

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53.08+535.853

В. М. ЕФИМОВ, А. М. ИСКОЛЬДСКИЙ, З. А. ЛИВШИЦ
 (Новосибирск)

**О НАДЕЖНОСТИ СЧИТЫВАНИЯ ДВОИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ
 В ОПТИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ**

Одним из основных вопросов, возникающих при разработке фотоэлектрического узла считывания двоичной информации в оптических запоминающих устройствах (ЗУ), является расчет минимальной энергии, требующейся для записи одного бита с заданной надежностью. Надежность существенно зависит также от контраста изображения на входе узла считывания, статистических свойств блока усиления, величины порога и ряда других характеристик радиотехнического тракта.

Эти вопросы изучались, например, в [1], где были получены оценки минимально необходимого числа электронов на бит для некоторых практических способов реализации считывания информации электронным пучком.

Мы будем рассматривать несколько иные модели, в которых существенным образом используется понятие контраста изображения*; одной из наших целей также является сравнение эффективности различных по статистическим характеристикам методов усиления сигнала.

Рассматривается следующая схема (рис. 1). На вход считывающего узла проецируется двухградационное изображение со средним контрастом k . На входе устройства установлен фотокатод с внешней фотоэффектом, так что среднее число фотоэлектронов с элемента площадки фотокатода, соответствующее двоичной «1», $\lambda = \epsilon_{\phi} n_1$ (ϵ_{ϕ} — квантовая чувствительность фотокатода; n_1 — число фотонов), а $\mu = \epsilon_{\phi} n_0$ — число электронов, соответствующее «0». Величину $k = \frac{\lambda - \mu}{\lambda + \mu}$ здесь будем называть контрастом.

Система регистрации имеет усилительный каскад с флюктуирующим коэффициентом усиления, что приводит к флюктуациям сигнала от одиночного фотоэлектрона на выходе устройства. Кроме того, имеется интегратор и пороговые элементы: если выходной сигнал превышает порог, то фиксируется «1», в противном случае — «0».

Если заданы статистические характеристики потока электронов и усилительного каскада, то задача сводится к оптимальному (в некотором смысле) выбору значения порога x_0 и вычислению вероятности безошибочного срабатывания.

Пусть p — вероятность записи «0», $F(x)$ — функция распределения амплитуды выходного сигнала, соответствующего «0», $G(x)$ — «1». Тогда вероятность правильного срабатывания при заданном пороге x_0 есть

$$P_{\text{пр}} = 1 - p(1 - F(x_0)) - (1 - p)G(x_0). \quad (1)$$

Будем использовать два критерия оптимальности:

а) $\max_{x_0} P_{\text{пр}}(p)$ и б) $\max_p \min_{x_0} P_{\text{пр}}(p)$.

В первом случае уравнение для определения оптимального значения порога при дифференцируемых функциях $F(x)$ и $G(x)$ имеет вид $pF^1(x_0) - (1 - p)G^1(x_0) = 0$, (2а)

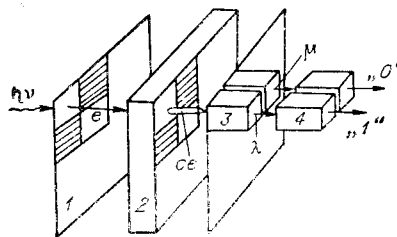


Рис. 1. Блок-схема приемника:
 1 — фотокатод; 2 — усилитель тока; 3 — интегратор; 4 — пороговый элемент.

* Этот подход целесообразен при анализе голограммных методов записи двоичной информации, где контраст изображения невысок и определяется в первую очередь качеством голограммы.

во втором

$$1 - F(x_0) = G(x_0). \quad (26)$$

Будем считать, что числа электронов, соответствующие «1» и «0», распределены по Пуассону с параметрами λ и μ , а амплитуда одноэлектронного сигнала есть случайная величина ξ с функцией распределения $H(x)$, средним a_1 и вторым начальным моментом a_2 . В дальнейшем будем считать (и это соответствует реальности) λ и μ достаточно большими, чтобы можно было пользоваться гауссовским приближением. Тогда из (2а) получаем следующее выражение для оптимального значения порога

$$x_0 = \sqrt{\frac{\lambda\mu}{\lambda - \mu} \left(2a_2 \ln \frac{\rho}{1 - \rho} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} + a_1^2 (\lambda - \mu) \right)}. \quad (3a)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \max_{x_0} P_{\text{пр}}(\rho) &= \frac{1}{2} + \rho \Phi \left[\sqrt{\frac{k+1}{1+k(1-2\rho)}} \times \right. \\ &\times \left. \left(\sqrt{\frac{1+k(1-2\rho)}{\eta k}} \ln \frac{\rho}{1-\rho} \sqrt{\frac{1+k}{1-k} + \frac{a_1^2}{a_2}} - \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \frac{a_1}{\sqrt{a_2}} \right) \right] + \\ &+ (1-\rho) \Phi \left[\sqrt{\frac{k+1}{1+k(1-2\rho)}} \left(\frac{a_1}{\sqrt{a_2}} - \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \sqrt{\frac{1+k(1-2\rho)}{\eta k}} \ln \frac{\rho}{1-\rho} \sqrt{\frac{1+k}{1-k} + \frac{a_1^2}{a_2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4a)$$

Здесь $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$; $\eta = \rho\mu + (1-\rho)\lambda$ — среднее число электронов на

бит; $k = \frac{\lambda - \mu}{\lambda + \mu}$ — контраст.

Использование минимаксного критерия приводит к следующему выражению для оптимального значения порога:

$$x_0 = a_1 \sqrt{\lambda\mu}. \quad (36)$$

При этом

$$\max_{x_0} \min_{\rho} P_{\text{пр}}(\rho) = \frac{1}{2} + \Phi \left[\frac{a_1}{\sqrt{a_2}} \sqrt{\eta} (\sqrt{1+k} - \sqrt{1-k}) \right]. \quad (46)$$

В формуле (46) $\eta = (\lambda + \mu)/2$.

Соотношения (4а), (46) позволяют сравнить случаи, когда усилитель является идеальным ($H(x) = \delta(x-c)$; $a_1 = c$; $a_2 = c^2$); когда коэффициент усиления имеет пуассоновское распределение с параметром c (при этом $a_1 = c$, $a_2 = c^2 + c$), а также, когда распределение коэффициента усиления является экспоненциальным с параметром

$$\frac{1}{c} \quad (a_1 = c, a_2 = 2c^2).$$

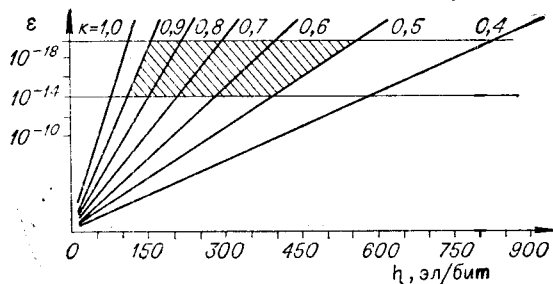


Рис. 2. Зависимость неверной записи от среднего числа электронов на бит («идеальный» и «пуассоновский» усилители).

Кривые зависимости вероятности ошибочной записи $\varepsilon = 1 - P_{\text{пр}}$ от среднего числа электронов на бит при различных значениях контраста для «идеального» и «пуассоновского» усилителей, вычисленные по формуле (46), представлены соответственно на рис. 2, 3 (вычисления по формуле (4а) в практически интересном случае $\rho = 1/2$ приводят к очень близким результатам). Кроме того, вероятности, соответствующие «идеальному» усилителю и пуассоновскому распределению коэффициента усиления при больших средних значениях коэффициента, как следует из (46), почти одинаковы.

Рассмотренные модели удовлетворительно описывают широкий класс реальных устройств считывания: фотоприемник типа бипланарного ЭОП с электронно-чувствительной матрицей и микроканальным усилителем изображения, для которого характерно экспоненциальное распределение коэффициента усиления; матрицы ФЭУ (ξ также распределено по экспоненте [2]), усилители яркости на базе многокаскадных ЭОП с усилительным элементом типа люминофор — фотокатод (случай почти нормального распределения ξ [3]) и т. д.

Из изложенного выше следует, что усилительные каскады с распределением ξ , близким к нормальному со средним, равным дисперсии, при $c \gg 1$ практически не ухудшают качества устройства считывания в сравнении с «идеальным» усилением, в то время как применение усилителей с экспоненциальным распределением коэффициента усиления при реальных требованиях к надежности и реальных контрастах требует существенно больших интенсивностей электронных потоков. Зависимость надежности от величины контраста входного изображения весьма значительна. Полученные данные позволяют оценить минимальную энергию, требующуюся для обеспечения заданной надежности записи. Например, если необходимо иметь $\epsilon = 10^{-14}$ при $k = 0,5$, квантовой эффективности фотокатода $\epsilon_{\phi} = 0,1$, то требуется энергия около $2 \cdot 10^{-15}$ Дж/бит.

В расчете предполагалось, что распределение коэффициента усиления экспоненциально, а изображение с голограммы восстанавливается с помощью аргонового лазера.

Как уже отмечалось, влияние контраста на минимально допустимое число электронов на бит существенно. В качестве курьезного примера можно привести случай экспоненциального распределения суммарной амплитуды выходного сигнала, для которого надежность полностью определяется контрастом. Используя минимаксный критерий оптимальности, получаем, что если

$$k = \frac{\ln \epsilon - \ln(1 - \epsilon)}{\ln \epsilon + \ln(1 + \epsilon)}, \quad (5)$$

то вероятность правильной работы $P_{\text{пр}} = 1 - \epsilon$ достигается при любой (сколь угодно малой) энергии на бит. Любое уменьшение k , по сравнению с (5), приводит к тому, что ни при какой (сколь угодно большой) энергии заданная величина $P_{\text{пр}} = 1 - \epsilon$ не может быть достигнута.

Авторы благодарят Д. Г. Фризену за проведение необходимых расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Федоров, В. В. Цветков. Вопросы записи и считывания двоичной информации в электронно-лучевых постоянных запоминающих устройствах. М., 1971.
2. Р. Д. Баглай, А. М. Искольдский, М. И. Кудряшов, Ю. Е. Нестерихин. Электронно-оптический регистратор «Спектр» как элемент системы автоматизации спектральных исследований.— Автометрия, 1971, № 6.
3. В. М. Ефимов, А. М. Искольдский, Э. В. Яншин. Выделение точечного сигнала в присутствии шума на изображениях дискретной структуры.— Автометрия, 1971, № 6.

Поступило в редакцию 13 сентября 1972 г.

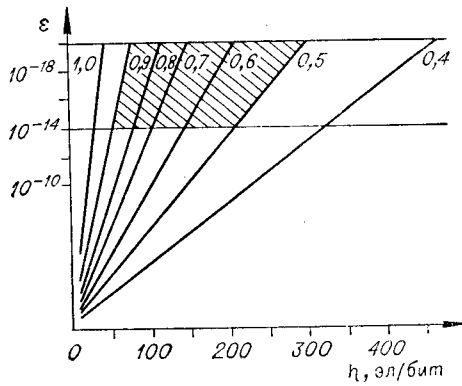


Рис. 3. Зависимость $\epsilon(\eta, k)$ для экспоненциально распределенного коэффициента усиления.