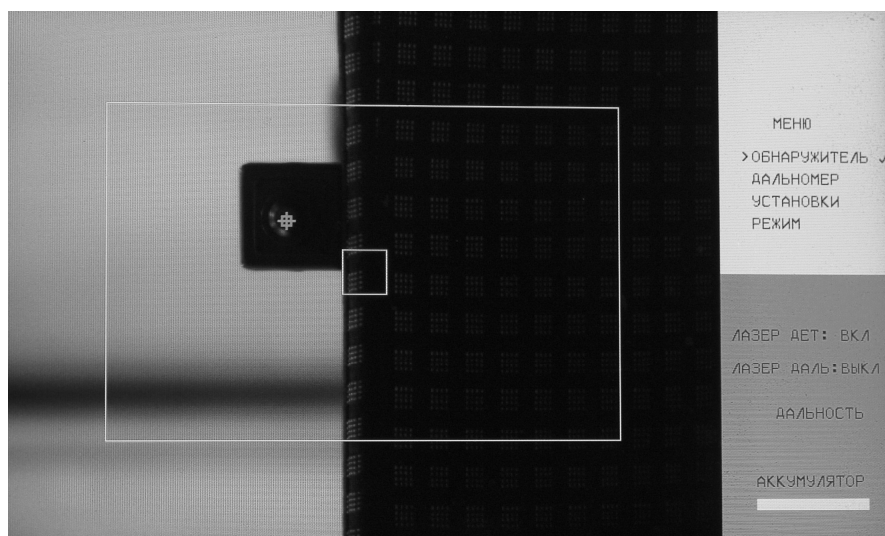


Рис. 2. Изображение экрана дисплея прибора «АнтиСВИС»

На рис. 2 приведено изображение, полученное с экрана дисплея прибора «АнтиСВИС». Графическая метка в виде перекрестия обозначает обнаруженную цель, в качестве которой выступает миниатюрная камера с объективом pinhole.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокшанский В. Б., Карасик В. Е., Таранов М. А. Автоматическое обнаружение световозвращателей с помощью лазерных локационных систем // Вестник МГТУ. – Сер. Приборостроение. – 2011. – № 2. – С. 25–35.
2. Single-Sensor Imaging: Methods and Applications for Digital Cameras / editor Rastislav Lukac. CRC Press, 2008. – С. 535–558.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012