

А. Е. Рычажников

*Кафедра Телевидения и Видеотехники Санкт-Петербургского
Государственного Электротехнического Университета «ЛЭТИ» им. В. И.
Ульянова / Ленина /*

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КМОП ФОТОПРИЕМНИКА В РЕЖИМЕ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО ЗАТВОРА

Проанализированы принципы построения и связанные с этим особенности функционирования твердотельного фотоэлектрического преобразователя на основе технологии КМОП. Подробно проанализированы, математически обоснованы и объяснены основные эффекты, возникающие при наблюдении динамических сюжетов с помощью КМОП фотодатчика.

КМОП сенсор, фотоэлектрический преобразователь, бегущий затвор, геометрические искажения, наблюдение движущихся объектов

Современные ТВ-системы строятся на основе использования принципа накопления, который, в отличие от принципа работы систем мгновенного действия, использует большую часть светового потока. Это резко повышает чувствительность, однако приводит к определенным проблемам при передаче быстродвижущихся объектов. В твердотельных фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) широко распространенным методом решения этой проблемы является управление временем накопления при помощи режима быстродействующего электронного затвора (High Speed Electronic Shutter).

Обычно управление временем накопления осуществляется за счет сброса накопленных в фотодиодах зарядовых пакетов в стоковую область, расположенную под светочувствительным элементом в подложке. После чего процесс накопления начинается заново и, соответственно, время накопления оказывается уменьшенным.

Возникновение динамического смаза обусловлено тем, что за время накопления, равное времени кадра или поля, объект успевает изменить свое положение. Уменьшая время накопления можно уменьшить величину смаза, однако, при этом, пропорционально падает чувствительность.

В приборах зарядовой связи (ПЗС) управление временем накопления осуществляется периодическим сбросом избыточных зарядовых пакетов, с помощью механизма антиблужинга. Данный механизм подробно рассмотрен в литературе [1,2] и, поэтому, не будем на нем останавливаться.

Рассмотрим реализацию режима быстродействующего электронного затвора в КМОП сенсорах. В подавляющем большинстве современных КМОП сенсоров нет секции видеопамати на целый кадр. Первый связан с применением так называемого «бегущего»

электронного затвора (Rolling Shutter). Рассмотрим реализацию считывания в таком КМОП сенсоре.

КМОП сенсоры прошли целый ряд этапов в своем развитии [3,4], с присущими каждому из этапов особенностями, однако на данный момент самым распространенным в мире являются КМОП сенсоры с т.н. активным пикселем.

Структура активного пикселя изображена на рис. 1, а диаграммы его работы на рис. 2. Фоточувствительным элементом является обратно смещенный фотодиод (область с легированием n-типа, размещенная на кремниевой подложке p-типа). Транзистор VT1 служит для периодического сброса накопленного заряда из фотодиода.

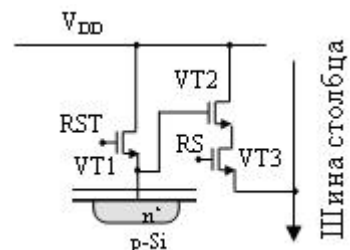


Рис. 1

На рис. 2, а приведены диаграммы сигнала RS (Row Select, выбор строки). Данный сигнал, транзистор VT3 подключает выход истокового повторителя (транзистора VT2) к вертикальной видеошине и, соответственно, к аналоговому мультиплексору, подающему видеосигнал U_s на выход, т.е. активный уровень сигнала RS соответствует моменту считывания видеосигнала.

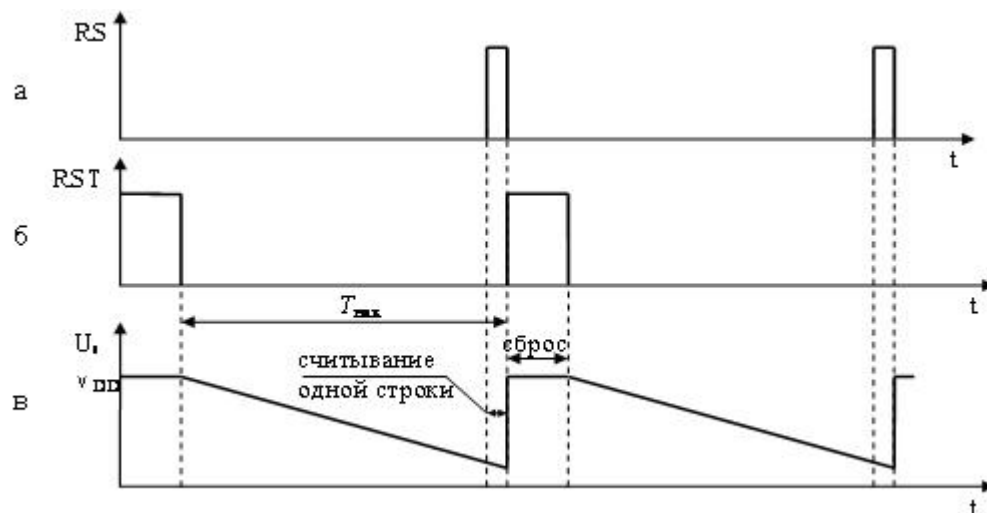


Рис. 2

На рис. 2, б приведены временные диаграммы сигнала RST (Reset, сброс). Данный сигнал предназначен для сброса потенциала фотодиода до напряжения питания. Во время действия импульса RST обратносмещенный фотодиод оказывается подключенным к потенциалу питания и его емкость оказывается заряженной до потенциала V_{DD} , рис. 2, в. Далее под действием светового потока емкость фотодиода разряжается пропорционально падающему световому потоку, рис.2, в. По сигналу RS производится считывание, после чего следует очередной сброс строки.

Таким образом, время накопления $T_{нак}$ в данном пикселе начинается после того, как была считана предыдущая строка. Так как все строки сдвинуты относительно друг друга соответственно, на время строки, то и время накопления в разных строках сдвинуто относительно друг друга на время строки (рис. 3).

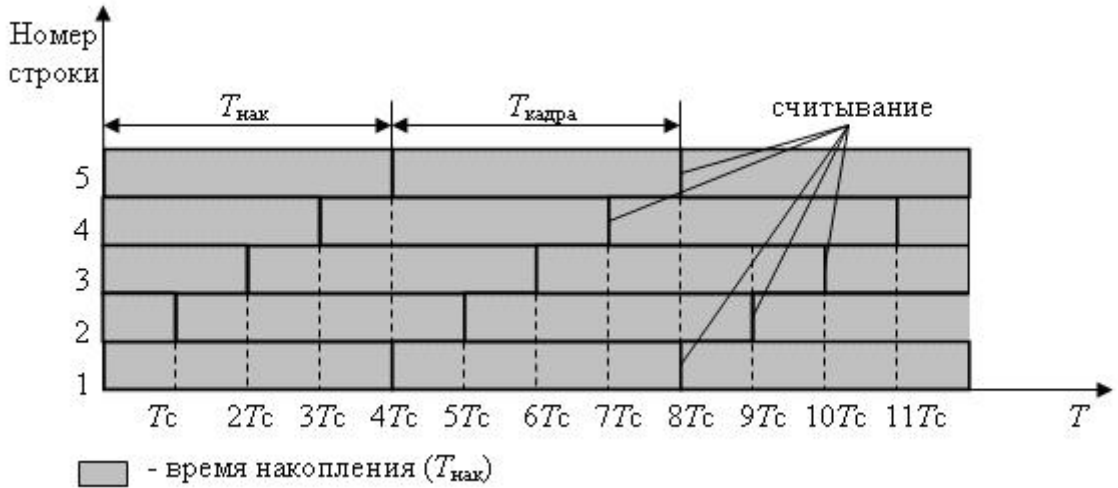


Рис. 3

Считывание различных строк происходит в разное время и приводит к геометрическим искажениям движущихся объектов. Представленный на рис.3 пример приведен для сенсора, состоящего из пяти строк.

При включении режима быстродействующего электронного затвора, диаграмма сигнала управления сбросом фотодиода изменяется, рис. 4, б.

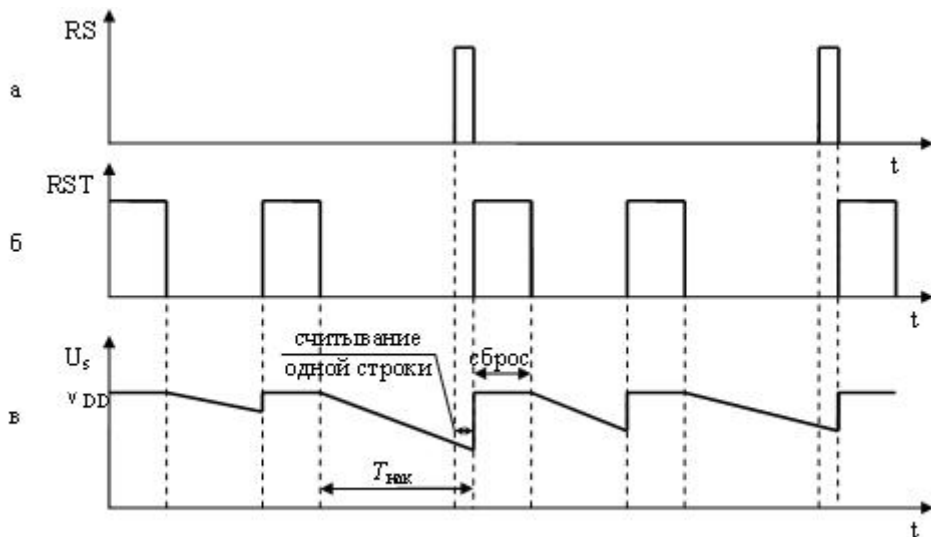


Рис. 4

На транзистор сброса подается дополнительный сигнал сброса и время накопления оказывается уменьшенным, рис.4, в. Временная диаграмма сигнала считывания остается неизменной, рис.4, а.

Считывание различных строк также производится в различное время, но интервал накопления уменьшается, рис 5.

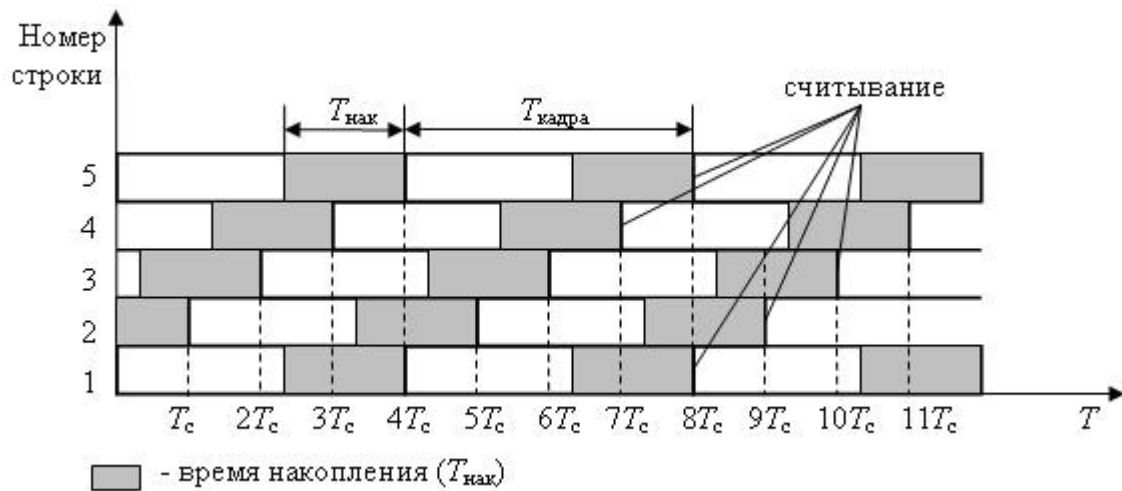


Рис. 5

Таким образом, время кадра будет зависеть от суммы времени накопления и считывания, что принципиально отличается от реализации режима электронного затвора в матричных ПЗС.

Анализ геометрических искажений, возникающих при панорамировании или при наблюдении крупноразмерных движущихся объектов с помощью КМОП сенсора.

Для объяснения эффектов геометрических искажений возникающих при наблюдении динамических сюжетов с помощью КМОП сенсора построим математическую модель наблюдения некоего крупноразмерного движущегося объекта. Под крупноразмерным объектом будем понимать объект, размеры которого существенно превышают размер пикселя. В качестве объекта выбираем прямоугольник с равномерной яркостью по всей поверхности на контрастном темном фоне (рис. 6).

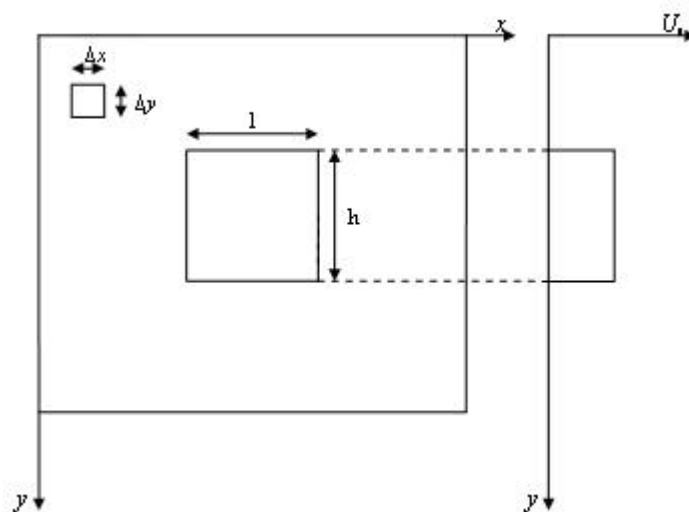


Рис. 6

Размеры объекта: по вертикали – h , по горизонтали – l . Пиксель имеет размеры Δx на Δy , причем $h \gg \Delta x$ и $l \gg \Delta y$.

Движение объекта может быть как равномерным, так и неравномерным. Однако в пределах одного кадра будем считать его равномерным, так как длительность кадра невелика и скорость за этот период не может сильно измениться. Относительно скорости движения объекта можно выделить три случая: движение со скоростью ниже скорости считывания, движение со скоростью считывания и движение выше скорости считывания.

Движение объекта выше скорости считывания имеет место только при наблюдении особо быстро движущихся объектов, при этом время его нахождения в кадре очень мало, что не представляет особого интереса. Так же как и движение со скоростью считывания, что является весьма маловероятным. В этом случае мы в каждой строке будем считывать один и тот же сигнал.

Таким образом, имеет смысл рассматривать движение объекта со скоростью ниже скорости считывания, что является наиболее распространенным явлением.

Обозначим скорость движения объекта – v_h , а скорость считывания (сброса) – $v_H = \frac{\Delta y}{T_c}$, где T_c – длительность строки, Δy – расстояние между строками ($v_H > v_h$). Выделим следующие направления движения: по вертикали и по горизонтали. При движении объекта вниз его скорость относительно считывания будет равна

$$v_H - v_h.$$

При движении объекта вверх его скорость относительно считывания будет равна

$$v_H + v_h.$$

Таким образом, мы можем выделить следующие направления движения объекта: вниз, вверх и по горизонтали в произвольном направлении. Будем рассматривать их по очереди для следующих режимов работы КМОП-сенсоров с «бегущим» считыванием, в том числе с реализацией «бегущего» электронного затвора.

Для облегчения расчетов введем величину H , которая обозначает расстояние между сбросом и считыванием. Принцип сканирования КМОП-сенсора в режиме «бегущего» электронного затвора показан на рис. 7

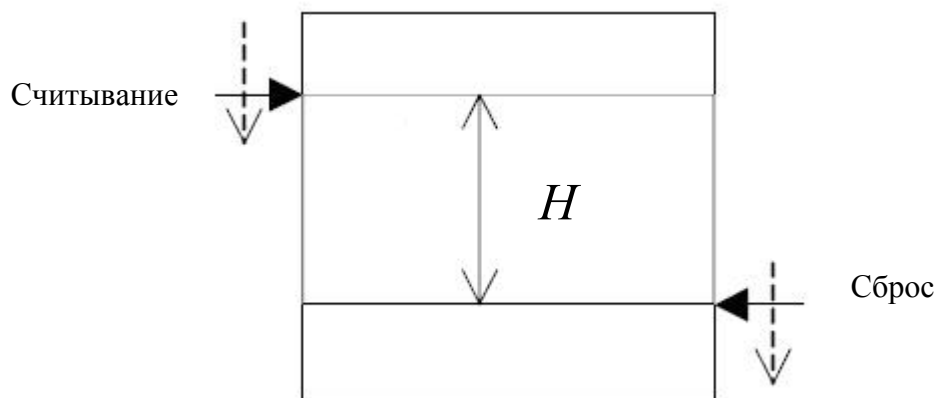


Рис. 7

где H - расстояние между сбросом и считыванием, Δy – расстояние между строками, а n – коэффициент отношения времени накопления кадра ко времени считывания строки.

$$H = n\Delta y,$$

$$n = \frac{T_{\text{нак}}}{T_c}.$$

Для режима «бегущее» считывание $T_{\text{нак}}=T_{\text{кадра}}$. Для режима «бегущего» затвора $T_{\text{нак}}$ выбирается произвольно меньшим времени кадра, но пропорциональным времени строки. Далее, разобьем все выше указанные варианты еще на два случая: $H>h$ и $H<h$.

Таким образом, должны быть рассмотрены следующие комбинации режимов работы КМОП сенсора и параметров движения объекта:

- движение объекта вниз для «бегущего» и «глобального» затвора и считывания при условиях $H>h$ и $H<h$;
- движение объекта вниз для «бегущего» и «глобального» затвора и считывания при условиях $H>h$ и $H<h$;
- движение объекта по горизонтали для «бегущего» и «глобального» затвора и считывания при условиях $H>h$ и $H<h$.

Рассмотрим все эти случаи последовательно.

Анализ искажений изображений объектов, движущихся вниз в вертикальном направлении в режиме «бегущего» считывания

Искажения при движении объекта вверх и вниз будут различаться, что обуславливает необходимость рассмотрения их по отдельности.

Сначала рассмотрим случай $H>h$.

На рис. 6 изображены характерные моменты движения интервала сброса-считывания относительно изображения движущегося объекта. При выводе выражений считаем, что объект неподвижен, а относительная скорость движения интервала составляет $v_H - v_h$.

Диаграммы положения процессов считывания и сброса относительно объекта, движущегося вниз показаны на рис. 8.

На рис. 8,а показан момент времени, когда сброс догнал верхний край объекта. Данное положение по времени будем считать начальным ($T=0$). Следующее положение объекта (рис. 8, б) соответствует моменту, когда сброс догнал нижний край объекта. Этот момент наступит через интервал времени равный

$$\Delta T_1 = \frac{h}{v_H - v_h}.$$

За это время объект сместился на расстояние

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H - v_h} h. \quad (1)$$

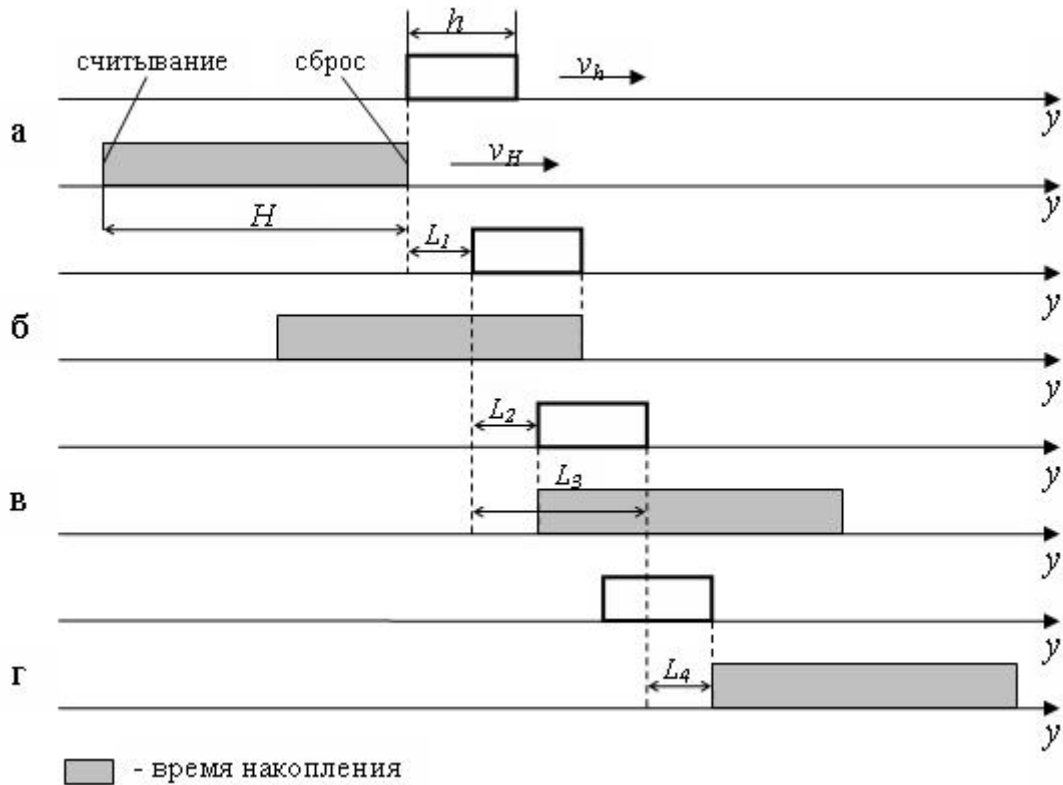


Рис. 8

В это время происходит линейное нарастание видеосигнала, что обусловлено тем, что время накопления в указанных строках оказывается нарастающим. В следующий момент (рис. 8, в) считывание за временной интервал ΔT_2 догнало верхний край объекта. Длительность интервала

$$\Delta T_2 = \frac{H - h}{v_H - v_h}.$$

Смещение объекта за это время составит

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H - v_h} (H - h).$$

В результате формируется участок, на котором видеосигнал остается неизменным

$$L_3 = \frac{v_h}{v_H - v_h} (H - h) + h. \quad (2)$$

Далее, за время ΔT_3 объект пройдет расстояние L_4 , равное L_1 и видеосигнал снова линейно уменьшится до нуля (рис. 8, г)

$$\Delta T_3 = \frac{h}{v_H - v_h}.$$

Пройденный за это время изображением интервал будет иметь длительность

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H - v_h} h.$$

Таким образом, значение видеосигнала в вертикальном направлении будет иметь трапецеидальную форму с фронтами, определяемыми выражением (1). Плоская часть видеосигнала при движении изображения вниз удлинится и данное удлинение будет описываться выражением (2).

Далее рассмотрим случай $H < h$. Это соответствует режиму электронного затвора с малым временем накопления.

На рис. 9 изображены характерные моменты движения интервала сброса-считывания относительно движущегося объекта. Начальная точка, соответствующая нулевому моменту времени – сброс догнал верхний край объекта (рис. 9, а), $T=0$. Считывание догонит верхнюю границу объекта за время

$$\Delta T_1 = \frac{H}{v_H - v_h},$$

а объект пройдет за это время расстояние (рис. 9, б)

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H - v_h} H. \quad (3)$$

В этом промежутке времени происходит линейное нарастание видеосигнала. В следующий момент времени (рис. 9, в) считывание догнало верхний край объекта

$$\Delta T_2 = \frac{h - H}{v_H - v_h}.$$

Пройденное при этом расстояние составит

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H - v_h} (h - H).$$

Диаграммы положения процессов считывания и сброса относительно объекта, движущегося вниз

Видеосигнал остается неизменным на протяжении интервала

$$L_3 = \frac{v_h}{v_H - v_h} (h - H) + h. \quad (4)$$

За время

$$\Delta T_3 = \frac{H}{v_H - v_h}$$

объект пройдет расстояние

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H - v_h} H$$

(рис. 9, г) и видеосигнал линейно уменьшится до нуля.

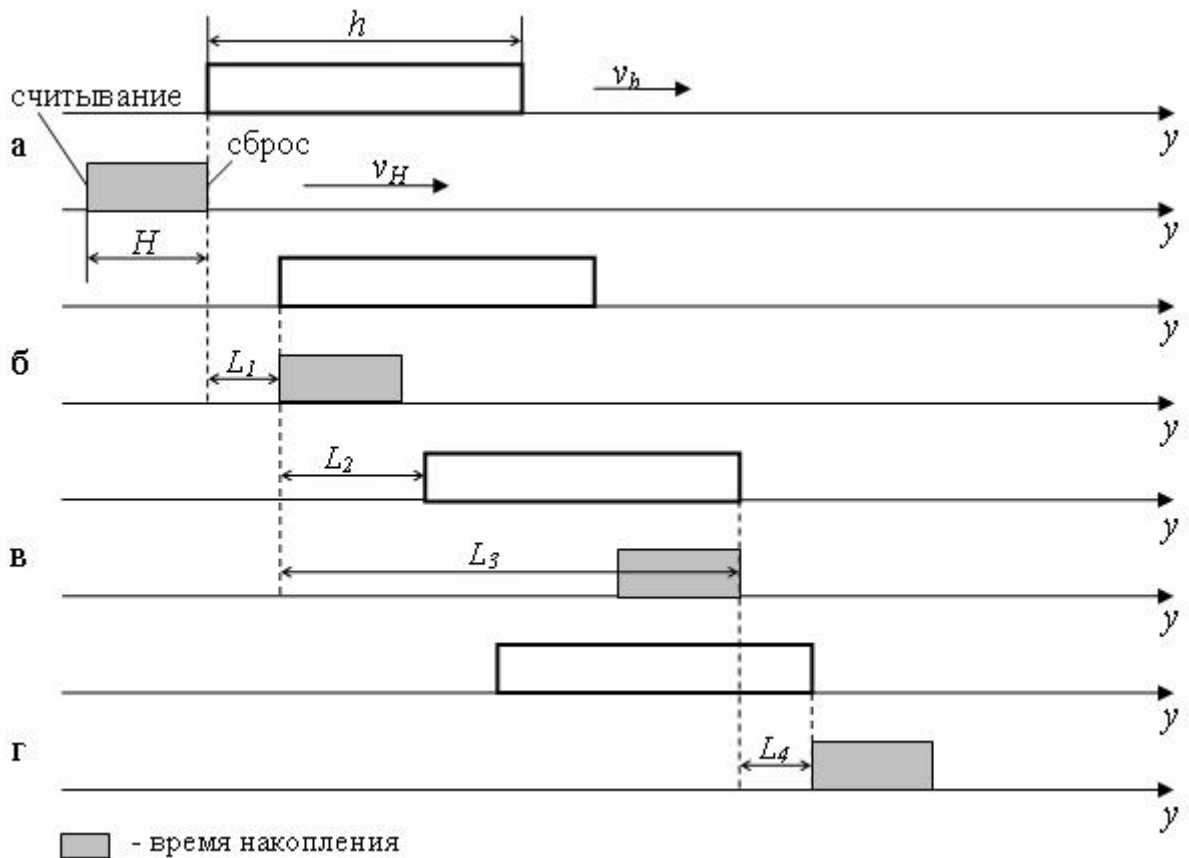


Рис. 9

Таким образом, изображение, оставленное движущимся вниз объектом будет иметь полную высоту, равную $L = L_1 + L_3 + L_4$. Передний и задний фронт окажутся размытыми с длительностью, определяемой интервалами L_1 и L_4 , равными друг другу и определяемыми выражением (3). Плоская часть видеосигнала определяется интервалом L_3 и может быть найдена из выражения (4).

Таким образом, при работе в режимах «бегущее» считывание и «бегущий» электронный затвор, изображение будет размыто симметрично сверху и снизу, причем ширина переднего и заднего фронтов равна $L_1 = L_4 = \frac{v_h}{v_H - v_h} h$ для случая $H > h$ и

$L_1 = L_4 = \frac{v_h}{v_H - v_h} H$ для случая $h > H$. (рис. 10)

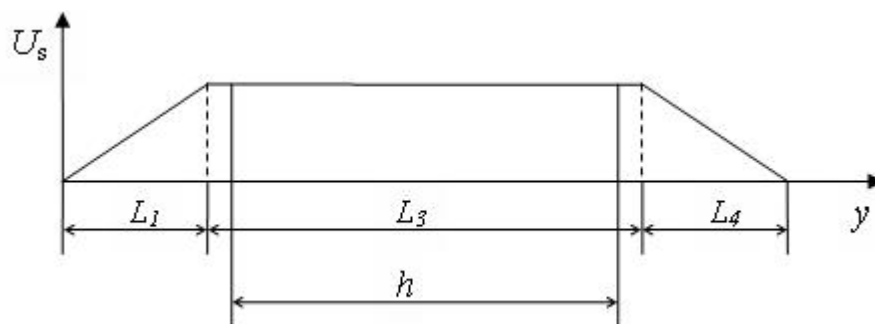


Рис. 10

Плоская часть объекта удлинится до $L_3 > h$ – реальной высоты объекта. Полученные выражения (1)-(4) позволяют рассчитать геометрические искажения объекта при движении его по вертикали при различных временах накопления и скоростях движения объекта.

Анализ искажений изображений объектов, движущихся вверх

Рассмотрим объект, движущийся в направлении противоположном считыванию, в данном случае это будет объект, движущийся вверх. В этом случае искажения изображения будут иметь другой вид, отличающийся от предыдущего случая. Так же, как и в предыдущем подразделе рассмотрим два случая.

На рис. 11, а (случай $H > h$) показан момент времени, когда сброс догнал верхний край объекта. Данный момент времени принят за нулевой.

Следующее положение объекта (рис. 11, б) соответствует моменту времени, когда сброс догнал нижний край объекта. Этот момент наступает через интервал времени

$$\Delta T_1 = \frac{h}{v_H + v_h}.$$

За это время объект сместился на расстояние

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H + v_h} h. \quad (5)$$

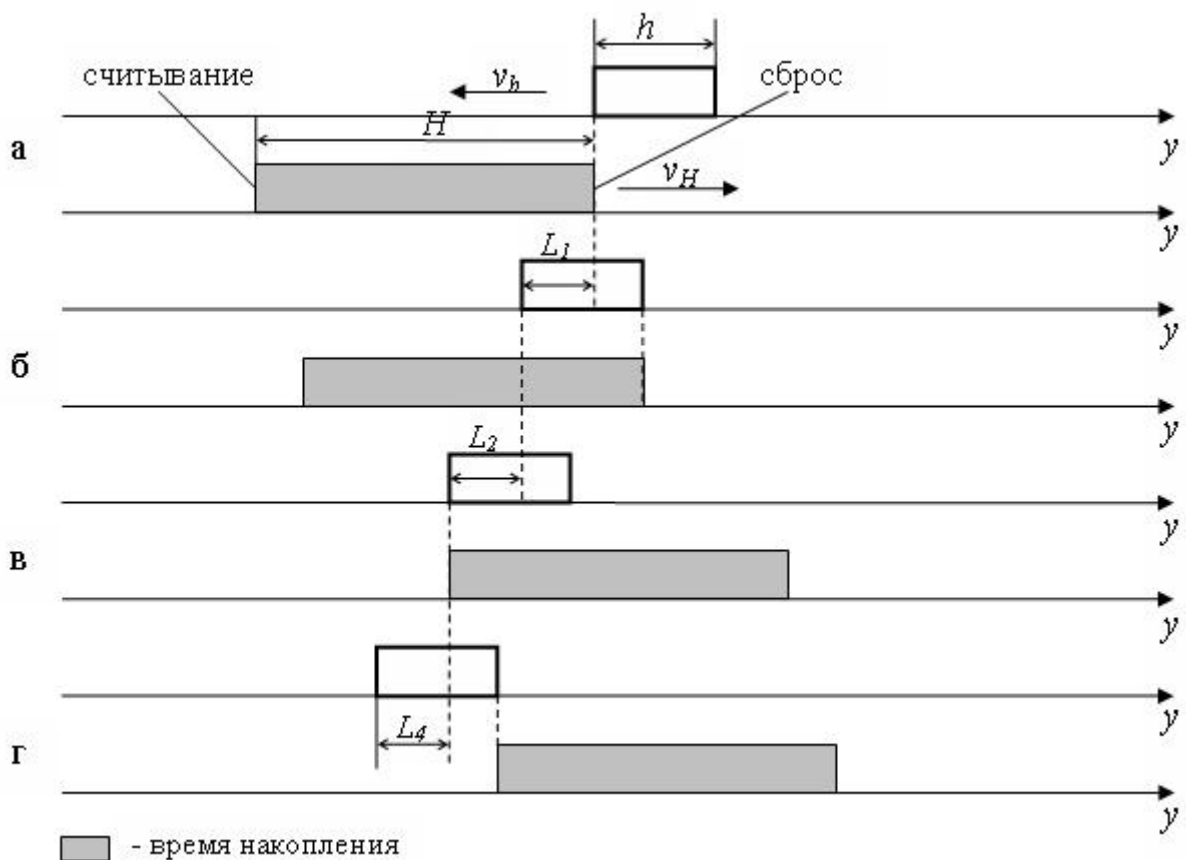


Рис. 11

На данном интервале происходит линейное нарастание видеосигнала. Таким образом выражение (5) определяет фронт сигнала. За следующий интервал времени

$$\Delta T_2 = \frac{H - h}{v_H + v_h}$$

считывание за время догнало верхний край объекта (рис. 11, в). Объект сдвинулся на

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H + v_h} (H - h). \quad (6)$$

На интервале L_2 значение видеосигнала остается неизменным, т.е. формируется его плоская часть.

Далее, за интервал времени

$$\Delta T_3 = \frac{h}{v_H + v_h}$$

объект пройдет расстояние

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H + v_h} h$$

и видеосигнал линейно уменьшится до нуля (рис. 11, г). Таким образом, значение L_4 , равное L_1 определяет второй фронт видеосигнала.

На рис. 12 приведены диаграммы процессов считывания и сброса относительно объекта, движущегося вверх, для второго случая $h > H$.

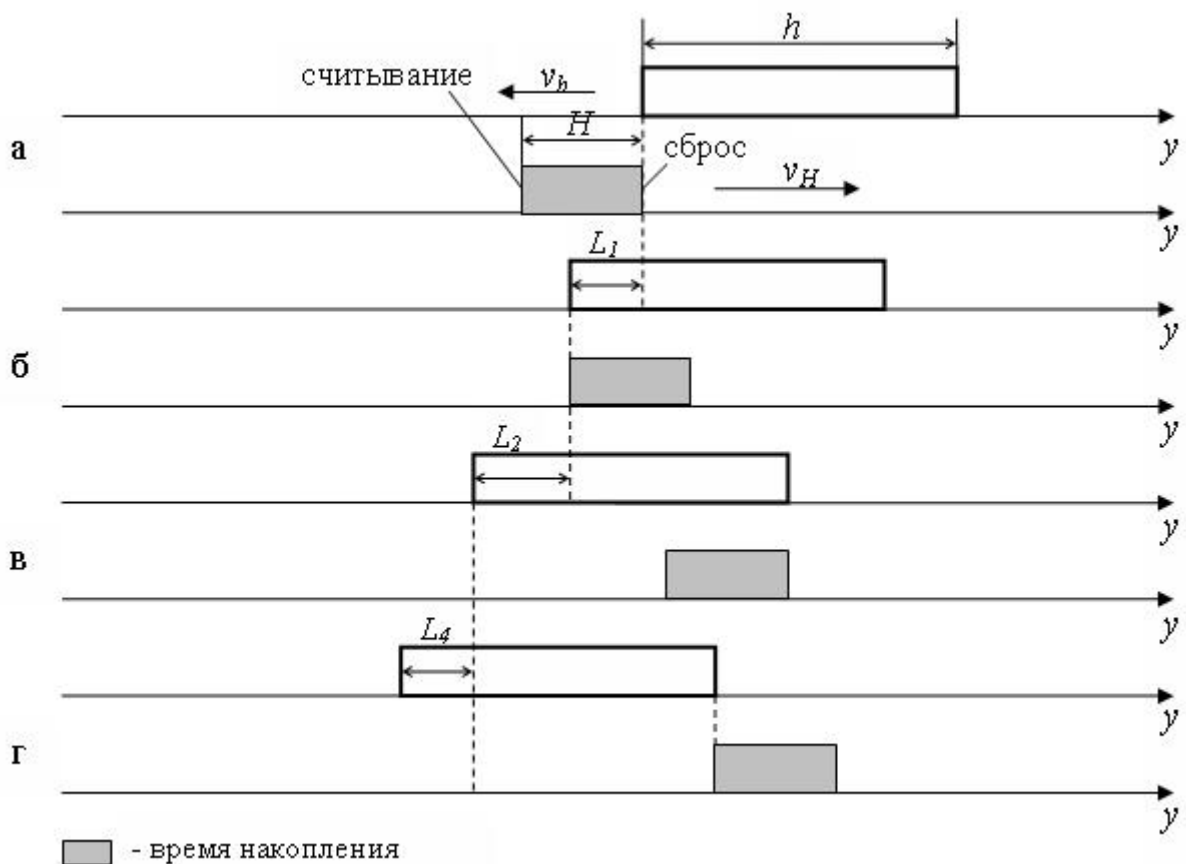


Рис. 12

Начальный момент времени, соответствующий нулю – сброс догнал верхнюю границу объекта (рис. 12, а).

Следующее положение объекта (рис. 12, б) соответствует моменту, когда сброс догнал нижний край объекта. Этот момент наступает через временной промежуток

$$\Delta T_1 = \frac{H}{v_H + v_h}.$$

За это время объект сместится на расстояние

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H + v_h} H. \quad (7)$$

На этом интервале происходит линейное нарастание видеосигнала.

За следующий временной интервал

$$\Delta T_2 = \frac{h - H}{v_H + v_h}$$

(рис. 10, в) считывание за время догнало верхний край объекта. Сам объект сдвинулся на

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H + v_h} (h - H). \quad (8)$$

На этом интервале видеосигнал остается неизменным. Далее, за промежуток времени

$$\Delta T_3 = \frac{H}{v_H + v_h}$$

объект пройдет расстояние

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H + v_h} H$$

и видеосигнал снова линейно уменьшится до нуля (рис. 12, г).

Таким образом, при движении объекта вверх его изображение будет сжиматься до значения, определяемого (8) и иметь симметричные смазы сверху и снизу, определяемые выражением (7).

На рис. 13 представлен результирующий вид видеосигнала.

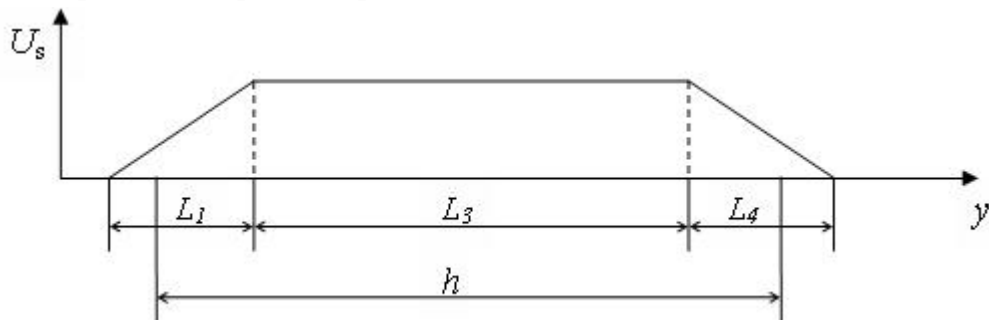


Рис. 13

Таким образом, в зависимости от направления движения в вертикальном направлении изображение оказывается либо растянутым, либо сжатым, а также возникает динамический смаз, определяемый скоростью движения и временем накопления.

Анализ искажений изображений объектов, движущихся в горизонтальном направлении

При движении по горизонтали нет необходимости рассматривать два направления (вправо и влево), так как они абсолютно идентичны. Также необходимо перейти к двумерной модели процесса.

Как и в предыдущем разделе, вначале рассмотрим случай $h > H$ (рис. 14).

Нулевой начальный момент времени соответствует ситуации, когда сброс догнал верхнюю границу объекта (рис. 14, а).

Следующее положение объекта (рис. 14, б) соответствует моменту, когда сброс догнал нижний край объекта. Этот момент наступает через интервал времени

$$\Delta T_1 = \frac{H}{v_H}.$$

За это время объект сместится на расстояние

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H} H. \quad (9)$$

На данном интервале видеосигнал линейно нарастает. Далее, считывание за время

$$\Delta T_2 = \frac{h - H}{v_H}$$

считывание догоняет верхний край объекта и смещение составляет (рис. 14, в)

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H} (h - H).$$

Видеосигнал остается неизменным в течение L_3 .

$$L_3 = \frac{v_h}{v_H} (h - H) + l. \quad (10)$$

Далее, за временной интервал

$$\Delta T_3 = \frac{H}{v_H}$$

объект пройдет расстояние

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H} H$$

и видеосигнал линейно уменьшается до нуля (рис. 14, г).

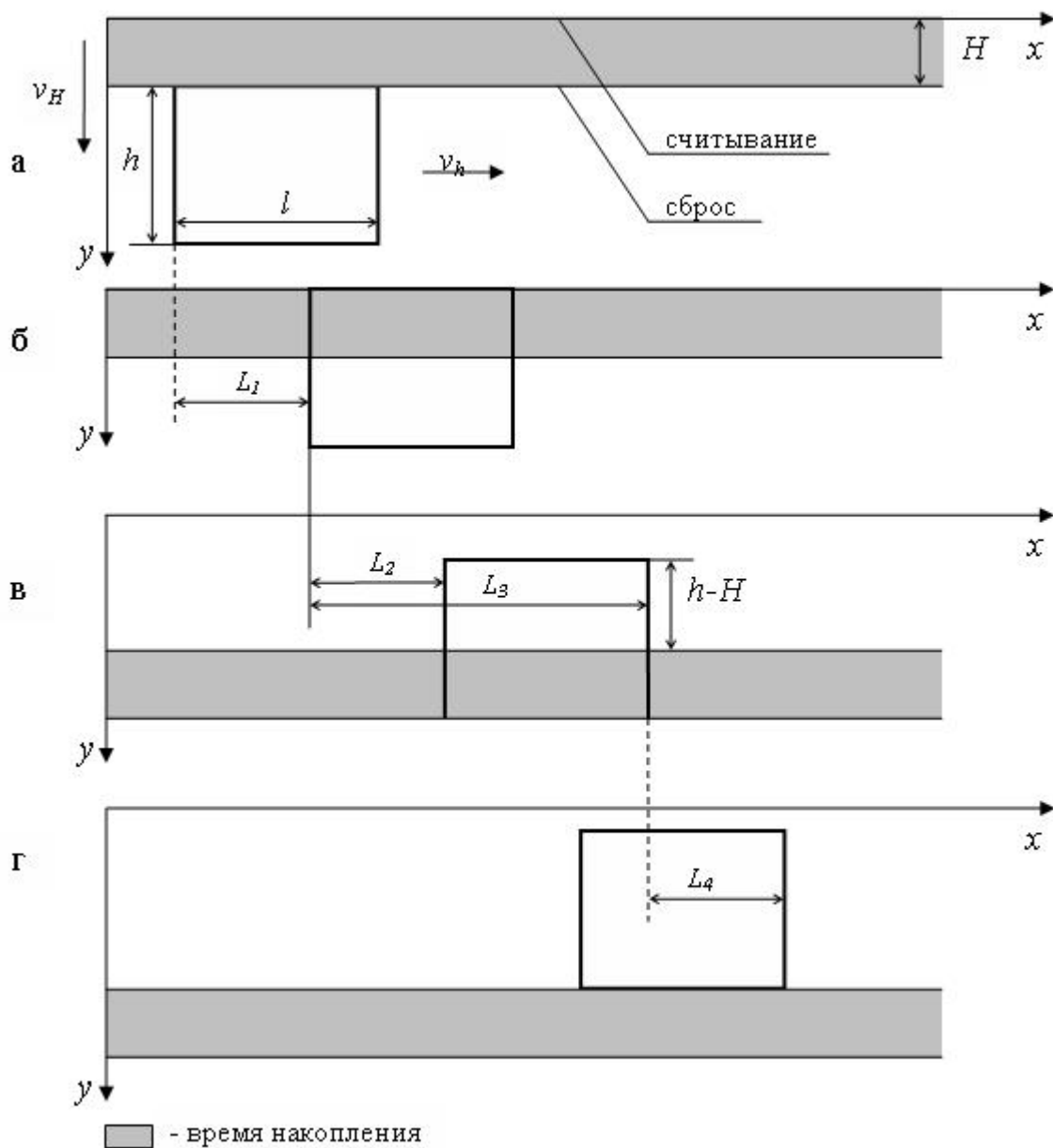


Рис. 14

Рассмотрим второй случай $H > h$ (рис. 15).

На рис. 13, а показан нулевой, начальный момент времени, когда сброс догнал верхний край объекта.

Следующее положение объекта (рис. 15, б) соответствует моменту, когда сброс догнал нижний край объекта. Этот момент наступает за временной промежуток

$$\Delta T_1 = \frac{h}{v_H}.$$

Смещение изображения за это время составит

$$L_1 = \frac{v_h}{v_H} \cdot h. \quad (11)$$

На этом интервале происходит линейное нарастание видеосигнала и формируется размазанный фронт на вертикальных границах объекта.

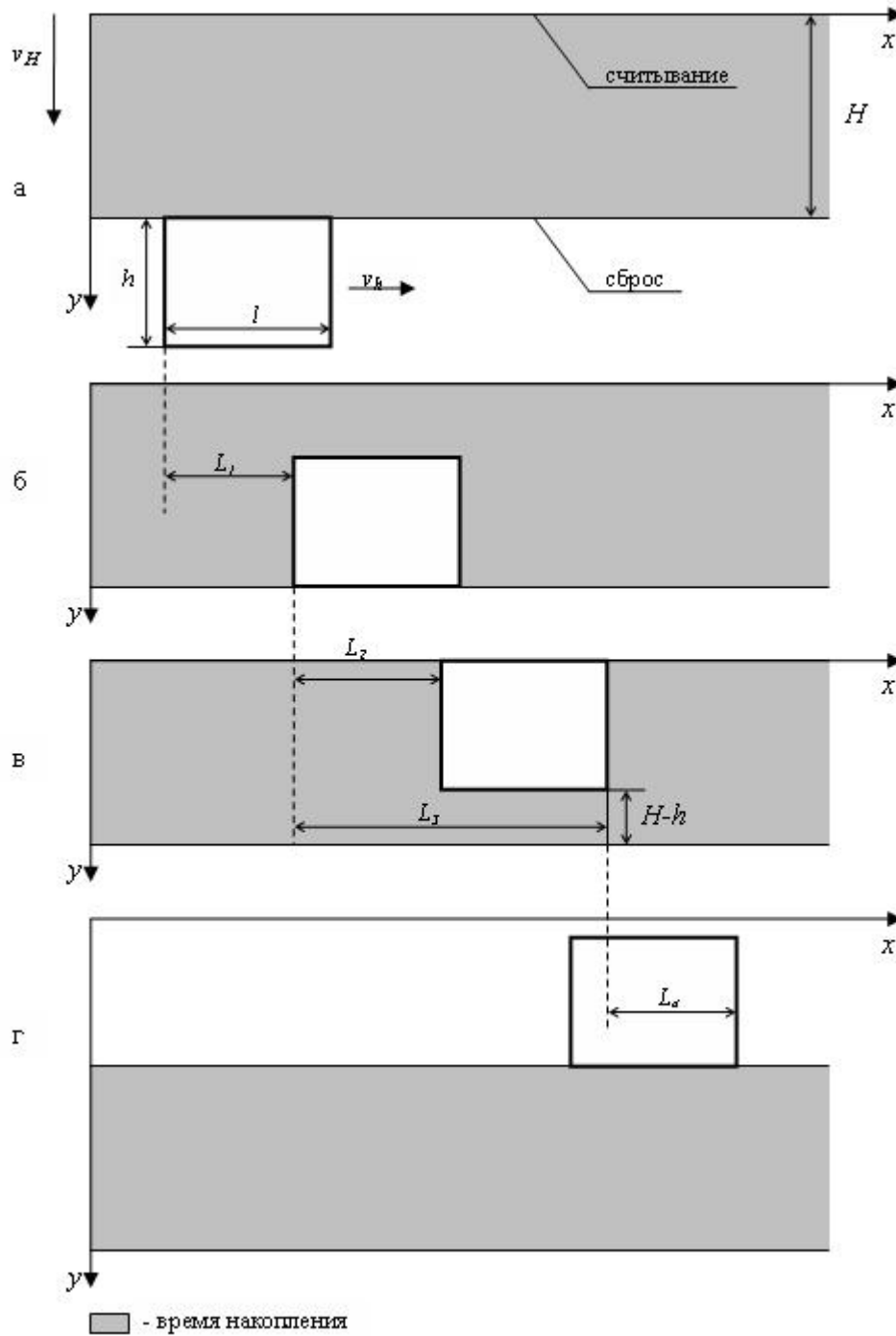


Рис. 15

За следующий временной промежуток (рис. 15, в)

$$\Delta T_2 = \frac{H - h}{v_H}$$

считывание за время догоняет верхний край объекта и сдвинулось на

$$L_2 = \frac{v_h}{v_H}(H - h).$$

Видеосигнал остается неизменным на интервале

$$L_3 = \frac{v_h}{v_H}(H - h) + l. \quad (12)$$

После этого, за время

$$\Delta T_3 = \frac{h}{v_H}$$

объект пройдет расстояние

$$L_4 = \frac{v_h}{v_H}h$$

и видеосигнал линейно уменьшится до нуля (рис. 15, г).

Диаграммы положения процессов считывания и сброса относительно объекта, движущегося вправо

Таким образом, видеосигнал будет иметь вид представленный на рис. 16.

Вид видеосигнала при движении объекта вправо

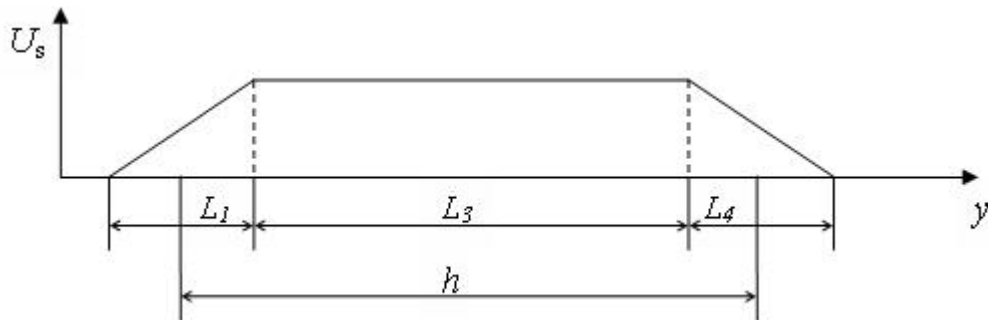


Рис. 16

Передний и задний фронты оказываются размазанными с длительностью определяемой выражением (11), а плоская часть определяется выражением (12).

Рассмотрим двухмерную картину геометрических искажений при движении объекта по горизонтали, рис.17.

Искажения, возникающие при горизонтальном движении объекта

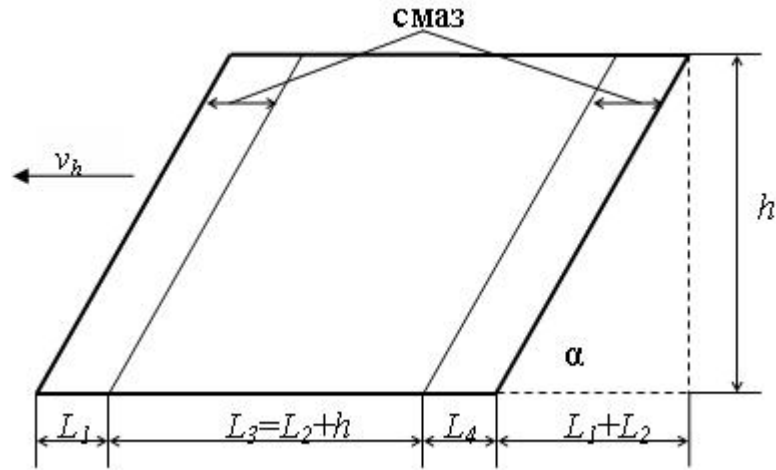


Рис. 17

Отметим, что помимо размазывания, описываемого выражением (11) прямоугольный объект наклоняется и превращается в параллелепипед.

При этом, угол наклона объекта может быть найден как

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{L_1 + L_2}.$$

Т.о. разработана математическая модель, объясняющая природу и характер искажений передачи динамических сюжетов ФЭП на основе КМОП-технологии. Данная модель описывает только самый простой вид наблюдаемого движения – равномерное поступательное, для других видов движения можно построить аналогичные зависимости. Особо надо подчеркнуть зависимость величины искажений от скорости перемещения наблюдаемого объекта относительно светочувствительной поверхности матрицы и времени накопления (рис. 7)

Результаты экспериментальных исследований

Для проверки теоретических расчетов была поставлена серия опытов с использованием черно-белой цифровой видеокамеры BMR-1340LM-U, построенной на базе матрицы МТ9М001 фирмы Микрон. Данная камера обладает широким набором регулировок, в том числе временем накопления, усилением, форматом кадра, длительностью гасящих по строке и по кадру. Все это позволило провести большое количество измерений и подробно изучить поведение реального КМОП фотоэлектрического преобразователя с активным пикселем. В качестве наблюдаемой мишени был использован лист бумаги с нанесенным контрастным изображением – белые вертикальные и горизонтальные полосы, а также белый квадрат на черном фоне.

Эксперимент полностью подтвердил теоретические расчеты. Характерные примеры работы камеры в режиме бегущего затвора и бегущего считывания можно наблюдать на рис.18.

При движении мишени вниз, наблюдаемый объект растягивался по вертикали (это характерно заметно по изменению соотношений сторон квадрата и длин вертикальных и

горизонтальных полос), а при движении мишени вверх изображение соответственно сжималось.

Искажения при горизонтальном движении также полностью соответствуют расчетным.

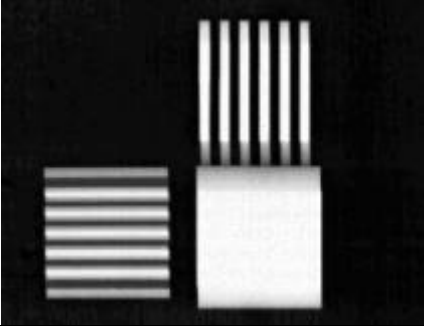
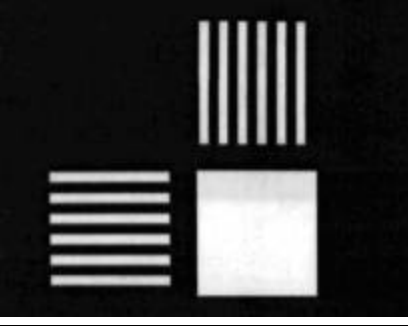
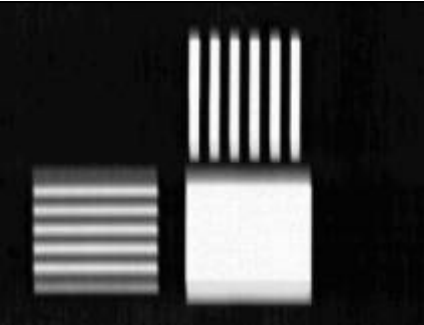
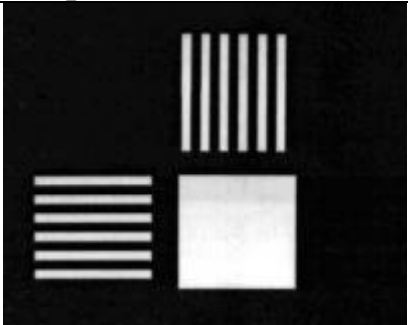
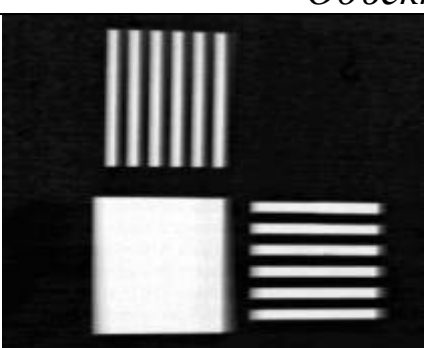
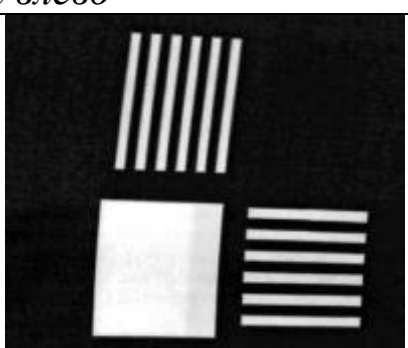
Режим «бегущее» считывание	Режим «бегущий» затвор
<i>Объект движется вниз</i>	
	
<i>Объект движется вверх</i>	
	
<i>Объект движется влево</i>	
	

Рис. 18

Т.о. можно сделать вывод о принципиальной правильности разработанной математической модели искажений передачи динамических сюжетов. Наблюдаемые искажения представляют собой сочетание динамического смаза и искажения формы наблюдаемого объекта, что полностью согласуется с теоретическими предположениями.

Выводы:

1. Наиболее распространенные на данный момент в мире КМОП фотоприемники с активным пикселем подвержены геометрическим искажениям при передаче динамических сюжетов. При этом искажения складываются из суперпозиции динамического смаза и геометрического искажения формы наблюдаемого объекта.
2. Причинами динамического смаза является инерционность процесса накопления в КМОП сенсоре, что совершенно аналогично механизму его образования в ПЗС.
3. Причиной геометрических искажений является отсутствие памяти на кадр и неодновременность процесса накопления различных строк в большинстве современных фотоэлектрических преобразователей на основе КМОП технологии.
4. Величина искажений прямо зависит от скорости перемещения наблюдаемого объекта относительно фотоприемника и соотношения времени накопления каждой строки в фоточувствительном массиве и времени её считывания.

Библиографический список

1. Быков Р.Е., Сигалов В.М., Эйсенгардт Г.А. Телевидение. Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая Школа, 1988
2. Цифровое преобразование изображений. Учеб. пособие для вузов / Р.Е.Быков, Р.Фрайер, К.В.Иванов и др. М.: Горячая линия- Телеком, 2003
3. Манцветов А.А., Цыцулин А.К. Телекамеры на КМОП-фотоприемниках // Вопросы радиоэлектроники. СПб: ФГУП НИИТ, 2006 с.70-89
4. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле/ Березин В.В., Умбиталиев А.А., Фахми Ш.С. и др.. М.: Радио и связь, 2006