

Исходя из этих причин, существует некоторый оптимальный размер блока. При большем размере блока увеличивается неиспользованное пространство  $10 \times 20$  разрядов, память ссылок  $10 \times 14$  разрядов, дисковый накопитель CDC-9462, объем данных одного пакета накопителя 80 Мбайт, скорость передачи данных 1,2 Мбайт/с, время полной смены информации в локальной базе данных 10 с.

Использование метода динамического распределения памяти дает возможность значительно (на порядок) уменьшить объем быстродействующей оперативной памяти при незначительном аппаратном усложнении. Объем базы данных и скорость передачи информации в ССВО определяются типом НМД и могут быть увеличены использованием соответствующих накопителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лубков А. А., Полубинский В. В., Храмов С. В. Работа с базой данных в ССВО высокой производительности // *Автометрия*.—1991.—№ 5.
2. Долговесов Б. С. Архитектура систем отображения трехмерных объектов в реальном времени широкого назначения // *Машинная графика 89: Программа и тез. докл. V Всесоюз. конф.*—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1989.
3. Гусев А. В., Ивашин С. Л., Талныкин Э. А. Математические модели сцен в синтезирующих системах визуализации реального времени // *Автометрия*.—1985.—№ 4.

*Поступила в редакцию 10 января 1992 г.*

УДК 621.396

**А. А. Бычков, В. А. Понькин**

*(Воронеж)*

#### **ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАТЕНЯЮЩИХ ФОН ОБЪЕКТОВ**

Предложена новая аппликативная модель формирования изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов. На основе этой модели рассмотрены задачи обнаружения детерминированных с неизвестными параметрами, а также случайных изображений пространственно-протяженных объектов, по результатам решения которых установлены границы применимости широко используемой на практике модели аддитивного взаимодействия изображений объекта и фона.

1. Обнаружение изображений пространственно-протяженных объектов (ППО) является одной из важнейших задач радио- и оптической локации, решению которой посвящены многочисленные работы [1—3 и др.]. В этих работах анализ процесса обнаружения ППО выполнен с применением аддитивной модели взаимодействия изображений объекта и фона, традиционно используемой для решения задач обнаружения сосредоточенных целей. Такая модель не учитывает эффект затенения фона, и выявленные на базе ее использования закономерности обнаружения изображений ППО, особенно в оптическом диапазоне длин волн, где пространственная протяженность объектов имеет существенное значение, не в полной мере соответствуют экспериментальным данным [4, 5].

Поэтому возникает необходимость дальнейшего совершенствования моделей формирования изображений в направлении учета проявляющихся на практике эффектов затенения фона и в изучении с их использованием закономерностей обнаружения ППО. При этом пригодные для практики результаты решения задач анализа изображений ППО в видимом, ИК- и миллиметровом диапазонах длин волн на реальных фонах неба и земной поверхности могут быть получены только при учете случайного характера изображений ППО и фона. В этой связи в статье на основе предложенной новой модели взаимодействия изображений объекта и фона рассмотрены задачи обнаружения детерминированных изображений, изображений с неизвестными параметрами, а также случайных изображений ППО, по результатам решения которых установлены границы применимости существующей модели аддитивного взаимодействия изображений ППО и фона.

2. В качестве изображения, подлежащего обработке, рассмотрим функцию  $Y(r)$  вектора  $r$ , полученного путем упорядоченного просмотра области анализа  $D$ . По гипотезам  $V_1$  и  $V_0$  предъявляются векторы  $S(r/V_i)$ ,  $i = 0, 1$ , размерностью  $N^2$ , соответствующие случаям наличия изображения обнаруживаемого ППО (гипотеза  $V_1$ ) и его отсутствия (гипотеза  $V_0$ ). Объект и фон могут состоять из  $L$  и  $K$  неперекрывающихся элементов (пятен), заданных функциями значений интенсивности  $S_i$ ,  $i = 1, L$ , и  $F_j$ ,  $j = 1, K$ . Форму объекта и расположенных на нем пятен описывают координатные функции  $H_i$ ,  $i = 1, L$ , а форму пятен фона —  $G_j$ ,  $j = 1, K$ , представляющие собой диагональные матрицы порядка  $N^2 \times N^2$ , содержащие нули и единицы, причем последние соответствуют отсчетам, приходящимся на область, занятую соответствующим элементом изображения. По определению, указанные функции удовлетворяют условиям:

$$H_i H_l = H_l H_i = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq l, \\ H_i & \text{при } i = l, \end{cases} \quad (1)$$

$$G_j G_n = G_n G_j = \begin{cases} 0 & \text{при } j \neq n, \\ G_j & \text{при } j = n, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^L H_i = H = I, \quad \sum_{j=1}^K G_j = I, \quad (3)$$

где  $I$  — единичная матрица размерностью  $N^2 \times N^2$ .

С учетом (1)–(3) входное изображение имеет вид:

$$Y \equiv Y(r) = \begin{cases} \sum_{i=1}^L H_i S_i + \sum_{j=1}^K G_j F_j + W, & r \in D: V_1, \\ \sum_{j=1}^K G_j F_j + W, & r \in D: V_0 \end{cases} \quad (4)$$

для аддитивной модели формирования изображения;

$$Y = \begin{cases} \sum_{i=1}^L H_i S_i + H_{L+1} \sum_{j=1}^K G_j F_j + W, & r \in D: V_1, \\ \sum_{j=1}^K G_j F_j + W, & r \in D: V_0 \end{cases} \quad (5)$$

для аппликативной\* модели, учитывающей затенение фона ППО. В выражениях (4) и (5)  $W$  — вектор аддитивного белого гауссовского шума. Особен-

\* Термин предложен В. Н. Поветко.

ности обнаружения изображения с учетом эффектов затенения фона можно продемонстрировать на простейшей модели детерминированных изображений.

3. С учетом предложенного описания входных изображений (4), (5) и ввиду статистической независимости отсчетов в области анализа логарифм отношения правдоподобия для аддитивной ( $l_1$ ) и аппликативной ( $l_2$ ) моделей определяется статистикой элементов выборки в области возможного расположения объекта:

$$l_1 = Y^T R^{-1} H_1 S_1 = \sum_{i \in H_1} \sigma_w^{-2} y_i s_i \underset{V_0}{\overset{V_1}{\gtrless}} l_{01}, \quad (6a)$$

$$l_2 = Y^T R^{-1} H_1 (S_1 - F_1) = \sum_{i \in H_1} \sigma_w^{-2} y_i (s_i - f_i) \underset{V_0}{\overset{V_1}{\gtrless}} l_{02}, \quad (6b)$$

где  $l_{01}, l_{02}$  — порог испытания для аддитивной и аппликативной моделей;  $\tau$  — знак транспонирования;  $R^{-1}$  — матрица, обратная ковариационной, диагонального вида с элементами  $\sigma_w^{-2}$  ( $\sigma_w^2$  — дисперсия отсчета аддитивного шума);  $y_i, s_i, f_i$  — отсчеты изображений наблюдаемой в зоне возможного расположения объекта реализации, ППО и фона соответственно.

Таким образом, задача обнаружения детерминированных изображений ППО сводится к известной задаче различения двух изображений [6]. Согласно (6a), (6b) оптимальный алгоритм обработки изображения при выборе аддитивной и аппликативной моделей реализуется корреляционным приемником и включает следующие операции: формирование «окна» по месту возможного нахождения объекта ( $H_1$ ), регистрация в «окне» фрагмента изображения, перемножение вектора значений выделенного изображения с опорным и сравнение полученной величины с порогом. Вышеописанные алгоритмы различаются лишь опорными изображениями, исходя из (6a), (6b).

В соответствии с результатами теории оптимального приема качество обнаружения детерминированных сигналов зависит от величины параметра, имеющего смысл отношения сигнал/шум [6], который для аппликативной модели (4) может быть приведен к виду

$$q_1^2 = [H_1(S_1 - F_1)]^T R^{-1} [H_1(S_1 - F_1)] = \sigma_w^{-2} (E_1 + E_0 - 2\rho\sqrt{E_1 E_0}), \quad (7)$$

где  $E_1 = |H_1 S_1|^2$ ,  $E_0 = |H_1 F_1|^2$  — энергии изображений объекта и затеняемого им участка фона соответственно;  $\rho = (E_1 E_0)^{-1/2} (H_1 S_1, H_1 F_1)$  — коэффициент корреляции между этими изображениями.

Для аддитивной модели выражение для параметра обнаружения совпадает с (7), если положить в нем  $E_0 = 0$ :  $q_1^2 = E_1 / \sigma_w^2$ .

Зависимости вероятности обнаружения  $P_0$  детерминированных изображений ППО на известном фоне от величины  $q_1$  для различных значений коэффициента корреляции  $\rho$  и параметра  $q_0 = \sqrt{E_0} / \sigma_w$  представлены на рис. 1. Параметр  $\rho$  определяет степень различия структур изображения ППО и затеняемого им участка фона: при  $\rho = 1$  (штрихпунктирные кривые) обеспечивается минимальная вероятность обнаружения объекта, а при  $\rho = -1$  (штриховая линия) — максимальная. Кривая обнаружения, соответствующая  $\rho = 1$ , немонотонна и имеет минимум в точке равенства энергий изображений

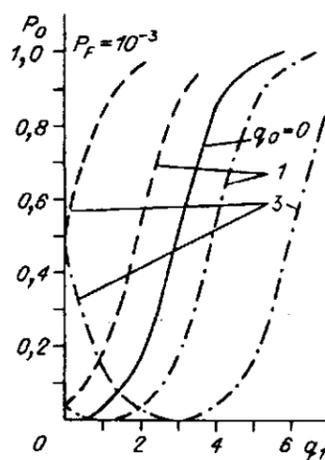


Рис. 1

объекта и фона ( $q_1 = q_0$ ). Наличие убывающего участка слева от этой точки объясняется эффектом обнаружения объекта по отрицательному контрасту. Отметим, что участки графиков возрастания вероятности обнаружения, построенных для значений  $\rho = 1$  ( $-1$ ), получаютс я сдвигом вдоль оси абсцисс вправо (влево) на величину  $q_0$  кривой обнаружения, соответствующей  $q_0 = 0$  и совпадающей с результатами расчета по аддитивной модели (сплошная кривая). Это обстоятельство будет использовано в дальнейшем для установления границы применимости аддитивной модели при анализе детерминированных изображений.

4. Для выявления особенностей обработки изображений ППО в условиях априорной неопределенности при использовании аддитивной и аппликативной моделей рассмотрим задачу обнаружения объекта с известным равномерным распределением интенсивности  $s$  на равномерном фоне неизвестной интенсивности. В соответствии с разработанной процедурой поиска алгоритмов обработки сигналов [6] достаточная статистика (ДС) для аддитивной модели может быть представлена в виде

$$h_1 = N_{H_1} \sigma_w^{-2} \left( \frac{1}{N_{H_1}} \sum_{i \in H_1} y_i - \frac{1}{N_H} \sum_{i \in H_2} y_i \right), \quad (8)$$

где  $H_1$  — область предполагаемого расположения объекта;  $H_2 = H - H_1$ ;  $N_H = N^2$ ,  $N_{H_1}$  — число элементов изображения в области анализа  $D$  и в области предполагаемого расположения объекта ( $H_1$ ).

Для аппликативной модели обобщенный критерий отношения правдоподобия [6] приводит к низкой достоверности, поэтому оценка качества обнаружения изображения ППО на фоне неизвестной интенсивности проведена с использованием модифицированной ДС вида

$$h_2 = \sum_{i \in H_1} y_i \left( s - \frac{1}{N_{H_2}} \sum_{i \in H_2} y_i \right), \quad (9)$$

где  $N_{H_2}$  — число элементов в области  $H_2$ .

Выражение (9) получено из (8) путем подстановки вместо известного значения фона  $f$  его оценки  $\hat{f}_2 = \frac{1}{N_{H_2}} \sum_{i \in H_2} y_i$ , соответствующей аппликативной модели формирования изображений.

Таким образом, алгоритм оптимальной обработки изображения для аддитивной модели состоит в нахождении разности между средними значениями входной реализации, определенной в зоне предполагаемого нахождения объекта, и во всей зоне анализа. Для аппликативной модели производится перемножение вектора изображения, приходящегося на область возможного расположения объекта, с величиной разности между известной интенсивностью ППО и средним значением реализации в дополнительной области ( $H_2$ ).

Характеристики обнаружения изображения ППО на фоне неизвестной интенсивности определены для алгоритма, соответствующего критерию Неймана — Пирсона. ДС для аддитивной модели (8) линейна относительно входной реализации и в силу этого распределена по нормальному закону. Выражение для вероятности обнаружения изображения ППО имеет вид

$$P_{01} = \Phi [q_1 \sqrt{(k-1)/k} - q_*], \quad (10)$$

где  $\Phi[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$  — интеграл Лапласа;  $q_*$  — порог обнаружения, определяемый требуемой величиной вероятности ложной тревоги  $P_F$ ;  $k = N_H/N_{H_1}$ .

ДС для аппликативной модели (9) нелинейна, и точное определение характеристик обнаружения ППО затруднительно. Воспользовавшись приближенным методом [7], основанным на аппроксимации плотности вероятности



воспользоваться методом статистического моделирования. Полученные этим методом при количестве выборок  $10^5$  и  $N_H = 20$  характеристики обнаружения с доверительным интервалом по вероятности 0,85 представлены на рис. 2 (точки). Их анализ позволяет сделать вывод о том, что аппроксимация ДС нормальным распределением дает завышенные на 20—30 % оценки вероятности обнаружения ППО. Для больших значений отношения площади зоны анализа к площади объекта ( $k \gg 1$ ) можно рекомендовать использование соотношений, полученных для вычисления характеристик обнаружения детерминированных объектов ППО на известном фоне. Возникающие при этом ошибки, например при  $k = 10$ , не превышают 20 % по уровню 0,5.

5. При рассмотрении задачи обнаружения случайных изображений ППО, когда изображения объекта и фона описываются векторами с гауссовскими независимыми компонентами, входной сигнал для аддитивной и аппликативной моделей формирования изображения соответственно можно представить в виде

$$Y_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^L H_i T_i + \sum_{j=1}^K G_j U_j + W, & r \in D: V_1, \\ \sum_{j=1}^K G_j U_j + W, & r \in D: V_0, \end{cases}$$

$$Y_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^L H_i T_i + H_{L+1} \sum_{j=1}^K G_j U_j + W, & r \in D: V_1, \\ \sum_{j=1}^K G_j U_j + W, & r \in D: V_0, \end{cases}$$

где  $T_i, U_j$  — вектор-столбцы некоррелированных гауссовских случайных процессов с нулевыми средними и дисперсиями, равными  $\sigma_{T_i}^2, \sigma_{U_j}^2$ .

Произведя необходимые вычисления, ДС для аддитивной ( $z_1$ ) и аппликативной ( $z_2$ ) моделей можно представить в виде

$$z_1 = \sigma_w^{-2} / 2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K \frac{\epsilon_i^2}{(1 + \epsilon_i^2 + \beta_j^2)(1 + \beta_j^2)} E_{ij}, \quad (13)$$

$$z_2 = \sigma_w^{-2} / 2 \sum_{i=1}^L \left( \frac{\epsilon_i^2}{1 + \epsilon_i^2} E_i - \sum_{j=1}^K \frac{\beta_j^2}{1 + \beta_j^2} E_{ij} \right). \quad (14)$$

Здесь  $E_i = Y^T H_i Y$  — энергия сегмента реализации изображения, приходящегося на область, занимаемую  $i$ -м пятном ППО;  $E_{ij} = Y^T H_i G_j Y$  — энергия сегмента реализации изображения, соответствующего области пересечения  $i$ -го пятна ППО с  $j$ -м пятном фона;  $\epsilon_i^2 = \sigma_{T_i}^2 / \sigma_w^2, \beta_j^2 = \sigma_{U_j}^2 / \sigma_w^2$ .

Таким образом, оптимальная обработка реализации сводится к весовому суммированию энергий сегментов реализации изображения, найденных как сумма квадратов значений изображения в каждом сегменте. Причем сегментация производится в соответствии с разбиением изображений объекта и фона на пятна одинаковой флуктуационной интенсивности, а веса определяются дисперсией флуктуаций. Способы разбиения изображения и формирования весов для аддитивной и аппликативной моделей различны.

Для оценки качества обработки случайных изображений ППО рассмотрим обнаружение равнояркого объекта на равномерном фоне ( $L = K = 1, G_1 = I, \epsilon_1^2 = \epsilon^2, \beta_1^2 = \beta^2$ ). Известно [8], что ДС вида (13) или (14) можно выразить через случайную величину, характеризующуюся  $\chi^2$ -распределением с  $N_{H1} - 1$  степенями свободы. Тогда выражения для вероятностей обнаружения случайных

изображений ППО для аддитивной и аппликативной моделей соответственно имеют вид:

$$P_{01} = F_{\chi^2} \left[ N_{H1} - 1, \frac{1 + \beta^2}{1 + \epsilon^2 + \beta^2} F_{\chi^2}^{-1} [N_{H1} - 1, P_F] \right], \quad (15)$$

$$P_{02} = F_{\chi^2} \left[ N_{H1} - 1, \frac{1 + \beta^2}{1 + \epsilon} F_{\chi^2}^{-1} [N_{H1} - 1, P_F] \right], \quad (16)$$

где  $F_{\chi^2} [n, y]$ ,  $F_{\chi^2}^{-1} [n, y]$  — прямая и обратная функции вероятности  $\chi^2$ -распределения с  $n$  степенями свободы;  $P_F$  — требуемая вероятность ложной тревоги.

Зависимости вероятности обнаружения случайного изображения ППО от величины  $\beta^2 = \sigma_i^2 / \sigma_w^2$  для различных значений  $\epsilon^2 = \sigma_u^2 / \sigma_w^2$  ( $\sigma_i^2, \sigma_u^2, \sigma_w^2$  — дисперсии флуктуаций значений изображений ППО, фона и аддитивного шума соответственно), полученные в соответствии с (15), (16), представлены на рис. 4. Как следует из приведенных графиков, аддитивная модель формирования изображений имеет также ограниченную область применения и при анализе случайных изображений ППО. Так, при  $\beta^2 < \beta_*^2$  (где  $\beta_*^2 \approx 2\epsilon^2$ ) аддитивная модель дает завышенные результаты (до 100 %) при определении вероятности обнаружения ППО, при  $\beta^2 > \beta_*^2$  — существенно заниженные (абсолютная ошибка достигает 1,0). Кроме того, аддитивная модель не учитывает эффекта обнаружения случайных изображений ППО с отрицательным флуктуационным контрастом ( $\beta^2 > \epsilon^2$ ) и наличие на кривой обнаружения точки минимума при  $\beta^2 = \epsilon^2$  (при идентичных изображениях ППО и фона).

6. Границы применимости аддитивной модели можно определить на основе количественного анализа ошибок расчета вероятности обнаружения изображений ППО. На рис. 5 представлена зависимость модуля такой ошибки  $\Delta P$  от величины параметра  $q_0 = \sqrt{E_0} / \sigma_w$ , где  $E_0$  — энергия изображения фона,  $\sigma_w^2$  — дисперсия аддитивного белого шума, при постоянном значении параметра  $q_1 = \sqrt{E_1} / \sigma_w$  ( $E_1$  — энергия изображения ППО) и заданной вероятности ложной тревоги  $P_F = 10^{-3}$  для случая обработки детерминированных изображений (кривая 1). Из анализа приведенной зависимости следует, что при обнаружении детерминированных изображений ошибка  $\Delta P$  убывает с уменьшением  $q_0$  монотонно, стремясь в пределе при  $q_0 \rightarrow 0$  к нулю. Можно показать, что при малых значениях параметра  $q_0$  максимальная величина ошибки  $\Delta P$  однозначно определяется величиной этого параметра и может быть оценена по формуле  $\Delta P \approx 2,5q_0$ .

Так, для величины ошибки 20 % аддитивная модель применима для анализа детерминированных изображений при  $E_0 < 0,2\sigma_w^2$ .

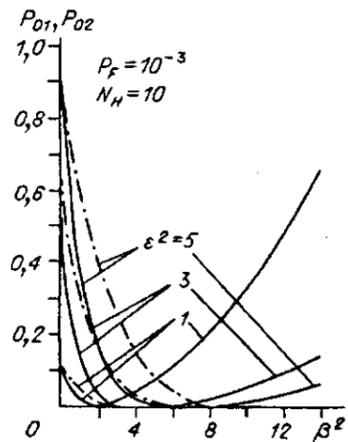


Рис. 4

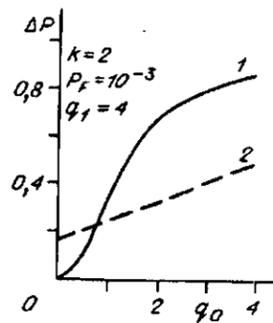


Рис. 5

Ввиду сложной зависимости ошибки  $\Delta P$  для изображений с неизвестными параметрами количественный анализ выполнен методом статистического моделирования. График максимальной ошибки  $\Delta P$  для значения отношения размеров зоны анализа к площади объекта  $k = 2$  и  $q_1 = 4$  приведен на рис. 5 (кривая 2). В отличие от рассмотренного выше случая кривая зависимости  $\Delta P$  дополнительно определяется величиной  $k$ . При увеличении  $k$  различие между кривыми 1 и 2 уменьшается. В пределе ( $k \rightarrow \infty$ ) эти кривые совпадают.

7. Таким образом, существующая модель аддитивного взаимодействия изображений объекта и фона может ограниченно использоваться при исследовании закономерностей обнаружения детерминированных изображений ППО.

В более общих случаях необходимо применение новой аппликативной модели формирования изображения, учитывающей эффект затенения объектом фона. При этом для расчета характеристик обнаружения изображения ППО на фоне неизвестной интенсивности в зависимости от соотношения размеров объекта и зоны анализа можно воспользоваться гауссовской аппроксимацией достаточной статистики, полученной на основе аппликативной модели, или методом статистического моделирования. В случаях, когда зона анализа во много раз превосходит по площади изображение объекта, удовлетворительные результаты могут быть получены на основе аппликативной модели детерминированных изображений.

Для оценки качества обнаружения случайных изображений ППО можно воспользоваться линейной зависимостью достаточной статистики, полученной при использовании аппликативной модели, со случайной величиной, имеющей  $\chi^2$ -распределение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы радиолокации протяженных объектов: Межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск: УПИ, 1983.
2. Битоцкий О. И., Киричук В. С., Перетягин Г. И. Выделение локальных отличий при обработке последовательности изображений // Автометрия. — 1988. — № 5.
3. Шелухин О. И. Радиосистемы ближнего действия. — М.: Радио и связь, 1989.
4. Леонов Ю. П. Теория статистических решений и психофизика. — М.: Наука, 1977.
5. Травникова Н. П. Эффективность визуального поиска. — М.: Машиностроение, 1985.
6. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Тихонова. — М.: Сов. радио, 1972. — Т. 1, 3.
7. Бхаттачария Р. Н., Р. Ранга Рао. Аппроксимация нормальным распределением и асимптотические разложения: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Сазонова. — М.: Наука, 1982.
8. Пикок Дж., Хастингс Н. Справочник по статистическим распределениям: Пер. с англ. — М.: Статистика, 1980.

Поступила в редакцию 28 января 1991 г.

УДК 621.396.96

Г. А. Осецкая

(Воронеж)

#### ОБНАРУЖЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ПЛОЩАДЬЮ ПРИ НАЛИЧИИ ФОНА С НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

Выполнены синтез и анализ алгоритма обнаружения по методу максимального правдоподобия. Полученные асимптотические выражения для вероятностей ошибок первого и второго рода могут быть использованы для повышения точности оценки площади пропадающего оптического изображения.