

УДК 621.397: 621.384.3

Ю.Р. Кирпиченко

Динамический диапазон и число воспроизводимых градаций яркости высокочувствительных датчиков изображения

Получены аналитические выражения для оценки динамического диапазона и числа воспроизводимых градаций яркости высокочувствительных датчиков изображения с учетом зависимости шума выходного сигнала от интенсивности излучения.

Ключевые слова: прибор с зарядовой связью, электронно-оптический преобразователь, динамический диапазон, градации яркости.

Возможность обнаружить объект наблюдения на некотором фоне либо различить детали разной яркости ТВ-датчиком зависит от такой характеристики датчика, как количество воспроизводимых градаций яркости.

Увеличение числа воспроизводимых ТВ-датчиком градаций яркости увеличивает количество получаемой об объекте наблюдения информации.

При заданном контрасте входного изображения на выходе ТВ-датчика можно различить вполне определенное количество градаций яркости, которое зависит как от величины порогового контраста датчика, так и от его динамического диапазона.

Динамический диапазон будем определять отношением освещенности, при которой наступает насыщение, к освещенности, при которой отношение сигнал/шум на выходе ТВ-датчика равно пороговому.

Подход к оценке числа воспроизводимых градаций яркости зависит от назначения телевизионной системы. В телевизионной системе, где информация об объекте наблюдения воспринимается и анализируется посредством зрительного восприятия, число градаций яркости определяется особенностью такого восприятия, описываемого законом Вебера–Фехнера.

Для автоматических ТВ-систем аналогом различимого приращения яркости является приращение сигнала ΔN_c , которое может быть обнаружено с требуемой вероятностью. Связь ΔN_c с пороговым отношением сигнал/шум $\Psi_{\text{пор}}$ устанавливается формулой [1]:

$$\Delta N_c = \sigma_{\text{ш}} \Psi_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ш}}$ – среднеквадратическое отклонение шума ТВ-датчика.

Выражение (1) часто является исходным для расчета числа градаций яркости. При этом число градаций яркости определяется как отношение заряда насыщения к среднему квадратическому отклонению «шумового» заряда. Однако такой подход к определению числа различимых градаций яркости не учитывает тот факт, что в современных высокочувствительных ТВ-датчиках изображения шум выходного сигнала определяется квантовой природой регистрируемого оптического излучения и зависит от его интенсивности.

Выходной сигнал ТВ-датчика определим как разность между средним количеством фотонов N_o , попадающих на участок изображения объекта за время экспозиции, и средним количеством фотонов $N_{\text{ф}}$, попадающих на такой же участок изображения однородного фона.

Тогда отношение сигнал/шум Ψ разностного сигнала $\Delta N_{\text{сф}}$, выраженного в фотонах, попадающих за время накопления на элемент изображения ПЗС, с учетом квантового выхода $\eta_{\text{ПЗС}}$ можно записать в виде

$$\Psi = \frac{\Delta N_{\text{сф}} \sqrt{\eta_{\text{ПЗС}}}}{\sqrt{2N_{\text{ф}} + \Delta N_{\text{сф}} + N_{\text{т}}/\eta_{\text{ПЗС}}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{т}}$ – среднее значение числа «темновых» электронов ПЗС; $N_{\text{ф}}$ – среднее значение числа фотонов, обусловленных фоновой засветкой; $\eta_{\text{ПЗС}}$ – квантовый выход ПЗС.

Решая уравнение (2) относительно различимого приращения входного сигнала, получим зависимость этого приращения от величины «фоновой» сигнала $N_{\text{ф}}$

$$\Delta N_{сф1} = \frac{\Psi_{пор}^2 + \Psi_{пор} \sqrt{\Psi_{пор}^2 + 8\eta_{пзс} N_{\phi} + 4N_{т}}}{2\eta_{пзс}}, \quad (3)$$

где $\Psi_{пор}$ – пороговое отношение сигнал/шум.

Для вычисления числа различных градаций яркости $N_{гр}$ запишем выражение (3) в виде

$$\Delta N_{сф}^n = \frac{\Psi_{пор}^2 + \Psi_{пор} \sqrt{\Psi_{пор}^2 + 8\eta_{пзс} N_{\phi}^n + 4N_{т}}}{2\eta_{пзс}},$$

где $N_{\phi}^n = N_{\phi} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta N_{с}^{i-1}$; $\Delta N_{с}^{i-1}$ – приращение яркости, предшествующее определяемому; n – номер определяемого приращения.

Величина n будет равна числу воспроизводимых ПЗС градаций яркости $N_{гр}$ при выполнении условия

$$N_{\phi}^n \geq \eta_{пзс} N_{нас},$$

где $N_{нас}$ – максимально возможное число накопленных на элементе матрицы ПЗС фотоэлектронов.

Для обеспечения видения при низких уровнях освещенности (< 0,001 лк) и практически в полной темноте часто используется ПЗС-датчик изображения, сочлененный с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП).

Среднее значение числа зарядов, накопленных на элементе ПЗС такого прибора за время кадра, и их дисперсия согласно [2] равны соответственно

$$N_{з} = \eta_{эоп} \eta_{пзс} K_{ос} G_{эоп} N_{\phi}, \quad (4)$$

$$D[N_{пзс}] = \eta_{эоп} \eta_{пзс} K_{ос}^2 F_{ш}^2 G_{эоп}^2 N_{\phi}, \quad (5)$$

где $\eta_{эоп}$ – квантовый выход фотокатода ЭОП; $K_{ос}$ – коэффициент потерь в согласующей оптике; $F_{ш}$ – коэффициент шума микроканальных пластин; $G_{эоп}$ – коэффициент усиления ЭОП.

С учетом формул (4) и (5) выражение для различного приращения яркости будет иметь вид

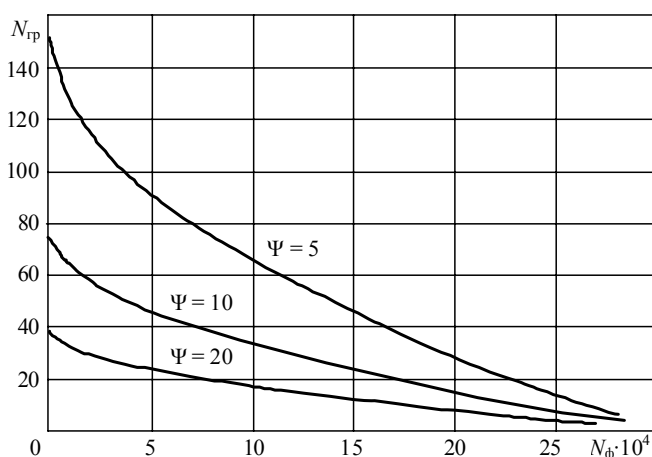
$$\Delta N_{фс2} = \frac{a F_{ш}^2 \Psi_{пор}^2 + F_{ш} \Psi_{пор} \sqrt{a^2 F_{ш}^2 \Psi_{пор}^2 + 8a^2 b \eta_{эоп} N_{\phi} + 4N_{т}} / F_{ш}^2}{2ab}, \quad (6)$$

где $a = K_{ос} G_{эоп}$; $b = \eta_{пзс} \eta_{эоп}$.

Используя соотношение (6), можно определить число воспроизводимых градаций яркости ТВ-датчика (ПЗС) с усилителем яркости (ЭОП) по той же методике, что и для ПЗС.

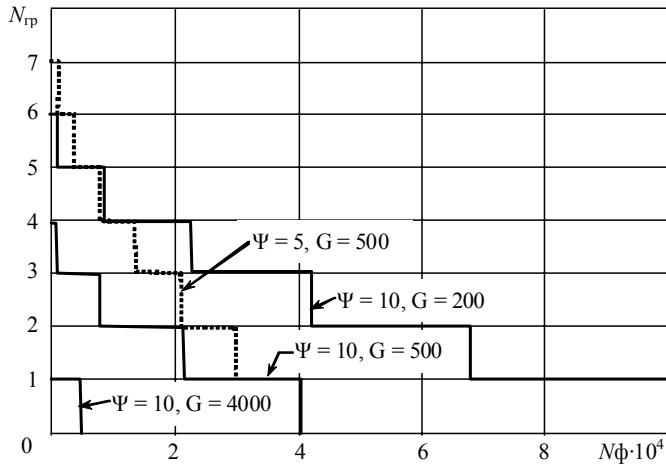
На рис. 1 и 2 представлены расчетные зависимости числа воспроизводимых градаций яркости ПЗС и ПЗС, сочлененного с ЭОП. Расчет числа воспроизводимых градаций яркости ПЗС, сочлененного с ЭОП, проводился при следующих значениях параметров: $\eta_{пзс} = 0,5$; $\eta_{эоп} = 0$; $K_{ос} = 0$; $N_{нас} = 300000$ электронов; $N_{т} = 400$ электронов; $F_{ш} = 3$.

Рис. 1. Зависимость числа воспроизводимых ПЗС-датчиком градаций яркости от уровня фоновой засветки



Анализ результатов расчета и приведенных на рис. 1 и 2 зависимостей показывает, что число воспроизводимых градаций автоматической ТВ-системой на ПЗС уменьшается с ростом величины фоновой засветки и порогового отношения сигнал/шум. При $\Psi_{пор} = 20$, даже при уровне фоновой засветки равном нулю, число воспроизводимых градаций $N_{гр} < 40$.

При использовании усилителей яркости для повышения чувствительности ТВ-датчика, наряду с достижением поставленной цели, сопутствующим фактором является снижение качества изображения, выражающееся в уменьшении числа воспроизводимых градаций. Как видно из приведенных на рис. 2 кривых, особенно существенно число воспроизводимых градаций уменьшается с ростом



коэффициента усиления ЭОП. Даже при коэффициенте усиления $G_{\text{эоп}} = 4000$, значительно меньшем достигаемого в современных ЭОП, число воспроизводимых градаций равно единице в небольшом диапазоне изменения уровня фоновой засветки.

Рис. 2. Зависимость числа воспроизводимых градаций ТВ-датчиком с усилителем яркости

Уменьшение числа градаций с ростом $G_{\text{эоп}}$ означает, что чувствительность ТВ-датчика с усилителем яркости соответствует случаю регистрации отдельных квантов, а величина заряда на элементе ПЗС при попадании на фотокатод ЭОП одного кванта достигает величины, равной заряду насыщения.

Для определения динамического диапазона ПЗС рассчитаем число фотонов $N_{\text{фmax}}$, при котором заряд на элементе матрицы ПЗС равен максимальному значению, и число фотонов $N_{\text{фmin}}$, при котором отношение сигнал/шум на выходе ПЗС равно пороговому.

Число фотонов $N_{\text{фmax}}$, соответствующее заряду насыщения элемента ПЗС с учетом квантового выхода $\eta_{\text{пзс}}$, будет равно

$$N_{\text{фmax}} = N_{\text{нас}} / \eta_{\text{пзс}}.$$

Число фотонов $N_{\text{фmin}}$, соответствующее пороговому отношению сигнал/шум, определим из выражения (3) при $N_{\text{ф}} = 0$

$$N_{\text{фmin}} = \frac{\Psi_{\text{пор}}^2 + \Psi_{\text{пор}} \sqrt{\Psi_{\text{пор}}^2 + 4N_{\text{T}}}}{2\eta_{\text{пзс}}}.$$

Тогда динамический диапазон матрицы ПЗС $D_{\text{пзс}}$ будет

$$D_{\text{пзс}} = \frac{N_{\text{фmax}}}{N_{\text{фmin}}} = \frac{2N_{\text{нас}}}{\Psi_{\text{пор}}^2 + \Psi_{\text{пор}} \sqrt{\Psi_{\text{пор}}^2 + 4N_{\text{T}}}}. \quad (7)$$

Определим динамический диапазон ТВ-датчика с усилителем яркости.

С учетом того, что $N_{\text{фmax}}$ и $N_{\text{фmin}}$ для такого датчика будут равны соответственно

$$N_{\text{фmax}} = \frac{N_{\text{нас}}}{\eta_{\text{эоп}} \eta_{\text{пзс}} K_{\text{ос}} G_{\text{эоп}}}, \quad N_{\text{фmin}} = \frac{aF_{\text{ш}}^2 \Psi^2 + F_{\text{ш}} \Psi \sqrt{aF_{\text{ш}}^2 \Psi^2 + 4N_{\text{T}} / F_{\text{ш}}^2}}{2ab},$$

запишем выражение для динамического диапазона $D_{\text{пзс+эоп}}$ в виде

$$D_{\text{пзс+эоп}} = \frac{2N_{\text{нас}}}{k \left(\Psi_{\text{пор}}^2 + \Psi_{\text{пор}} \sqrt{\Psi_{\text{пор}}^2 + 4 \frac{N_{\text{T}}}{bk^2}} \right)}. \quad (8)$$

Из формулы (7) видно, что динамический диапазон матрицы ПЗС не зависит от величины квантового выхода и определяется только величиной заряда насыщения и числом «темновых» электронов.

Как видно из рис. 4, динамический диапазон датчика изображения, представляющего собой ПЗС, сочлененный с ЭОП, расширяется при увеличении квантового выхода ПЗС, потерь в согласующей оптике и уменьшении фактора шума микроканальной пластины. Динамический диапазон такого прибора значительно уже динамического диапазона ПЗС.

Рис. 3. Динамический диапазон ПЗС

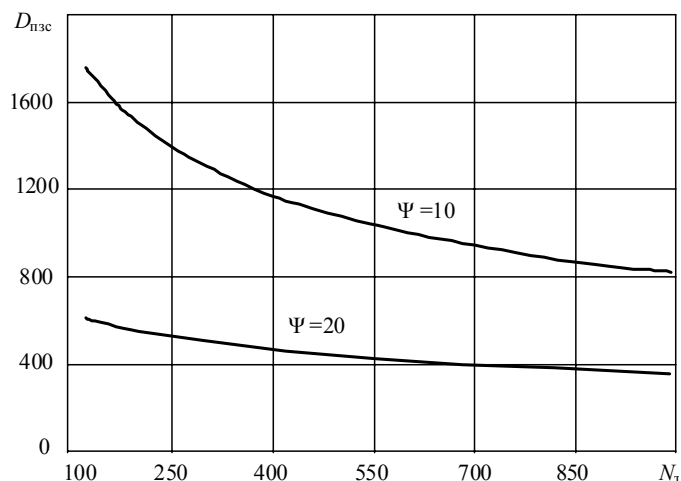
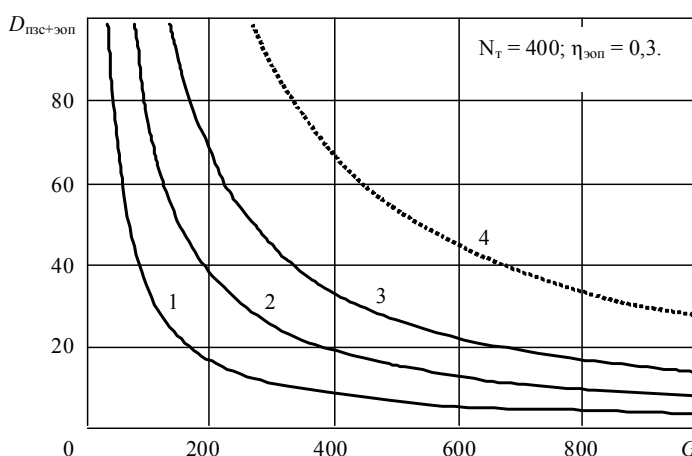


Рис. 4. Динамический диапазон ПЗС, сочлененного с ЭОП:

- 1 – $\eta_{\text{ПЗС}}=0,1; F_{\text{ш}}=3; K_{\text{ос}}=0,1;$
 2 – $\eta_{\text{ПЗС}}=0,5; F_{\text{ш}}=2; K_{\text{ос}}=0,1;$
 3 – $\eta_{\text{ПЗС}}=0,5; F_{\text{ш}}=1,5; K_{\text{ос}}=0,1;$
 4 – $\eta_{\text{ПЗС}}=0,5; F_{\text{ш}}=1,5; K_{\text{ос}}=0,05$



Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/225 по проекту 769.

Литература

1. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники: учеб. для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2006. – 399 с.
2. Дегтярев П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2005. – 233 с.

Кирпиченко Юрий Романович

Канд. техн. наук, доцент каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: (382-2) 42-33-87

Эл. почта: urkirp@gmail.com

Kirpichenko Yu.R.

The dynamic range and the number of brightness gradations of highly sensitive image sensors

An analytical formula for evaluation of dynamic range and the number of brightness gradations of highly sensitive image sensors were found considering the dependence of the output signal noise from the radiation intensity.

Keywords: charge-coupled device, dynamic range, image intensifier, gradations brightness.