

Телевизионные наблюдения в сложных условиях

Введение

Совсем недавно в 1970 году одновременно появились микропроцессор и прибор с зарядовой связью (CCD) [1]. Современная жизнь уже немыслима без компьютеров и CCD - камер. Электронная революция продолжается, и каждый год поражает нас новинками и небывалым снижением цен. Вряд ли в 70-х кто-то думал, что несколько миниатюрных телекамер можно будет поместить в спичечный коробок, а их стоимость станет меньше, чем у электрических чайников. Все это при отличном качестве изображения и высокой надежности.

Сегодня больше всего камер используется в охранных телевизионных системах. Охранные камеры работают в разных условиях наблюдения. Часто они простые, когда объекты хорошо освещены и нет заметных помех. Но бывают и сложные ситуации, когда телевизионная камера ведет наблюдение при свете солнца и звезд, во время дымки, тумана и дождя, под водой, при наличии интенсивных электромагнитных помех, радиации и т.п. В таких условиях обычные CCD камеры уже не обеспечивают надежного наблюдения. Здесь требуются специальные высокочувствительные матрицы CCD, широкодиапазонные асферические объективы, специальные методы адаптации и обработки сигнала и многое другое. В настоящей статье рассматриваются возможности телевизионного наблюдения в наиболее сложных условиях - на краях диапазона рабочих освещенностей.

Способы расширения диапазона рабочих освещенностей.

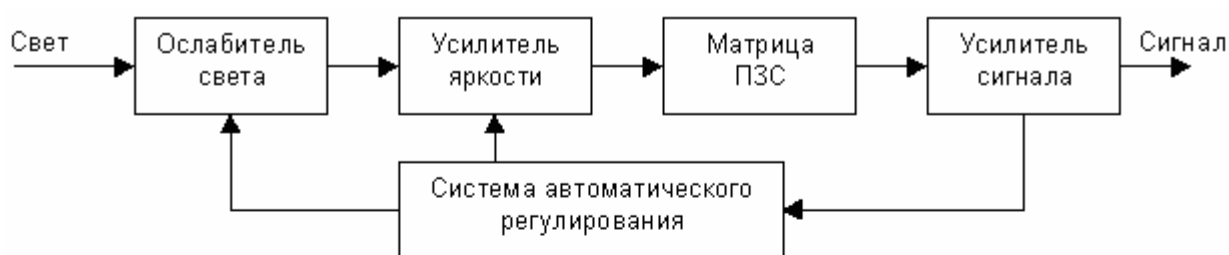
Изобретатели совершенствуют телекамеры, пытаясь довести их до качества природного глаза. Оказалось, что человеческий глаз - совершенный зрительный прибор. Он имеет много удивительных свойств и одно из них - широчайший диапазон воспринимаемых освещенностей. Днем мы можем наблюдать, чуть прищурясь белый снег под солнцем и облака с освещенностью более 100000 люкс. Ночью мы легко идем по дороге, освещенной светом звезд (примерно 0,0001 люкс). Разделив первое значение на второе, получим 10^9 - диапазон воспринимаемых глазом освещенностей равный одному миллиарду или 180 дБ!

Ни один электронный датчик сигнала не имеет столь широкого динамического диапазона. Это обусловлено физическими ограничениями - уровнем собственного шума с одной стороны и уровнем насыщения сигнала с другой. Но как выяснилось, не имеют такого диапазона и естественные датчики оптического сигнала: колбочки и палочки человеческого глаза. С натяжкой можно считать, что динамический диапазон как естественных, так и искусственных датчиков света равен 1000 (60 дБ). Откуда же берется один миллиард?

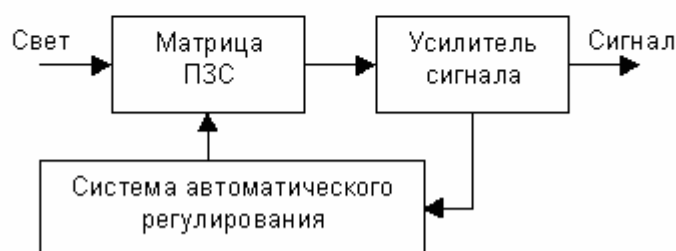
Для достижения диапазона большего, чем динамический диапазон датчика сигнала необходимо построение системы автоматического регулирования или адаптации. В телевизионных камерах наиболее распространены два способа адаптации.

- В первом способе перед датчиком света устанавливают последовательно включенные: регулируемый ослабитель и усилитель сигнала (управляемая диафрагма объектива и ЭОП соответственно в телекамере).

- Во втором способе сам фоточувствительный датчик делают управляемым и за счет адаптации параметров изменяют его чувствительность.



Первый способ адаптации к освещенности в телекамере



Второй способ адаптации к освещенности в телекамере

Рис.1 Способы расширения диапазона рабочих освещенностей в CCD камерах. В современных телекамерах используют оба способа адаптации к уровню освещенности, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы. Ниже будут рассмотрены возможности и ограничения каждого способа применительно к области сверх высоких и сверх низких освещенностей.



Рис.2 Иллюстрация расширения диапазона рабочих освещенностей фоточувствительного датчика, работающего в составе адаптивной фоточувствительной системы.

Наблюдение ночью.

Рекламные манипуляции с чувствительностью.

Каждая фирма, производящая и продающая телекамеры рекламирует свой товар. В ход идут фразы: "превосходное качество изображения", "DSP - процессор", "Сверх высокая чувствительность" и так далее. Дело не ограничивается качественными характеристиками. У многих возникает соблазн чуть-чуть преувеличить и количественные параметры телекамер. Например, можно видеть, как солидная фирма "SONY" для своей камеры SPT-M308CE честно заявляет разрешающую способность 370 телевизионных линий (ТВЛ), в то время как молодой, корейский "LILIN" в модели PIH-752 указывает 420 ТВЛ. Выбирая, какую камеру купить потребитель и не знает, что в обеих камерах использованы одни и те же матрица ПЗС ICX-055BL и микросхемы обрaмления. Преувеличиваются и другие технические характеристики телекамер. Но, пожалуй, ни один параметр не подвергался такой рекламной манипуляции, как "чувствительность". Повод к этому дает различная трактовка его разными авторами и фирмами.

Чувствительность характеризует способность телекамеры наблюдать в ночных условиях. Чувствительность - это та минимальная освещенность, выражаемая в люксах, при которой камера еще способна формировать изображение. Если ограничиться этими фразами, то возникает неоднозначность, которая и позволяет заявлять для одной и той же камеры цифры чувствительности, отличающиеся более чем в 100 раз. Как же поправить эту ситуацию?

- Во-первых, нужно указывать: где измеряется освещенность: на матрице CCD или на объекте. Например, при объективе с относительным отверстием $F1,4$ при коэффициенте отражения объекта 0,75 чувствительность на матрице будет в 10 раз меньше, то есть лучше, чем на объекте.
- Во-вторых, при измерении освещенности на объекте, следует указывать относительное отверстие объектива. Например, чувствительность одной и той же камеры с асферическим объективом $F0,8$ будет в 10 раз лучше, чем с малогабаритным объективом $F2,0$.
- В-третьих, необходимо указывать: какое отношение сигнал/шум принимается за пороговое, при измерении чувствительности. Например, раньше под минимальной освещенностью понималась такая, при которой сохраняется полная разрешающая способность камеры, то есть отношение сигнал/шум примерно 34 - 36 дБ. Сейчас минимальная освещенность трактуется как такая, при которой можно различить только крупные детали изображения, то есть отношение сигнал/шум 20 - 24 дБ. В космической и военной технике часто под пороговой чувствительностью понимается такая, когда размах сигнала равен размаху шумовой дорожки, то есть отношение сигнал/шум 5 - 6 дБ и кроме шума на изображении практически ничего не видно. В этом случае также для одной и той же камеры можно указывать значения чувствительности, отличающиеся в 10 раз.

Характерным примером рекламных манипуляций последних двух лет является заявленная японской фирмой Watec чувствительность для камеры WAT-902H. В 1999 году специалисты были поражены значением чувствительности 0,0003 люкса при $F1,4$ в положении переключателя AGC "Hi". Это в 100 раз лучше, чем для стандартных CCD камер! Многие даже поверили этой цифре, тем более, что камера оказалась действительно неплохой. В WAT-902H впервые была применена матрица SONY ICX249AL нового поколения EXWAVEHAD с улучшенной в 4 раза чувствительностью. Но всего лишь в четыре, а не в сто. После того, как камеру купили и

разобрали на мелкие части, выяснилось, что ничего особенного кроме новой матрицы SONY в этой камере нет, а положение "Hi" - это увеличение в 4 раза коэффициента усиления, которое увеличивает только шумы, но не чувствительность. Сейчас все спохватились и указывают для WAT-902H уже только 0,002 люкс, как, например, в последнем английском каталоге "NORBAIN" [4], хотя и эта цифра завышена и следовало бы указать 0,005 люкс, что соответствует измерениям на объекте при отношении сигнал/шум 20дБ и F1,4.

□ Способы улучшения чувствительности.

Существуют следующие способы улучшения чувствительности телевизионных CCD камер:

- Применение высокочувствительных матриц CCD и светосильных объективов.
- Применение электронно-оптических усилителей яркости изображения ЭОП.
- Введение адаптивных режимов накопления и считывания заряда в CCD.

Телевизионные наблюдения в сложных условиях.

Применение высокочувствительных матриц CCD и светосильных объективов.

Сначала перечислим факторы, ограничивающие чувствительность в современных CCD камерах и возможности их улучшения путем применения новых CCD и объективов.

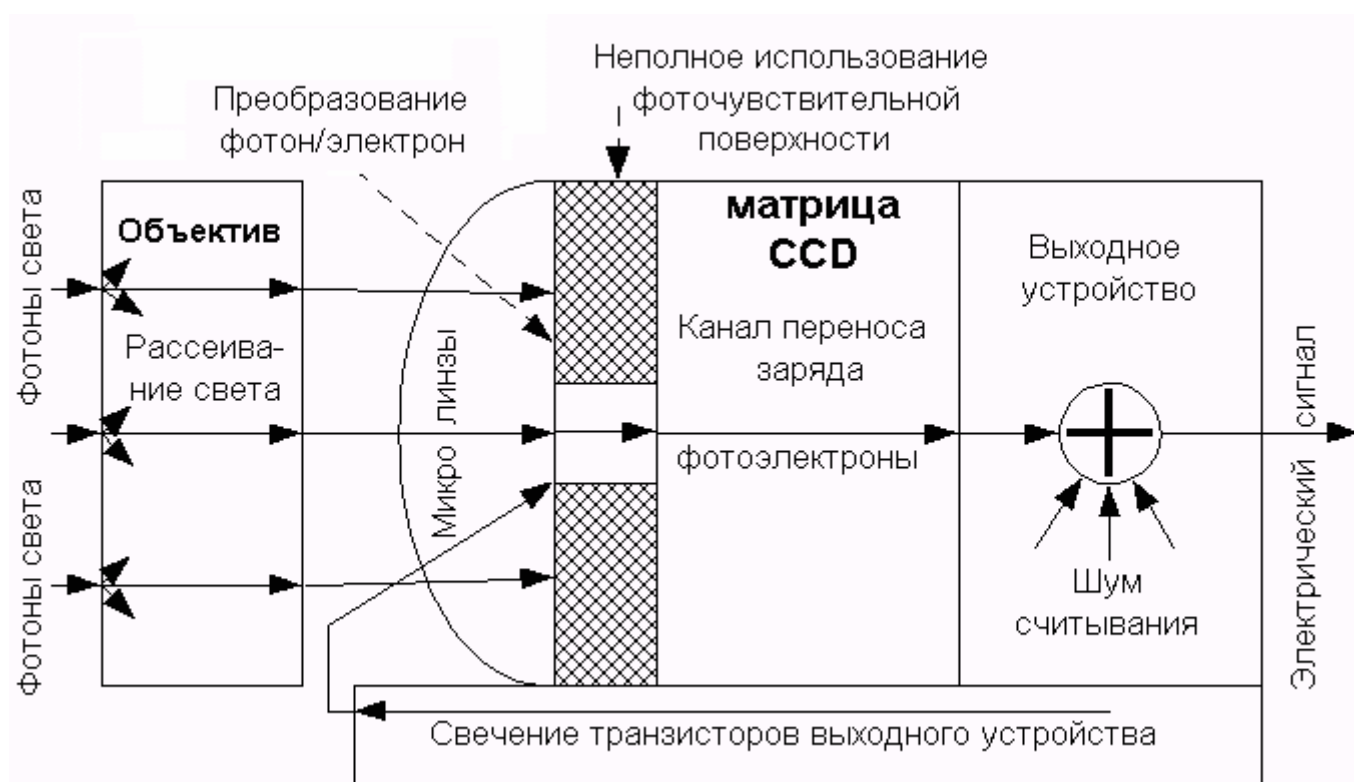


Рис.3 Иллюстрация различных факторов ограничения чувствительности в телекамере на матрице CCD.

- **Потери** света в объективе. Не все фотоны света, попадающие на входную линзу, проходят к матрице CCD. Часть из них рассеивается, а часть поглощается материалом линз. Нужно сказать, что современные асферические объективы с относительным отверстием 0,8 - 0,75 - имеют очень высокие характеристики и в ближайшем будущем трудно ожидать заметных улучшений их параметров.
- **Потери** из-за малой относительной площади фоточувствительных элементов к полной площади фоточувствительной секции. Фоточувствительные ячейки, особенно в матрицах малых форматов 1/3 дюйма и менее занимают менее 10% площади чувствительной поверхности. Остальная площадь используется под каналы переноса заряда и систему антиблужинга. 10 лет назад это было одним из главных ограничений чувствительность. Фирма SONY изобрела и применила прозрачные микролинзы на поверхности CCD, которые концентрируют свет со всей поверхности на маленькие фоточувствительные ячейки. Год назад SONY усовершенствовала эти линзы и выпустила новую серию матриц CCD под маркой EXWAWENHAD CCD, что позволило дополнительно в 3 - 4 раза поднять чувствительность телекамер. В настоящее время параметры микролинзового массива близки к теоретическому пределу, и здесь также трудно ожидать существенных улучшений.
- **Потери** при преобразовании фотон/электрон. Квантовый выход лучших CCD приближается к 0,5 в диапазоне видимых длин волн и ближнем ИК. Освоение новых материалов и дальнейшая оптимизации

структуры приборов в будущем могла бы позволить увеличить это значение, особенно в области синего и ближней ультрафиолетовой, что могло бы улучшить чувствительность камер. Однако серьезных сдвигов здесь также трудно ожидать.

- **Ограничение** чувствительности из-за шума считывания выходного устройства CCD. В настоящий момент шум считывания - главный фактор ограничивающий чувствительность телекамер. Его значение 20 - 30 электронов/пиксел теоретически можно было бы быть снизить в 10 раз. Ограничением здесь является площадь затвора первого выходного транзистора. Чем меньше площадь, тем меньше шум, но затвор с малой площадью не в состоянии вместить заряд пиксела в случае, когда света много, что приведет к ограничению сигнала в дневных условиях. Есть патенты, в которых предлагается разместить в CCD матрице 2 выходных устройства, одно для малых, а другое для больших зарядов, и переключать их ночью и днем соответственно. Поэтому можно ожидать в дальнейшем появление новых CCD с уменьшенным шумом выходного устройства, что могло бы привести к дальнейшему росту чувствительности CCD камер в несколько раз.
- **Ограничение** чувствительности из-за свечения транзисторов выходного устройства матрицы CCD. Все транзисторы слабо светятся (аналогично светодиодам и лазерным диодам), а в матрицах CCD это препятствует наблюдению слабых освещенностей. Еще 13 лет назад была опубликована статья [2], где в охлаждаемой астрономической CCD камере было замечено свечение в том углу изображения, где расположено выходное устройство. Тогда это было расценено как уникальное явление, проявляющееся только при охлаждении CCD, работающих с большим временем экспозиции. С тех пор чувствительность матриц CCD возросла в 100 раз и этот эффект уже мешает наблюдению в самых чувствительных камерах фирм PANASONIC, BAXALL, ЭВС. Российским специалистам удалось сфотографировать светящиеся транзисторы с помощью высокочувствительной камеры VNC-702. Для этого были использованы две камеры, причем одна из них наблюдала CCD матрицу другой камеры, находящуюся во включенном состоянии. На изображении отчетливо видно, как светятся оба транзистора двухкаскадного выходного устройства матрицы CCD ICX249AL. Были проверены и другие типы матриц CCD, и оказалось, что светятся выходные устройства всех исследованных матриц, но только с разной интенсивностью и площадью свечения. Это новая серьезная помеха, на которую не обращали ранее внимания, заставила фирму ЭВС дорабатывать японские матрицы и заклеивать их выходное устройство непрозрачным материалом в тех камерах, где требовалась максимальная чувствительность. Есть надежда, что производители CCD сами обратят внимание на свечение транзисторов и более простым способом закроют светящиеся элементы.

□ Применение электронно-оптических усилителей яркости изображения (ЭОП).

Электронно-оптические усилители яркости изображения в телевидении применяют давно. Еще до эры CCD камер в передающие телевизионные трубки встраивали каскады электронного усиления, достигая чувствительности на объекте 0,001 люкс и выше. После исчезновения камер на электронно-лучевых трубках остались ЭОПы, которые в военных приложениях использовались в качестве ночных прицелов и приборов ночного видения. Эти ЭОПы стали состыковывать с CCD камерами для увеличения их чувствительности. Образовался новый класс сверхчувствительных телекамер. Однако телекамеры типа "CCD+ЭОП" мало распространены, так как имеют серьезные недостатки. Недостатка два: сверхвысокая стоимость, доходящая до 10000\$ и выше и низкая надежность, из-за возможности разрушения ЭОП при солнечном свете и от утечек и пробоев высокого напряжения. В настоящее время CCD камеры с ЭОП поколения 3+ имеют непревзойденную чувствительность и применяются в тех областях, где важность надежного ночного наблюдения превалирует над денежными затратами. Нужно отметить, что телекамеры CCD+ЭОП все более вытесняются высокочувствительными CCD камерами с адаптивными "ночными" режимами, так, например чувствительность ЭОП поколений 1, 1+ и 2 успешно превзойдена ночными телекамерами фирм PANASONIC, IKEGAMI, KAMPO, BAXALL, ЭВС и другими. Поэтому, можно сказать, что камеры с ЭОП первых двух поколений уже не появятся сегодня на рынке телекамер, так как не могут конкурировать с CCD камерами ни по чувствительности, ни по стоимости. Камеры с ЭОП поколений 2+,3 и 3+ еще существуют как экзотика, но после очередных технологических революций фирм SONY и PANASONIC должны неизбежно исчезнуть, как мамонты.

Таблица 1. Сравнительные характеристики телекамер с ЭОП

Фирма	Модель	Чувствительность	Разрешение	Тип ЭОПА
Panasonic (Япония)	WV-BD900	0,0015 люкс	420 твл	ЭОП 2
TURN (Россия)	LINX120	0,0001 люкс	350 твл	ЭОП 2 плюс
JAI (Германия)	JAI-757	0,0005 люкс	510 твл	ЭОП 2,5 плюс
JAI (Германия)	JAI-757A	0,0001 люкс	450 твл	ЭОП 3,0

Примечание. Так как для камер с ЭОП цифры чувствительности обычно приводятся для изображений хорошего качества, при полной разрешающей способности, то есть, при отношении сигнал/шум 34 - 36 дБ, то для сравнения с CCD камерами, где чувствительность приводится при отношениях сигнал/шум 20 - 24 дБ, цифры чувствительности в таблице 1 следует уменьшить в 5 раз (умножить на 0,2).

□ Введение адаптивных режимов накопления и считывания заряда в матрице CCD.

При появлении первых матриц CCD основной задачей инженеров было создание надежного "твердотельного" аналога электронно-лучевой трубки. И только через некоторое время было обращено внимание на адаптивные свойства нового прибора. Новыми оказались принципиальные возможности CCD одинаково хорошо работать в широком диапазоне тактовых частот считывания заряда, а также возможность суммирования зарядов с соседних элементов и строк до считывания сигнала с выхода устройства. Это позволило еще в 1985 году создать экспериментальную CCD камеру без APD объектива и каких-либо светофильтров с диапазоном рабочих освещенностей равным человеческому глазу [3]. Диапазон рабочих освещенностей 1 миллиард был достигнут только за счет перестройки параметров еще весьма допотопных матриц CCD 80-х годов. В настоящее время, используя новые матрицы SONY серии EXWAVEHAD, не составляет труда значительно превзойти характеристики глаза. Оговоримся, что пока это возможно только в рамках диапазона рабочих освещенностей и контрастной чувствительности. По другим параметрам до глаза еще очень далеко. Итак, как же можно с помощью адаптации параметров CCD улучшить чувствительность телевизионной камеры?

Накопление сигнала до воздействия шума. Существуют разные способы увеличения чувствительности телевизионной камеры, но все они основываются на одном принципе: "принципе накопления энергии сигнала". Этот принцип базируется на коренном отличии сигнала от шума. Сигнал всегда однополярный (в телевидении положительный) и имеет ограниченную полосу частот. Шум всегда дифференциальный с нулевым математическим ожиданием и со значительно более широкой полосой частот. В результате простое сложение (накопление) порций "сигнал плюс шум" будет приводить к линейному росту уровня сигнала и только к замедленному (по закону корня квадратного) росту среднего отклонения размаха шума. Каждые 100 сложений улучшают отношение сигнал/шум в 10 раз. Принцип накопления энергии сигнала используется во всех способах повышения чувствительности, будь это пространственно-временное суммирование или низкочастотная фильтрация.

Адаптивные свойства CCD матриц позволяют применить в них уникальный способ повышения чувствительности, который можно условно назвать "накопление до воздействия шума". Суть его в том, что дополнительное суммирование (накопление) сигнала производится в самой матрице ПЗС до того, как сигнал попал в выходное устройство и к нему присоединился шум считывания. В результате происходит сложение сигнала без сложения шума, а шум добавляется в выходном устройстве ПЗС один раз на каждую сумму сигналов. В результате четырехкратное сложение приводит к четырехкратному росту отношения сигнал/шум, а не к 2-х кратному, как в обычных методах. Этот режим эффективен благодаря тому, что при малых сигналах шум считывания значительно превосходит фотонный шум и последний практически не оказывает влияния на результат накопления.

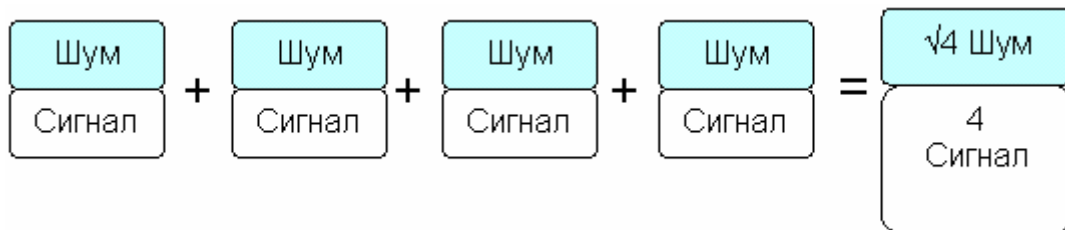


Рис. 5а. Накопление сигнала с шумом (стандартный метод)

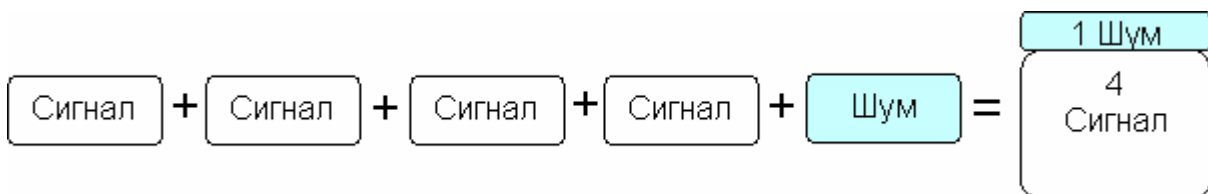


Рис 5б. Накопление сигнала до воздействия шума (в CCD камерах)

Одной из первых камеру с адаптивным накоплением сигнала выпустила фирма PANASONIC. Режим был назван "Electronic sensitivity enhancer" и обеспечивал увеличение времени накопления от 1 до 32-х телевизионных полей, то есть с 1/50 до 0,64 секунды, что приводило к улучшению чувствительности до 32 раз. В настоящее время камеры с режимом "Electronic sensitivity enhancer" выпускают многие фирмы, такие как IКEGAMI, BAXALL, PCAM, КАМРО и многие другие. В таких камерах при использовании матриц CCD фирмы SONY серии EXWAVEHAD и асферических объективов достигается чувствительность до 0,0002 люкс при отношении сигнал/шум 20 дБ.

Несмотря на отличные характеристики камеры с режимом "Electronic sensitivity enhancer" имеют два серьезных недостатка. Во-первых, при увеличении экспозиции происходит "смазывание" изображения движущихся объектов, из-за чего может быть пропущен быстро движущийся нарушитель, что недопустимо в охранных системах. Второй недостаток - достаточно высокая стоимость, так как для визуализации на экране монитора прореженного в 32 раза изображения нужен преобразователь телевизионных стандартов с кадровым ОЗУ, АЦП, ЦАП и системой синхронизации. В результате, даже корейские камеры с системой "Electronic sensitivity enhancer" стоят в 2 раза дороже обычных телевизионных камер.

Другим вариантом адаптивного накопления сигнала является суммирование зарядов с соседних элементов матрицы CCD. Изменяя режим синхронизации CCD можно обеспечить сложение зарядов соседних элементов на затворе выходного транзистора и соседних строк на электродах выходного регистра CCD. Также, как и в первом способе происходит сложение сигнала до воздействия шума и десятикратное сложение приводит к десятикратному улучшению чувствительности. Первой и пока единственной фирмой, реализовавшей в своих телекамерах этот режим, является российская фирма ЭВС. Режим был назван "ночным режимом 1" и в CCD камерах этой фирмы он автоматически включается при уменьшении освещенности на объекте менее 0,02 люкс. CCD камеры фирмы ЭВС, выполненные на EXWAVEHAD матрицах CCD фирмы SONY, в ночном режиме 1 развивают чувствительность до 0,0002 люкс (камера VNC-703), что эквивалентно телекамерам с режимом "Electronic sensitivity enhancer". Камеры с "ночным режимом 1" работают без увеличения инерционности, что позволяет им надежно наблюдать подвижные объекты вплоть до освещенности, соответствующей освещенности от звездного неба. Стоимость камер с "ночным режимом 1" всего на 10 % выше стандартных, так как в них не требуется применения дорогостоящего кадрового ОЗУ. Недостатком "ночного режима 1" является ухудшение разрешающей способности ночью примерно в 3 раза из-за суммирования зарядов с соседних элементов и строк.

Кажется очевидным для дальнейшего увеличения чувствительности объединить два режима "Electronic sensitivity enhancer" и "Ночной режим 1" в одной CCD камере. В конце 1999 г. появилась первая такая камера VNC-702 производства фирмы ЭВС. В рекламных материалах указывается, что в телевизионной камере, развивающей чувствительность на объекте 0,00004 люкс при отношении сигнал/шум 20 дБ, применены "ночные режимы 1 + 2". Под "ночным режимом 2" фирма ЭВС подразумевает режим "Electronic sensitivity enhancer", который в камере VNC-702 для лучшего наблюдения подвижных объектов ограничен до 16 -ти кратного суммирования кадров. Уникальная камера VNC-702 в настоящее время является рекордсменом чувствительности среди CCD камер и всего лишь в несколько раз уступает камерам с ЭОП поколений 3 и 3+. В режиме максимальной чувствительности камеры VNC-702 отчетливо видно свечение выходного транзистора CCD матрицы (рис4), препятствующее в настоящее время дальнейшему росту чувствительности адаптивных CCD камер.

Таблица 2. Сравнительные характеристики телекамер с CCD матрицами серии EXWAVEHAD и с электронными режимами увеличения чувствительности.

Фирма	Модель	CCD	Чувств. Лк.(F 0,8)	Режим увеличения чувствительности	Сложение заряда (раз)
КАМРО (Корея)	KC1001C	EXWAVEHAD	0,0002	Electronic sensitivity enhancer	32
КАМРО (Корея)	KC1003C	EXWAVEHAD	0,0002	Electronic sensitivity enhancer	32
PCAM (Корея)	PC-360D	EXWAVEHAD	0,00005	Electronic sensitivity enhancer	128
Икегамі (Япония)	ICD-47	EXWAVEHAD	0,0065	нет	-
WATEC (Япония)	WAT-902H	EXWAVEHAD	0,002	нет	
Baxall	CD9772	EXWAVEHAD	0,0002	Electronic sensitivity enhancer	32
PANSONIC (Япония.)	WV-BL730	FIT CCD	0,0003	Electronic sensitivity enhancer	32
ЭВС (Россия)	VNC-703	EXWAVEHAD	0,0002	Ночной режим 1	14
ЭВС (Россия)	VNC=702	EXWAVEHAD	0,00004	Ночной режим 1 + 2	102

Примечание. Для удобства сравнения чувствительности всех камер указаны на объекте при использовании светосильного асферического объектива с относительным отверстием F0,8.

Выводы.

- Современные CCD камеры с режимом электронного увеличения чувствительности практически вытеснили с рынка дорогостоящие камеры с ЭОП поколений 1, 2 и 2+ , обеспечив высокую чувствительность в ночных условиях и надежность при разумной цене.

- Слабое свечение транзисторов выходного устройства матрицы CCD ограничивает чувствительность лучших телевизионных камер с ночными режимами. Необходима работа фирм-изготовителей CCD в части ослабления этого свечения.
- В ближайшие годы можно ждать дальнейшего роста чувствительности CCD камер за счет снижения шума считывания выходных устройств и увеличения коэффициента суммирования в камерах с электронным увеличением чувствительности.

Литература.

- *Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда/ Пер. с англ. Под ред. В.В. Поспелова, Р.А. Суриса. - М., Мир, 1978 - 327 с.*
- *J.R. Janesick, T. Elliott, S Collins. "Scientific charge-coupled devices.", Optical Engineering, August 1987, Vol. 28, No. 8, p. 692 - 714.*
- *Куликов А.Н. Оценка диапазонов перестройки параметров разложения в телекамере на матрице ПЗС, "Техника средств связи", сер. "Техника телевидения", 1985, Вып.4, с. 47 - 54.*
- *Каталог фирмы Norbain Security "CCTV WAREHOUSE", oct., 1999 , стр. 37.*

Рекламные каталоги фирм SONY, PANASONIC, WATEC, TURN, IKEGAMI, PHILIPS, JAI, LILIN, ЭВС за 1999 и 2000 г.

Автор:Александр Куликов,разработчик телевизионных камер