

В. М. ЕФИМОВ, А. М. ИСКОЛЬДСКИЙ, Э. В. ЯНШИН
 (Новосибирск)

ВЫДЕЛЕНИЕ ТОЧЕЧНОГО СИГНАЛА В ПРИСУТСТВИИ ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДИСКРЕТНОЙ СТРУКТУРЫ

При фоторегистрации изображений объектов, имеющих малые угловые размеры, в условиях, когда яркость изображения низка и необходимо принимать во внимание влияние шума*, целесообразно увеличивать чувствительность системы регистрации. Одним из методов увеличения чувствительности является использование в системе электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Известны удачные попытки применения ЭОП в подобных ситуациях [1]. Однако применение многокаскадных ЭОП с большим коэффициентом усиления в сочетании с обычными методами регистрации наталкивается на ряд трудностей, связанных в основном с ограниченностью динамического диапазона фотоматериала (элемента памяти). Ниже анализируются возможности традиционного метода однокадрового накопления и предлагаются способы, позволяющие расширить эти возможности.

Однокадровое накопление. Рассмотрим электронно-оптический регистратор, в котором фотоотсчеты (сцинтилляции, вызванные фотоэлектронами) представляют собой точки, яркости (амплитуды) которых являются случайными величинами из-за флуктуаций коэффициента усиления ЭОП. Будем считать, что фотоэлектроны сигнала падают в одну и ту же точку экрана, т. е. амплитуды фотоотсчетов суммируются, а вероятность совпадения координат шумовых фотоотсчетов равна нулю. В этих условиях выделение сигнала методом однокадрового накопления сводится к поиску на одиночном кадре фотоотсчета с максимальной амплитудой.

Вероятность выделения сигнала за время накопления t

$$P_0 = \int_0^{\infty} \varphi_c(x, t) \Phi_{\text{ш}}(x, t) dx, \quad (1)$$

где $\varphi_c(x, t)$ — плотность вероятности суммарной амплитуды фотоотсчетов сигнала; $\Phi_{\text{ш}}(x, t)$ — интегральное распределение наибольшей амплитуды шумовых отсчетов.

Если $q_c(n, t)$ и $q_{\text{ш}}(n, t)$ — вероятности появления n фотоэлектронов сигнала и шума за время накопления t , а $\varphi(x)$ — плотность вероят-

* Подобные задачи возникают, например, при регистрации слабых звезд, в лазерной локации Луны и т. п.

ности амплитуды единичного фотоотсчета, то

$$\varphi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_c(n, t) \varphi_n(x),$$

где $\varphi_n(x)$ — плотность вероятности суммарной амплитуды n единичных отсчетов;

$$\Phi_{ш}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} q_{ш}(n, t) [\Phi(x)]^n,$$

где $\Phi(x) = \int_0^x \varphi(y) dy$.

Так как в рассматриваемой модели амплитуды единичных фотоотсчетов сигнала суммируются, а наложения шумовых отсчетов не происходит, то вероятность выделения сигнала растет с увеличением среднего числа фотоэлектронов сигнала даже в том случае, когда среднее число фотоэлектронов шума $\bar{n}_{ш}(t)$ растет значительно быстрее, чем среднее число сигнальных фотоэлектронов $\bar{n}_c(t)$ за время накопления. Увеличение среднего коэффициента усиления \bar{K} приводит к повышению эффективности метода лишь в том случае, когда относительные флуктуации коэффициента усиления уменьшаются с ростом \bar{K} .

Иначе обстоит дело, если элемент памяти имеет два порога: нижний порог x_0 и верхний — αx_0 . Наличие нижнего порога x_0 приводит к тому, что отсчет не фиксируется, когда амплитуда шумового фотоотсчета или суммарная амплитуда сигнальных фотоотсчетов $x < x_0$. Верхний порог αx_0 выравнивает все амплитуды, его превышающие. В этом случае вероятность выделения сигнала

$$P'_0 = \int_{x_0}^{\alpha x_0} \varphi_c(x, t) \Phi_{ш}(x, t) dx + \Phi_{ш}(\alpha x_0, t) \int_{\alpha x_0}^{\infty} \varphi_c(x, t) dx. \quad (2)$$

Из сравнения (1) и (2) видно, что всегда $P'_0 < P_0$, т. е. наличие порогов у элемента памяти уменьшает эффективность метода однокадрового накопления.

Характер зависимости вероятности P'_0 от времени накопления и коэффициента усиления иной, нежели у вероятности P_0 , а именно:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P'_0 = 0; \quad \lim_{\bar{K} \rightarrow \infty} P'_0 = 0.$$

Это означает, что при фиксированных порогах существует оптимальный коэффициент усиления и оптимальное время накопления. Действительно,

$$P'_0 \leq \Phi_{ш}(\alpha x_0, t) \int_{x_0}^{\infty} \varphi_c(x, t) dx,$$

и при фиксированном времени накопления и малом коэффициенте усиления суммарная амплитуда сигнальных фотоотсчетов редко превышает нижний порог элемента памяти, а при слишком большом коэффициенте усиления, когда рост суммарной амплитуды сигнальных фотоотсчетов ограничен значением верхнего порога αx_0 , увеличивается вероятность превышения верхнего порога амплитудами шумовых фотоотсчетов. Аналогичные рассуждения справедливы для случая изменения времени накопления при фиксированном коэффициенте усиления.

Таким образом, очевидно, что для достижения положительного эффекта при использовании системы с большим коэффициентом усиления

необходимо применение памяти с расширенным динамическим диапазоном*.

Кроме того, при рассмотрении идеальной модели непрерывного накопления мы предполагали, что фотоотсчеты представляют собой математические точки случайной яркости, фотоэлектроны сигнала попадают в одну и ту же точку экрана и яркости отдельных фотоотсчетов сигнала суммируются. Более близка к действительности модель, в которой фотоотсчет является кружком случайного радиуса, определяемого качеством электронной оптики ЭОП, и случайной яркости, так что шумовые отсчеты могут перекрываться. В то же время координаты центров сигнальных отсчетов могут располагаться случайным образом внутри круга рассеяния, размер которого определяется как качеством электронной оптики, так и качеством фокусировки изображения на входе. Это приводит к уменьшению вероятности выделения сигнала, так как суммарная амплитуда сигнальных фотоотсчетов из-за рассеяния падает, а наибольшая амплитуда шумовых отсчетов растет за счет перекрытий.

Поэтому для исключения влияния порогов и уменьшения влияния перекрытий и рассеяния целесообразно использовать метод многокадрового накопления, т. е. регистрировать изображение на нескольких последовательных кадрах.

Многокадровое накопление. Отметим, что при отсутствии флюктуаций коэффициента усиления, т. е. в том случае, когда амплитуды всех единичных фотоотсчетов одинаковы, идеальная модель метода однокадрового накопления позволяет выделить сигнал с вероятностью

$$P_m > 1 - q_c(0, t) - q_c(1, t). \quad (3)$$

Так как $P_m \geq P_0$, то при регистрации целесообразно попытаться исключить влияние флюктуаций коэффициента усиления и перейти к способу, в котором используется информация о числе фотоэлектронов, формирующих сигнал.

Разобьем полное время накопления на интервалы длительностью t и будем регистрировать информацию, поступающую в течение каждого временного интервала на отдельном кадре. Длительность экспозиции одиночного кадра можно подобрать такой, чтобы вероятность регистрации на отдельном кадре двух или более фотоотсчетов сигнала была бы пренебрежимо малой. Тогда в системе с достаточно большим коэффициентом усиления будут регистрироваться практически все электроны сигнала и шума. Если элемент памяти и устройство считывания координат фотоотсчетов имеют бесконечное пространственное разрешение, то при отсутствии рассеяния сигнала на входе он будет выделен из шума при совпадении координат двух фотоотсчетов на различных кадрах, т. е. если за полное время накопления t появится два или более фотоэлектронов сигнала. Вероятность выделения сигнала будет определяться соотношением (3). Если в тех же условиях учесть влияние нижнего порога, то вероятность выделения сигнала

$$P'_m \geq 1 - \sum_{n=0}^{\infty} q_c(n, t) [\Phi(x_0)]^n - \sum_{n=1}^{\infty} q_c(n, t) \binom{n}{1} [\Phi(x_0)]^{n-1} [1 - \Phi(x_0)], \quad (4)$$

* Существующие высокочувствительные фотоматериалы с $a \sim 10 \div 100$ не позволяют полностью реализовать возможности ЭОП с большим ($10^5 \div 10^6$) коэффициентом усиления по свету.

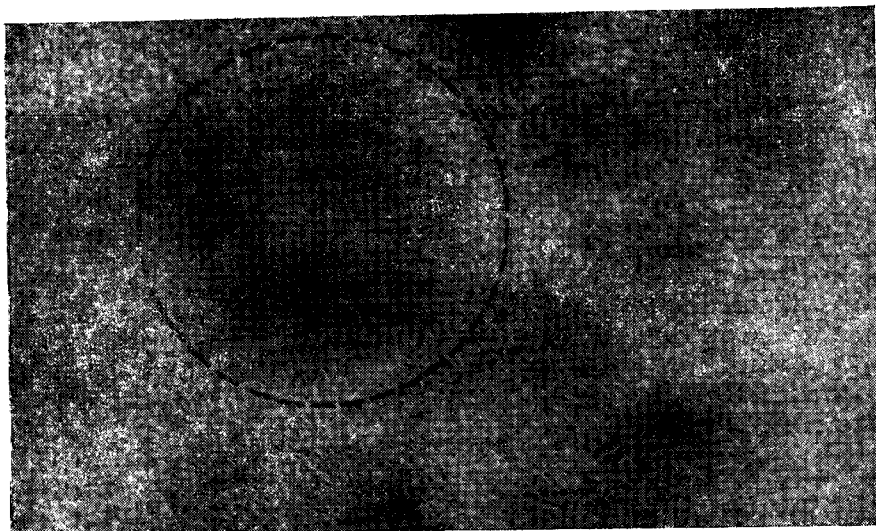


Рис. 1. Микрофотография группы фотоотсчетов сигнала, расположенных внутри круга рассеяния, на фоне шумовых отсчетов.

где дополнительные слагаемые по сравнению с (3) учитывают вероятность «гибели» фотоотсчетов из-за наличия нижнего порога элемента памяти.

В реальной системе полное совпадение координат фотоотсчетов практически исключено в связи с рассеиванием центров фотоотсчетов сигнала, конечными размерами фотоотсчетов и ошибками устройства определения координат. Так же, как и при однокадровом накоплении, это приводит к уменьшению вероятности выделения сигнала.

Рассеяние сигнала. Из предыдущих рассуждений следует, что наличие рассеяния координат центров фотоотсчетов ухудшает возможности метода многокадрового накопления. С другой стороны, рассеяние уменьшает вероятность наложения фотоотсчетов сигнала на отдельном кадре, а следовательно, и потерю фотоотсчетов сигнала при не бесконечно малой длительности одиночного кадра τ_{\min} . В тех же случаях, когда время существования сигнала меньше минимально возможного времени экспонирования τ_{\min}^* , а число фотоэлектронов сигнала таково, что метод однокадрового накопления не обеспечивает эффективного обнаружения сигнала, искусственное рассеяние сигнала (например, дефокусировка на входе) является одним из методов, позволяющих повысить вероятность выделения**.

Рассеяние приводит к тому, что изображения фотоэлектронов сигнала образуют компактную группу фотоотсчетов, которую необходимо выделить из совокупности фотоотсчетов шума (рис. 1). Метод рассеяния позволяет выделить сигнал даже в тех случаях, когда среднее число фотоэлектронов в одиночной «сцинтилляции» многоэлектронной компоненты шума больше, чем число сигнальных фотоэлектронов, т. е. когда выделение сигнала пороговым методом невозможно [2].

* τ_{\min} ограничено скоростью протяжки фотопленки и временем высвечивания выходного люминофора ЭОП.

** Метод искусственного рассеяния эффективен только тогда, когда суммарная площадь, занимаемая фотоотсчетами шума на одиночном кадре, существенно меньше общей площади кадра.

Если оставаться в рамках идеальной модели регистратора, т. е. считать, что фотоотсчет является математической точкой, то дефокусировка может быть сделана сколь угодно малой и рассматриваемый метод по своим возможностям совпадает с методом многокадрового накопления при отсутствии рассеяния. В действительности, как отмечалось выше, фотоотсчет имеет конечные геометрические размеры. Это приводит к необходимости выбирать параметры дефокусировки такими, чтобы избежать ситуации, когда изображения фотоэлектронов сигнала перекрываются и число «различимых» фотоотсчетов сигнала мало. С другой стороны, при чрезмерной дефокусировке группа фотоотсчетов сигнала становится менее компактной и вероятность потери ее среди фотоотсчетов шума увеличивается.

Для выделения сигнала можно (после определения координат центров фотоотсчетов) разбить изображение поисковой сеткой на ячейки, вмещающие круг рассеяния, и найти ячейку с наибольшим числом отсчетов*.

Положение сигнала может быть определено более точно, если после нахождения ячейки поисковой сетки, содержащей сигнал, определить координаты центра круга рассеяния. Это можно сделать, анализируя взаимное расположение фотоотсчетов в найденной ячейке поисковой сетки и ее окрестностях. Вероятность выделения сигнала зависит от положения центра круга рассеяния относительно центра ячейки поисковой сетки. Наихудшим случаем будет тот, когда центр круга рассеяния совпадает с узлом поисковой сетки, а наилучшим — когда центр круга совпадает с центром ячейки поисковой сетки. В последнем случае вероятность выделения сигнала

$$P_p = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{k=1}^n q_c^*(n-k, t) q_{ш}^*(k, t) \right) \left(\sum_{k=0}^{n-1} q_{ш}^*(k, t) \right)^{N-1}, \quad (5)$$

где $\sum_{k=1}^n q_c^*(n-k, t) q_{ш}^*(k, t)$ — вероятность регистрации n фотоотсчетов** в содержащей сигнал ячейке поисковой сетки; $q_{ш}^*(k, t)$ — вероятность регистрации за полное время накопления k фотоотсчетов шума в отдельной ячейке поисковой сетки (пространственное распределение фотоотсчетов шума полагается равномерным); N — число ячеек поисковой сетки на кадре. Более подробное рассмотрение метода рассеяния приведено в [2], где исследован наиболее эффективный алгоритм выделения сигнала, использующий информацию о координатах фотоотсчетов всего изображения.

Оценка точности определения координат сигнала. При оценке точности определения координат сигнала необходимо учитывать две ситуации.

Сигнал выделен правильно с вероятностью P . В этом случае точность определения координат сигнала зависит от размеров фотоотсчета, шума пленки и считывающего устройства, эффективности алгоритма обработки координат фотоотсчетов.

Найден «ложный» сигнал с вероятностью $(1 - P)$. Здесь точность определяется уже размерами экрана, если о местоположении сигнала в пределах экрана априори ничего не известно.

* Очевидно, что существует оптимальный размер ячейки поисковой сетки, определяемый статистикой числа фотоотсчетов сигнала и шума, характеристиками рассеяния и размерами фотоотсчетов.

** Напомним, что фотоотсчет регистрируется в том случае, когда его амплитуда превышает нижний порог.

Поэтому при оценке точности, естественно, использовать характеристику, учитывающую обе компоненты, например дисперсию

$$\sigma^2 = P \sigma_0^2 + (1 - P) \sigma_m^2.$$

Так как величина σ_m^2 порядка площади экрана $S_э$, то в первую очередь необходимо, чтобы при заданном времени накопления аппаратура обеспечивала высокую вероятность выделения сигнала.

Если пренебречь точностью считывающего устройства, то величина σ_0^2 в методе однокадрового накопления порядка площади фотоотсчета $S_ф$. Того же порядка она и в методе многокадрового накопления. На первый взгляд, метод рассеяния (дефокусировки) значительно уступает первым двум. Однако если дефокусировка оптимальна и площадь круга рассеяния $S_p \sim \overline{n_c^*}(t) S_ф$, где $\overline{n_c^*}(t)$ — среднее число регистрируемых фотоотсчетов сигнала, то σ_0^2 при рассеянии также порядка $S_ф$. Вторая составляющая σ_m^2 одинакова для всех рассмотренных методов. Естественно потребовать, чтобы потеря точности, обусловленная вероятностью зарегистрировать шумовой отсчет в качестве сигнального, была бы близка к потере точности, связанной с конечным размером фотоотсчета, т. е. чтобы обе составляющие дисперсии были примерно одинаковыми:

$$\sigma_0^2 P \cong \sigma_m^2 (1 - P).$$

Отсюда вытекает требование к вероятности выделения сигнала

$$P \cong 1 - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_m^2} \cong 1 - \frac{S_ф}{S_э}.$$

Ориентировочные расчеты. Примем распределение коэффициента усиления экспоненциальным, т. е.

$$\varphi(x) = \frac{1}{K} \exp - \frac{x}{K}.$$

Такое распределение подтверждается данными ряда экспериментов. Положим распределения фотоэлектронов сигнала и шума (за время накопления) пуассоновскими с параметрами:

$$\overline{n_c}(t) = \lambda \text{ и } \overline{n_{ш}}(t) = \mu,$$

т. е. $q_c(n, t) = \frac{\lambda^n}{n!} \exp - \lambda; \quad q_{ш}(n, t) = \frac{\mu^n}{n!} \exp - \mu.$

Тогда

$$\Phi_{ш}(x, t) = \exp \left(- \mu \exp \left(- \frac{x}{K} \right) \right);$$

$$\varphi_c(x, t) = \exp \left(- \frac{x}{K} - \lambda \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{n! (n-1)! (K)^n}.$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по формуле (2) зависимости вероятности выделения сигнала при однокадровом накоплении с учетом влияния порогов. Расчеты проведены для $\lambda=5$, $\mu = \exp \lambda \approx 150$ при двух значениях ширины динамического диапазона: $\alpha=10$; $\alpha=100$. Максимальные значения вероятности P_0 для обоих случаев близки и равны примерно 0,42. Из рисунка видно, что существует оптимальная зона изме-

нения коэффициента усиления и выход из этой зоны приводит к резкому падению вероятности выделения. Диапазон оптимальных значений коэффициента усиления для $\alpha=10$ оказывается очень узким. Расчеты, проведенные для других значений λ и μ , показывают, что метод однокадрового накопления не обеспечивает высокой вероятности выделения сигнала при любых значениях α , если $\mu \approx \exp \lambda$. Слабая зависимость максимальной

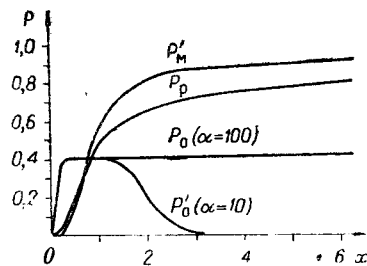


Рис. 2. Зависимость вероятности выделения сигнала от амплитуды фотоотсчета. За единицу принята амплитуда, соответствующая нижнему порогу фотопленки $x_0=1$. Падение вероятности выделения для P'_0 и $\alpha=100$ происходит при $x \geq 10$.

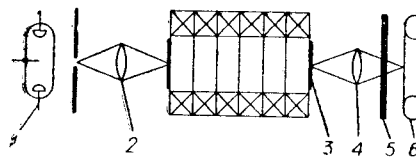


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — импульсная лампа-вспышка; 2 — фотокатод ЭОП; 3 — экран ЭОП; 4 — объект «Аврора»; 5 — ослабляющий фильтр; 6 — фотопленка.

вероятности выделения сигнала при $\mu = \exp \lambda$ от динамического диапазона объясняется тем, что при экспоненциальном распределении коэффициента усиления его относительные флуктуации не уменьшаются с ростом среднего значения \bar{K} и среднее значение наибольшей амплитуды шумового отсчета примерно равно $\bar{K} \ln \mu$, в то время как среднее значение амплитуды сигнала — $\bar{K} \lambda$.

Так как вероятность регистрации n сигнальных фотоотсчетов с учетом «гибели» фотоотсчетов из-за влияния нижнего порога равна

$$q_c^*(n, t) = \frac{[\lambda (1 - \Phi(x_0))]^n}{n!} \exp[-\lambda (1 - \Phi(x_0))],$$

то вероятность выделения сигнала методом многокадрового накопления в соответствии с (4)

$$P'_m = 1 - \exp[-\lambda (1 - \Phi(x_0))] - \lambda [1 - \Phi(x_0)] \exp[-\lambda (1 - \Phi(x_0))],$$

где $\Phi(x_0) = 1 - \exp - \frac{x_0}{\bar{K}}$. На рис. 2 приведена зависимость P'_m от \bar{K} ,

вычисленная по этой формуле. С ростом \bar{K} вероятность P'_m монотонно возрастает до значения $P'_m = 1 - \exp(-\lambda) - \lambda \exp(-\lambda) \approx 0,95$. Падение P'_m при малых \bar{K} обусловлено «гибелью» фотоотсчетов из-за наличия нижнего порога. Вероятность обнаружения сигнала методом рассеяния P_p ведет себя аналогично P'_m и при больших коэффициентах усиления примерно вдвое превышает максимальное значение P'_0 . Она вычислялась при тех же исходных данных ($\lambda=5$; $\mu \approx 150$) в предположении, что число ячеек поисковой сетки

$$N = \frac{S_s}{S_\Phi} \frac{1}{\lambda (1 - \Phi(x_0))},$$

а вероятность регистрации n шумовых отсчетов в одиночной ячейке за время накопления

$$q_m^*(n, t) = \left(\frac{\mu (1 - \Phi(x_0))}{N} \right)^n \frac{1}{n!} \exp - \frac{\mu (1 - \Phi(x_0))}{N}.$$

Отношение площади экрана S_s к площади фотоотсчета S_ϕ было принято равным 10^4 , что соответствует рабочей области экрана порядка 1 см^2 при средней площади фотоотсчета около 10^{-4} см^2 .

Эксперимент. Практическая реализация методов многокадрового накопления и искусственного рассеяния при использовании фотоматериала в качестве элемента памяти возможна, если коэффициент усиления ЭОП достаточен для эффективной регистрации сцинтилляций от одиночных фотоэлектронов с входного фотокатода, т. е. когда средняя амплитуда фотоотсчета $\bar{K} \geq x_0$. На рис. 3 представлена схема эксперимента по определению плотности вероятности амплитуды одиночного фотоотсчета $\varphi(x)$.

Сцинтилляции с выходного экрана (3) многокаскадного ЭОП типа УМ-95 с помощью светосильного объектива (4 — «Аврора»; $D/f=1/2$) в масштабе $M=1:1$ проектировались на фотопленку (6 — РФ-3). Напряжение питания, режим проявления фотопленки и длительность экспозиции кадра τ были выбраны такими, чтобы число отсчетов собственного шума прибора, регистрируемых на кадре, было пренебрежимо малым. Сразу после начала экспонирования кадра входной фотокатод (2) ЭОП освещался импульсной вспышкой света длительностью $\Delta t \ll \tau$. Время экспонирования кадра существенно превышало постоянную времени свечения выходного люминофора ЭОП. На фотопленке регистрировались фотоотсчеты, амплитуды которых превышали значение нижнего порога.

Среднее число зарегистрированных фотоотсчетов

$$\bar{n}^*(x) = \lambda (1 - \Phi(x)),$$

где λ — среднее число фотоэлектронов, возникающих в пределах области фотокатода, соответствующей размеру кадра. Если варьировать x , устанавливая в промежутке между выходным экраном и фотопленкой фильтры с различным коэффициентом пропускания η , так что $x = x_0/\eta$, то мы получим зависимость

$$\Phi(x) = 1 - \frac{\bar{n}^*(x)}{\lambda}.$$

Эту зависимость можно идентифицировать с интегральным законом распределения амплитуды единичного фотоотсчета, если доля фотоотсчетов с амплитудами ниже пороговой $\Phi(x_0) \ll 1$. На рис. 4 приведены полученные экспериментально функции $\Phi(x)$ и $\varphi(x) = \Phi'(x)$. В условиях проведенного эксперимента $\Phi(x_0) \cong 0$ и поэтому $\bar{n}^*(x_0) \cong \lambda$. Среднее значение амплитуды единичного фотоотсчета, вычисленное по данным рис. 4, равно $x \cong 6,3 x_0^*$.

Распределение $\varphi(x)$, найденное в эксперименте, не является экспоненциальным, использованным в ориентировочных расчетах, т. е. фактически ситуация оказывается несколько более благоприятной.

Таким образом, если шум порождается внешним источником, то для более точного расчета вероятности выделения сигнала можно воспользоваться приведенными выше формулами, взяв в качестве $\varphi(x)$ распределение, найденное экспериментально.

На рис. 5 приведена зависимость числа регистрируемых над порогом отсчетов, вызванных собственными шумами прибора. Здесь уже

* Заметим, что $\varphi(x)$ отражает статистические свойства коэффициента усиления, среднее значение которого, вообще говоря, изменяется в пределах анализируемой площади рабочего поля ЭОП. В [3] дано более подробное обсуждение методики и результатов.

нельзя пренебречь долей отсчетов с амплитудой ниже пороговой, так как в отличие от предыдущего скорость роста числа регистрируемых отсчетов с уменьшением порога продолжает увеличиваться. Это связано с многокомпонентным составом шума и с большим числом усилительных камер, каждая из которых является источником собственных шумов. Начиная с некоторых значений x при уменьшении нижнего порога число регистрируемых отсчетов собственного шума растет значительно быстрее, чем среднее число регистрируемых фотоотсчетов, рожденных электронами с

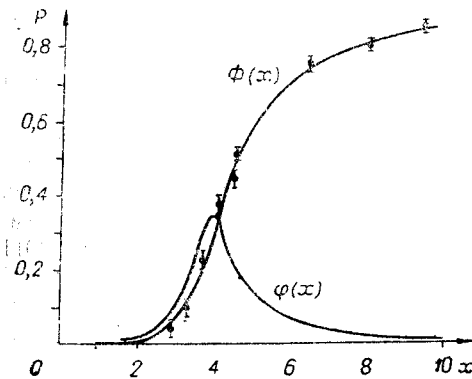


Рис. 4. Интегральный закон $\Phi(x)$ и плотность вероятности амплитуды $\varphi(x)$ одиночного фотоотсчета. Напряжение на входной камере ЭОП $U_0=7,5$ кВ.

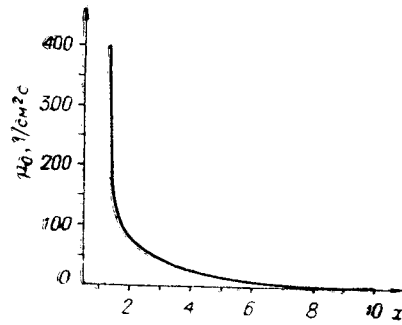


Рис. 5. Зависимость числа регистрируемых отсчетов собственного шума прибора от положения нижнего порога системы $x = \frac{x_0}{i}$.

входного фотокатода. Это приводит к необходимости рационального выбора рабочего значения нижнего порога, которое в соответствии с данными эксперимента должно находиться в пределах $x_n = (2 \div 4) x_0$. Если $x_n \leq 2 x_0$, то резко увеличивается число шумовых отсчетов; если же $x_n \geq 4 x_0$, что соответствует наиболее вероятной амплитуде сигнального фотоотсчета, то резко падает эффективность регистрации сигнала. Если выбрать $x_n \approx 3 x_0$, то вероятность регистрации одиночного фотоэлектрона сигнала еще достаточно велика $P=1-\Phi(3 x_0) \geq 0,95$, а интенсивность регистрируемых над порогом отсчетов собственного шума снижается до $\mu_0=40$ 1/см²·с (при напряжении на входной камере ЭОП $U_0=5$ кВ).

Оценим порядок величины верхней границы интенсивности светового потока, при которой можно использовать метод многокадрового накопления. Примем минимальное время экспонирования одиночного кадра $\tau_{\min} = 1/25$ с и площадь фотоотсчета $S_{\phi} = 10^{-4}$ см² (в приведенных выше экспериментах средний диаметр регистрируемого фотоотсчета $d \approx 90$ мк). На основании ориентировочных расчетов и экспериментальных данных можно считать, что метод многокадрового накопления эффективен, если суммарная площадь, занимаемая отсчетами шума на 1 см² кадра, меньше 0,1 см², т. е. если интенсивность электронного потока с входного фотокатода $N \lesssim \frac{0,1}{S_{\phi}} \tau_{\min}$ эл/см²·с. При чувствительности входного фотокатода $\kappa=30$ мА/Вт это неравенство выполняется, когда интенсивность светового потока на входе $I_0 \lesssim 10^{-13}$ Вт/см².

В заключение приведем рис. 6, иллюстрирующий выделение сигнала методом искусственного рассеяния [2]: а) сигнал (с) сфокусирован и выделить его при наличии многоэлектронной компоненты шума (ш) не-

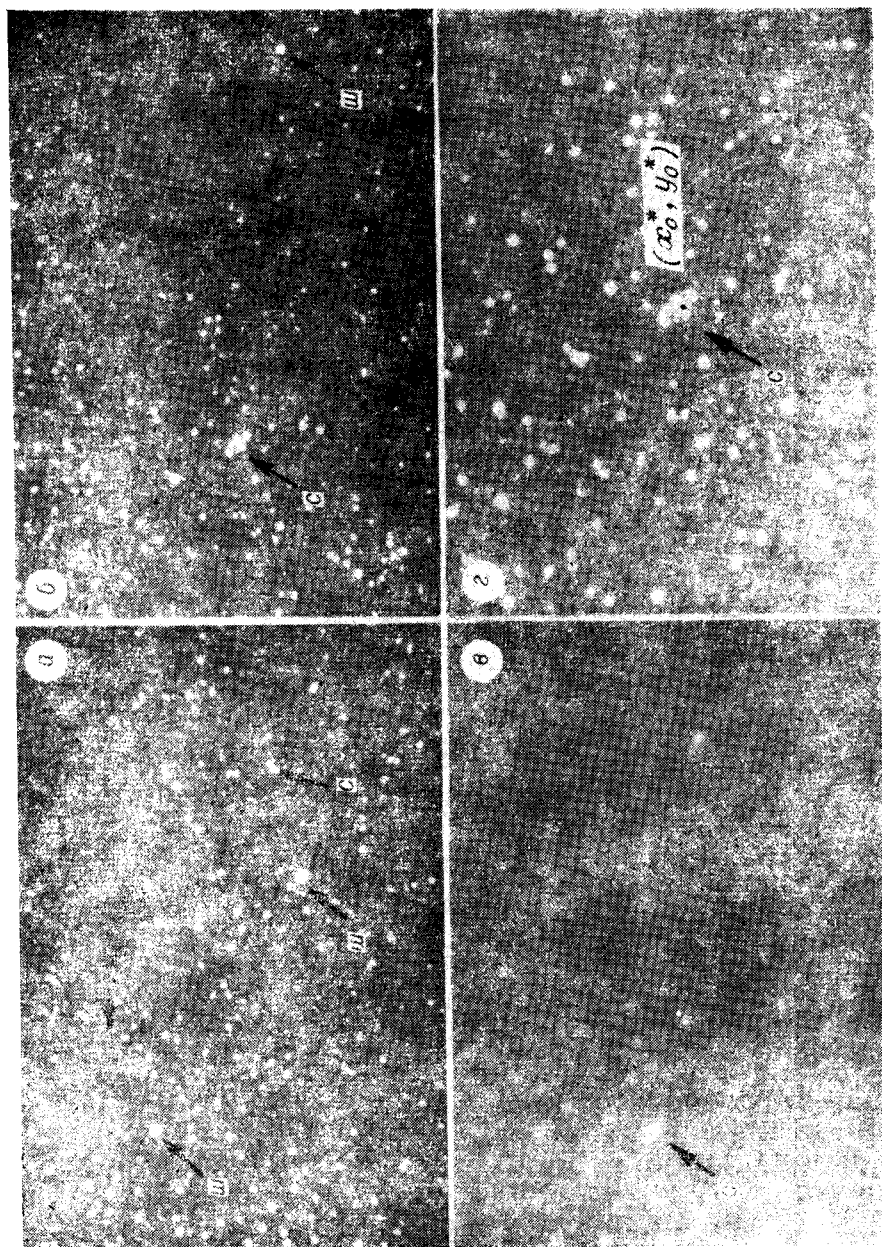


Рис. 6. Выделение сигнала методом искусственного рассеяния.

возможно; б) произведена дефокусировка сигнала на входе (площадь круга рассеяния $S_p \cong 10 S_\phi$; в) произведена дефокусировка при печати с негатива так, что интервалы между наиболее плотно расположенными отсчетами оказались заэкспонированными, сигнал выделен; г) найдены координаты центра круга рассеяния фотоотсчетов сигнала. В этом эксперименте: $n_c^* = 6$; $n_{ин}^* = 400$; средняя амплитуда фотоотсчетов сигнала $x_c \cong 3 x_0$.

Авторы благодарны Ю. Е. Нестерихину за постановку задачи и постоянный интерес к работе, Ю. А. Григорьеву за помощь в проведении экспериментов и обсуждение их результата. Д. Г. Фризсену, выполнившему на ЭВМ необходимые расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. E. Beckman, D. W. Egan. A search for Molecular Hydrogen in the Interstellar Medium.— *Advances in Electronics and Electron Physics*, v. 28 B, p. 801. London Academic Press, 1969.
2. В. М. Ефимов, Л. М. Диамант, А. М. Искольдский, Ю. Е. Нестерихин, Э. В. Яншин. Метод выделения пороговых изображений малых угловых размеров.— Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭЦВМ». Новосибирск, 1970.
3. Ю. А. Григорьев, А. М. Искольдский, М. И. Кудряшов, Э. В. Яншин. Флуктуации яркости одноэлектронных сцинтилляций многокаскадных ЭОП.— Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Автоматизация научных исследований на основе применения ЭЦВМ». Новосибирск, 1970.

*Поступила в редакцию
2 февраля 1971 г.*