

СМЕЛКОВ Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МНОГОКАНАЛЬНОГО СПОСОБА РАСШИРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для охранной телекамеры условия наблюдения могут быть охарактеризованы как условия с параметрической и непараметрической априорной неопределенностью сюжетов.

Поэтому высокое качество телевизионного изображения, наблюдаемого в одном кадре для объектов с резким отличием по контрасту, рассматривается как решение задачи по преодолению априорной неопределенности сюжетов по параметру "освещенность". Как неоднократно отмечалось [1, 2, 3], для этой ситуации решающим параметром (показателем) назначения применяемой телекамеры является ее динамический диапазон.

В общем случае динамический диапазон D определяется соотношением:

$$D = (E_{\max} - E_{\min}) / \Delta E, \quad (1)$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальная и минимальная освещенности объекта соответственно, ΔE – минимальное дифференциальное значение освещенности объекта, подлежащее анализу.

Эта формула является обобщенной, так как учитывает частные случаи.

Пусть, например, $\Delta E = E_{\min}$.

$$\text{Тогда } D = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\min} = E_{\max} / E_{\min} - 1 \gg E_{\max} / E_{\min}.$$

При оценке последнего соотношения для динамического диапазона в децибелах имеем:

$$D = 20 \lg(E_{\max} / E_{\min}). \quad (2)$$

Если положить величину $\Delta E = 1$ лк, причем это значение $\Delta E > E_{\min}$, тогда значение динамического диапазона $D = E_{\max} - E_{\min}$, т.е. численно равно величине диапазона освещенностей в относительных единицах.

Основными параметрами, определяющими динамический диапазон телевизионной системы, являются:

- отношение сигнал/шум преобразователя "свет-сигнал";
- линейность характеристики преобразования "свет-сигнал";
- максимальный заряд пиксела (элемента) преобразования "свет-сигнал".

В общем случае для фотоприемника на матрице ПЗС последовательность преобразования включает следующие этапы:

- установку предварительного смещения на детекторные элементы (очистку от накопленного паразитного заряда);
- выдержку в течение заданного интервала времени детекторных элементов в режиме накопления фотозарядов;
- перезапись информационных зарядов из накопительных элементов в буферную запоминающую секцию;
- построчный и поэлементный сдвиг массива информационных зарядов из элементов памяти в выходной считывающий элемент.

Величина максимального заряда обычно ограничивается емкостью накопительного (детекторного) элемента $C_{\text{Д.нак}}$ и напряжением в режиме накопления на нем относительно порогового напряжения [4]:

$$Q_{\text{вых. макс}} \leq Q_{\text{Д. макс}} = C_{\text{Д. нак}} (U_{\text{нак. макс}} - U_{\text{пор}}). \quad (3)$$

Элементы секции памяти и выходного регистра во время переноса зарядов на считывающий элемент должны обеспечить неискаженную передачу этого заряда на выход, что обеспечивается выбором разности напряжений высокого U и низкого

выход, что обеспечивается выбором разности напряжений высокого $U_{в. yj}$ и низкого $U_{н. yj}$ уровней фазовых сигналов для данной секции или регистра:

$$U_{в. yj} - U_{н. yj} \geq Q_{\text{вых. макс}} / C_{эj}, \quad (4)$$

где $C_{эj}$ – эффективное значение емкости элементов соответствующей секции или регистре; j – номер секции или регистра.

Режим смещения выходного считывающего элемента (т.е. его максимальный выходной перепад напряжения $\Delta U_{\text{вых. макс}}$) также должен быть задан исходя из неискаженной передачи максимального заряда от детекторных элементов:

$$\Delta U_{\text{вых. макс}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{о. макс}} \geq Q_{\text{д. макс}} / C_{сч}, \quad (5)$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение, устанавливаемое на емкости считывающего элемента; $U_{\text{о. макс}}$ – максимальное остаточное напряжение на емкости; $C_{сч}$ – эффективное значение емкости считывающего элемента с учетом действия всех шунтирующих емкостей.

Таким образом, значения управляющих напряжений выбираются исходя из обеспечения неискаженной передачи максимального заряда детекторного элемента на выход и считывания его.

При увеличении заряда в потенциальной яме в ней происходит уменьшение потенциала. Если количество заряда и дальше будет возрастать, то через некоторое время начнется перетекание его в соседние ячейки. В этом случае на изображении происходит расплывание ярких деталей. Это явление называется оптической пересветкой (blooming).

Для уменьшения размытия создаются ячейки специальных конструкций. В общем виде для n-канала проводимости (носители заряда – электроны) это выглядит так. Вдоль каждого столбца фотоячеек проводится узкая стоковая область, которая находится под большим положительным потенциалом и отделена от ямы некоторым барьером. Теперь избыточный заряд будет переходить в сток, и искажений изображения не возникнет.

Заряды от мощного ослепляющего источника переполняют емкость накопителя ячейки, избыточный заряд сливается в антиблуминг, что приводит к ограничению сигнального заряда, оставшегося в накопителе ячейки. Поэтому выходной электрический сигнал фоточувствительной матрицы ПЗС видоизменяется – существенно снижаются сигналы от ослепляющих источников. Но физически они ограничены некоторым максимальным значением U_{max} , которое определяется емкостью накопителя при заданных глубине потенциальной ямы и потенциале электрода антиблуминга. Указанное значение U_{max} и определяет номинальный уровень “белого” в видеосигнале.

Если принять, что освещенность светлых поверхностей объектов, находящихся под прямым солнечным светом (E_{max}), составляет 100 000 лк, а освещенность в тени (E_{min}) не более 1 лк, то для одновременного телевизионного наблюдения этого сюжета необходим динамический диапазон телекамеры в пять порядков. Получение телевизионных изображений сюжетов с подобным динамическим диапазоном потребует отношения сигнал/шум (ψ) преобразователя “свет-сигнал”, оцениваемого величиной:

$$\psi = 20 \lg 100\,000 = 100 \text{ дБ.}$$

Современные телекамеры с преобразователем “свет-сигнал”, выполненным в виде ПЗС-матрицы, обеспечивают максимальное отношение сигнал/шум 48 – 52 дБ или 251,2 – 398,1 раз. Дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум при помощи охлаждения преобразователя не дает значительного выигрыша.

В работе [5] предлагается способ расширения динамического диапазона путем создания многоканальной камерной системы.

Выполним аналитическую оценку этого способа и его возможных вариантов.

Расчет будем вести параллельно с изложением признаков данного изобретательского решения.

Пусть величина отношения сигнал/шум матрицы ПЗС измеряется соотношением:

$$\psi = U_{\text{сн}} / U_{\text{шп}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{сн}}$ – максимальное напряжение линейного участка световой характеристики фотоприёмника; $U_{\text{шп}}$ – напряжение шумов ПЗС.

Тогда требуемый динамический диапазон яркостей (N) в расчете на N каналов:

$$N = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / DE \psi = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) U_{\text{шп}} / DE U_{\text{сн}}. \quad (7)$$

Наблюдаемое оптическое изображение сцены совмещают с телевизионным растром каждого канала. В каждом из каналов регулируют чувствительность путем управления длительностью времени накопления зарядов в матрице ПЗС, рассчитывая на передачу объектов, имеющих большие уровни освещенности. В настроенной системе минимальный уровень видеосигнала (U_c) каждого канала соответствует уровню ограничения размаха видеосигнала предыдущего канала.

Крутизна преобразования "свет-сигнал" каждого канала:

$$S_i = U_{\text{сн}} / E_i, \quad (8)$$

где E_i – минимальное пороговое значение освещенности объекта, с которого начинает работать данный канал.

Величину E_i можно считать оценкой светового смещения каждого канала:

$$E_i = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})(N_i - 1) / N + E_{\text{min}}, \quad (9)$$

где N_i – номер данного канала.

И, наконец, все каналы собирают в единую систему таким образом, чтобы минимальный уровень светового диапазона каждого канала соответствовал уровню ограничения светового диапазона предыдущего канала, а сумма динамических диапазонов всех каналов тракта преобразования была бы равна динамическому диапазону освещенности объекта.

Световые характеристики составляющих и синтезированная световая характеристика N -канальной системы (отмечена полужирными линиями) представлены на рис. 1.

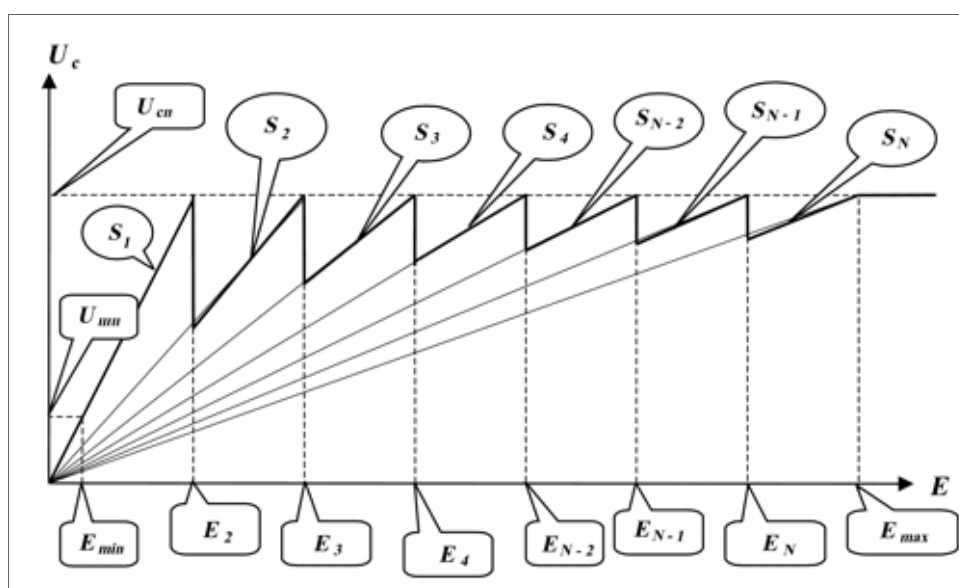


Рис. 1. Световые характеристики N -канальной телевизионной системы

Очевидно, что для обеспечения динамического диапазона в 100 000 раз при использовании в качестве преобразователей "свет-сигнал" современных матриц ПЗС в телевизионной системе потребуется громадное число каналов N , которое равно: $100\,000 / (251,2 \div 398,1) \approx 398 \div 251 (!)$.

Попытаемся найти выход из этой ситуации, рассмотрев частный случай, когда

Попытаемся найти выход из этой ситуации, рассмотрев частный случай, когда число каналов $N = 2$. Тогда величина светового смещения второго канала E_2 , определяемая по формуле (9), составит:

$$E_2 = (E_{\min} + E_{\max})/2.$$

Крутизна преобразования первого канала S_1 по соотношению (3) равна:

$$S_1 = U_{\text{сн}}/E_2.$$

Крутизна преобразования второго канала S_2 по соотношению (3):

$$S_2 = U_{\text{сн}}/E_{\max}.$$

Время накопления преобразователя "свет-сигнал" первого канала ($T_{\text{н1}}$) превышает время накопления преобразователя "свет-сигнал" второго канала ($T_{\text{н2}}$), т.е. $T_{\text{н2}} < T_{\text{н1}}$. Световые характеристики первого и второго каналов, а также световые характеристики двухканальной системы изображены на рис. 2.

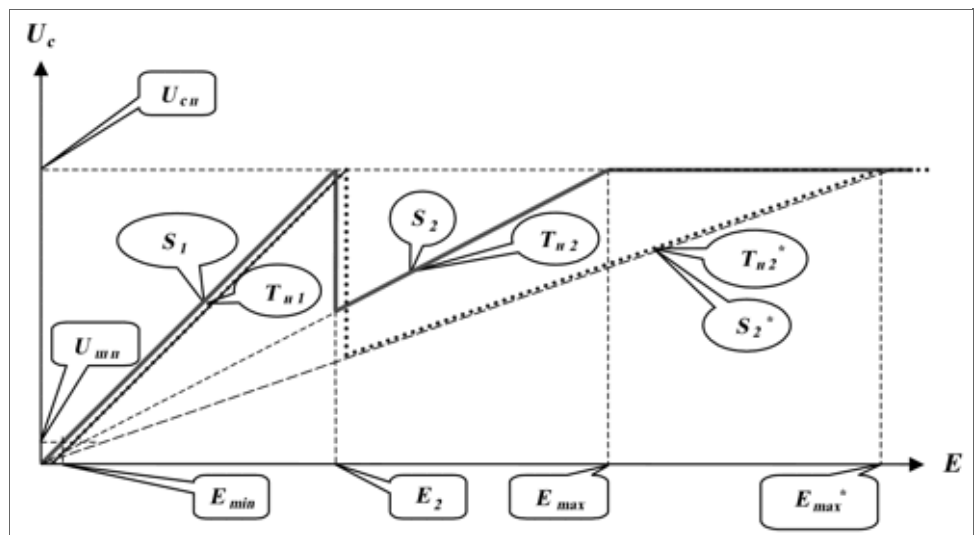


Рис. 2. Световые характеристики двухканальной системы

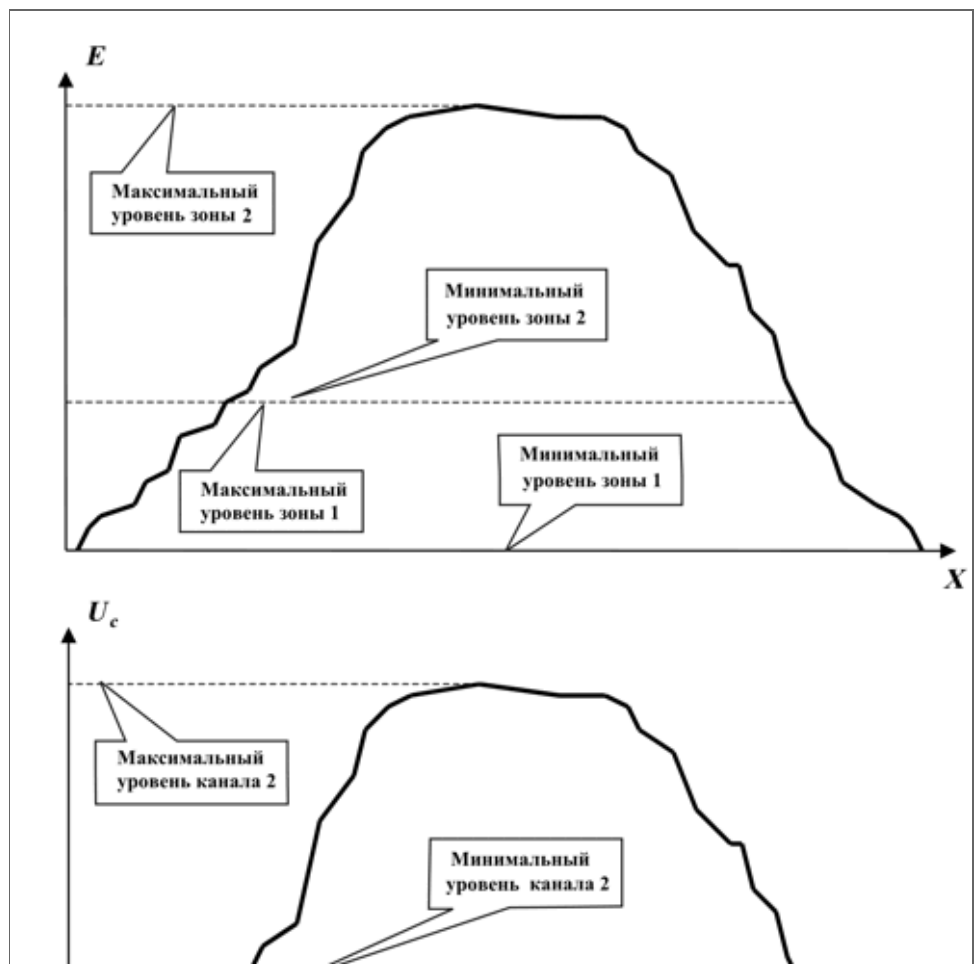




Рис. 3. Иллюстрация разделения диапазона освещенностей на два канала

Предлагаемое решение поясняется на рис. 3, где а) – освещенность на объекте в системе координат (E, X); б) и в) – видеосигналы i-строки телевизионного раstra на объекте для первого и второго каналов.

При использовании в телекамере в качестве единственного первого канала преобразования “свет-сигнал” динамический диапазон (D_1) составит:

$$D_1 = E_2 - E_{\min}$$

Динамический диапазон двухканальной системы (D_2) составит:

$$D_2 = E_{\max} - E_{\min} = 2(E_2 - E_{\min}),$$

т.е. выигрыш в динамическом диапазоне двухканальной системы составляет два раза. Соответственно величина T_{H1} в два раза больше величины T_{H2} .

Пусть система должна работать в телевизионном стандарте. Тогда $T_{H1} = 18,4$ мс, а расчетная величина $T_{H2} = 9,2$ мс. Световая характеристика этого двухканального преобразования “свет-сигнал” показана на рис. 2 сплошной линией.

При практической реализации [6, 7, 8] двухканальной телекамеры на единственной ПЗС-матрице целесообразно установить время накопления второго канала T_{H2} существенно меньше расчетного значения. Если при этом согласиться со снижением заданного отношения сигнал/шум, начиная от освещенности E_2 и далее, то можно получить выигрыш в динамическом диапазоне больше, чем два раза.

Например, при выборе значения $T_{H2}^* = 1,18$ мс будем иметь выигрыш в динамическом диапазоне, равный 15,6 раз или 24 дБ (световая характеристика показана линией “круглые точки” на рис. 2).

В качестве заключения

К сожалению, полученный выигрыш в динамическом диапазоне телекамеры на матрице ПЗС явно недостаточен. По-видимому, следует признать, что применительно к фотоприемникам технология ПЗС для создания телекамер с расширенным динамическим диапазоном достигла определенного предела и не имеет перспектив для дальнейшего развития.

В настоящее время набирает силу встречное движение со стороны специалистов компьютерной техники, ставшее одной из причин **второго этапа твердотельной революции в телевидении**, характеризующегося внедрением в практику КМОП-фотоприемников. Лидирующее положение в этом технологическом соперничестве принадлежит американской компании Pixim [9].

Технология изготовления фотоприемников на комплементарных структурах “металл – окисел – полупроводник” (КМОП) в отличие от ПЗС совместима с технологией производства средств вычислительной техники. Поэтому реальным становится создание видеосистем на кристалле, объединяющих в себе КМОП-фотоприемник и

создание видеосистем на кристалле, объединяющих в себе КМОП-фотоприемник и устройство цифровой обработки [10].

Отметим и другое существенное различие КМОП и ПЗС. Матрицы на КМОП по схемотехнической организации относятся к приборам с координатной адресацией. Это означает, что считывание электрического сигнала, накопленного под воздействием света, осуществляется в ней посредством двухмерной координатной адресации с доступом к каждому пикселу матрицы. Поэтому число каналов преобразования "свет-сигнал" на кристалле может быть без принципиальных ограничений создано равным числу пикселов фотоприемника.

КМОП-видеосистемы на кристалле по сравнению с системами на ПЗС смогут обеспечить **сверхширокий линейный динамический диапазон**, так как воплощение изобретательского замысла [5] здесь становится не только практически осуществимой, но и изящно выполнимой задачей.

Литература

1. Куликов А.Н. Телевизионное наблюдение при ярком солнечном свете. / Специальная техника, 2001, № 1, с. 11 – 20.
2. Смелков В.М. Возможности построения охранной телевизионной камеры для наблюдения в условиях сложного освещения./Специальная техника, 2006, № 1, стр. 9–11.
3. Смелков В.М. Двухматричная телевизионная камера для наблюдения в условиях сложного освещения: новое решение. / Специальная техника, 2006, № 2, стр. 15–18.
4. Стенин В.Я. Применение микросхем с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1989, с. 231.
5. Виленчик Л.С., Гончаренко Б.Г., Курков И.Н., Разин А.И., Розвал Я.Б. Патент 2199827 РФ. МПК⁷ H04N5/202. Способ расширения динамического диапазона передаваемых градаций яркости и/или освещенности в телевизионной системе. / Б.И., 2003, № 6.
6. Супердинамический Panasonic. / Системы безопасности, 1998, № 19, с. 24 – 25.
7. Смелков В.М. Аналоговый метод автоматического режима работы охранной телевизионной камеры для наблюдения в условиях сложного освещения. / Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, 2002, №1 – 2, с. 35 – 39.
8. Смелков В.М. Патент №2235443 РФ. МКИ⁷ H04N5/335, 3/14, 5/202. Телевизионная камера на матрице приборов с зарядовой связью. / Б.И., 2004, № 24.
9. Передовая технология компании Pixim. / CCTV focus, 2003, № 4, с. 12 – 15.
10. Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К. Основные направления развития телевизионной техники. Вопросы радиоэлектроники, серия "Техника телевидения", вып. 1, 2006, с. 3 – 12.