

А.Н. Куликов.

РЕАЛЬНАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ

Проектируя охранную телевизионную систему, обычно принимают в расчет заявленную в паспорте разрешающую способность телевизионной камеры. Исходя из этого, определяют зоны наблюдения и места установки телевизионных камер, вычисляют углы поля зрения и выбирают объективы. Затем закупают мультиплексоры, видеоманитофоны и другие устройства. Монтажники прокладывают кабели, устанавливают телекамеры и аппаратуру, и, наконец, система включается. С первого взгляда, все работает нормально, на мониторах видны изображения помещений и территорий объекта. Но при первом же инциденте выясняется, что лицо нарушителя невозможно различить. Не виден номер въезжающего автомобиля, а иногда невозможно даже различить его марку. В темное время суток дела обстоят еще хуже: изображения деталей размыты, движущиеся объекты смазаны. В результате, телевизионная система, вместо полноценного наблюдения, предоставляет службе охраны функции, близкие к возможностям обычных охранных датчиков. Происходит это из-за того, что при проектировании системы не учитываются реальная разрешающая способность телевизионных камер, и ее зависимость от освещенности, глубина резкости, а также потери разрешающей способности в кабельной сети, мультиплексорах, видеоманитофонах и других устройствах. В статье рассматриваются факторы, влияющие на разрешающую способность телевизионной камеры, работающей в составе охранной телевизионной системы.

Разрешающая способность телевизионной камеры и число элементов фотоприемника.

Параметр “разрешающая способность” пришел в телевидение из оптики. Первоначально, за предел разрешающей способности, согласно критерию Рэля, понималось расстояние между двумя точками, при котором центр одного пятна совпадает с серединой первого темного дифракционного кольца второго пятна (рис.1)

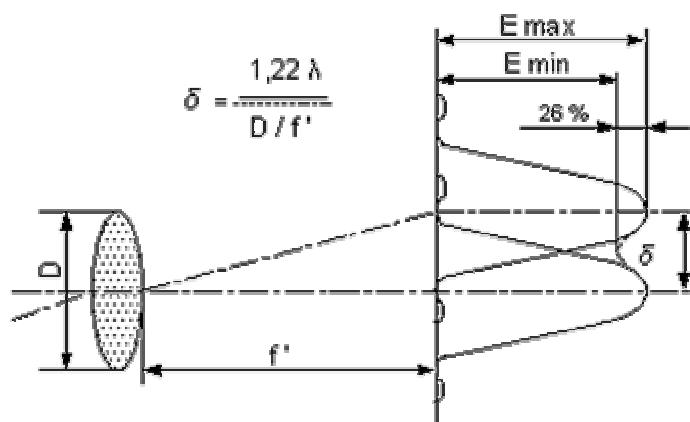
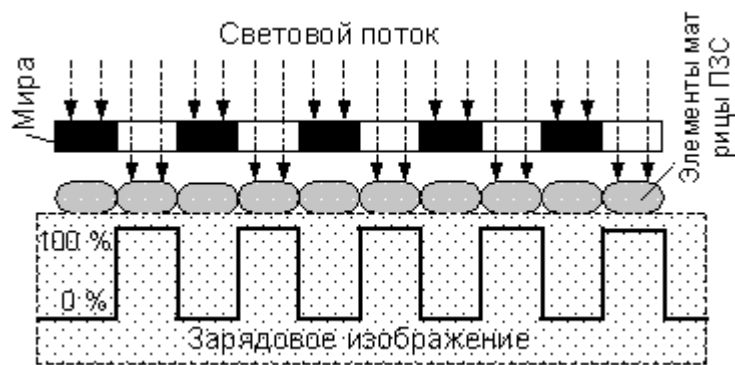


Рис. 1 Разрешающая способность оптической системы.

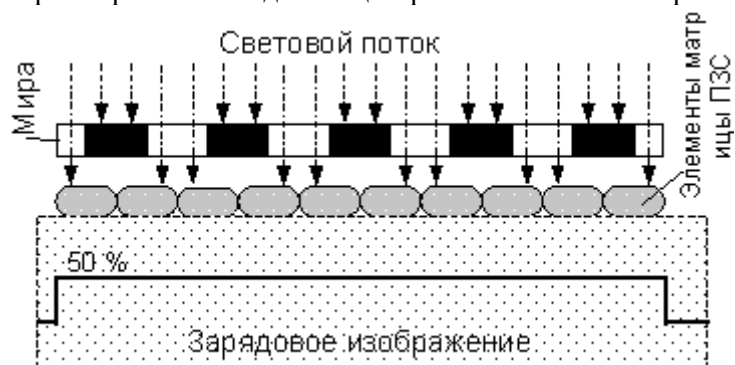
E_{max} , E_{min} – освещенности светлого и темного дифракционных колец соответственно,
 D – диаметр входного зрачка,
 f' – заднее фокусное расстояние,
 δ – линейный предел разрешения,
 λ – длина волны света.

При этом, относительная разность освещенностей в двух рядом расположенных точках (глубина модуляции сигнала на частоте максимального разрешения) примерно равна 26% от максимальной освещенности [1]. С появлением дискретных фотоприемников (матрицы ПЗС) понятие оптической разрешающей способности стало неточным, из-за появления эффекта наложения пространственных частот штрихов миры и фоточувствительных элементов матрицы. Тем не менее, параметр **разрешающая способность** используется в рекламных проспектах на телевизионные камеры.

Нужно отметить, что разрешающая способность дискретного фотоприемника зависит от положения штрихов испытательной миры относительно сетки элементов фоточувствительной матрицы.



а) центры штрихов совпадают с центрами элементов изображения,



б) центры штрихов сдвинуты на половину размера элемента.

Рис.2 Иллюстрация изменения максимальной разрешающей способности дискретного фотоприемника при сдвиге его относительно изображения миры на $1/2$ размера элемента.

Видно (рис.2), что в случае, когда число штрихов миры равно числу элементов фотоприемника по измеряемой координате, может быть два крайних значения разрешающей способности. Если штрихи миры попадут точно по центру элементов матрицы ПЗС, то разрешение на выходе камеры будет максимальным, и на видеомониторе будет видно тонкую решетку. Если сместить миру на половину штриха, то максимумы и минимумы изображения штрихов попадут посередине между элементами ПЗС и в каждом элементе будет половинный сигнал (средний между черным и белым) и на экране монитора будет только ровный серый фон. При числе штрихов горизонтальной миры меньше или больше числа элементов матрицы, также будет наблюдаться ровный серый фон при смещении положения миры, но уже не на всем изображении, а в виде отдельных вертикальных столбиков (муаров). При уменьшении числа штрихов миры, видимость муаров будет уменьшаться, однако, даже при половинном их числе, относительно числа элементов ПЗС, они будут еще достаточно хорошо видны (рис.3).



Рис.3 Иллюстрация изображения муаров вертикального клина тест-таблицы, наблюдаемой телевизионной камерой на матрице ПЗС.

Внизу – осциллограмма строки в центре горизонтальной миры 450 – 600 телевизионных линий. Муары выражаются в низкочастотной модуляции осциллограммы.

Для того, чтобы согласовать параметр разрешающая способность с числом элементов матрицы ПЗС по данной координате, было предложено для определения разрешающей способности, умножить число элементов на коэффициент 0,75.

В настоящее время в охранных телевизионных камерах наиболее распространены матрицы ПЗС двух типов: стандартного и высокого разрешения, с числом элементов по строке 500 и 750 соответственно (В настоящее время в новейших телевизионных камерах для охранных систем начинают использовать “мегапиксельные” матрицы ПЗС, аналогичные матрицам цифровых фотоаппаратов. Разрешающая способность таких камер с числом элементов по строке около 1600 превышает 1000 телевизионных линий.). Умножая на 0,75, мы получим примерно 380 и 560 телевизионных линий для телекамер стандартного и высокого разрешения. Первое время, производители телекамер указывали в паспортах именно эти значения. К сожалению, некоторые фирмы в рекламных целях пытаются увеличить общепринятый коэффициент и указывают разрешающие способности для своих камер 420 и 600 линий, хотя в них используются такие же матрицы ПЗС с числом элементов 500 и 750 соответственно.

Недокументированный параметр телекамер – глубина модуляции сигнала на частоте максимального разрешения.

Сравнивая между собой камеры, выполненные на одних и тех же матрицах ПЗС можно видеть, что, несмотря на заявленные одинаковые разрешающие способности, четкость формируемых ими изображений различна. Некоторые камеры, даже выполненные на матрицах высокого разрешения, имеют нечеткое, “мутное” изображение, другие камеры, наоборот, приятно удивляют филигранной прорисовкой мелких деталей. Тем не менее, формально, разрешающая способность камеры, формирующей нечеткое изображение, соответствует значению, указанному в паспорте. Если внимательно взглянуть в изображение вертикального клина тест-таблицы, формируемого этой камерой, то с трудом, но все-таки, можно увидеть, заявленные в паспорте 560 линий. В “четких” же камерах, эти линии видны без труда, они хорошо “прорисовываются” и имеют высокий контраст. Почему такая разница четкости в камерах на одних и тех же матрицах ПЗС? Дело в том, что изображение на матрицу ПЗС проецируется объективами, характеристики которых близки к предельным. Это обусловлено очень малыми размерами фоточувствительных ячеек современных матриц. Например, размер элемента матрицы ПЗС формата 1/3 дюйма, высокого разрешения ICX-209AL фирмы SONY составляет 4,85 x 4,65 мкм, что всего лишь в несколько раз превышает дифракционный предел на длинноволновой границе спектрального диапазона матрицы (рис.1). В дополнении к этому, хроматические aberrации и неточности изготовления линз приводят к тому, что кружок рассеяния современных объективов нередко превышает

геометрический размер элемента матрицы. Это означает, что частотно-контрастная характеристика телевизионной камеры будет иметь заметный спад, начиная с половинной разрешающей способности матрицы ПЗС, а на частоте предельного разрешения контраст нередко не превышает 10% по сравнению с контрастом изображения в крупной детали (рис.4).

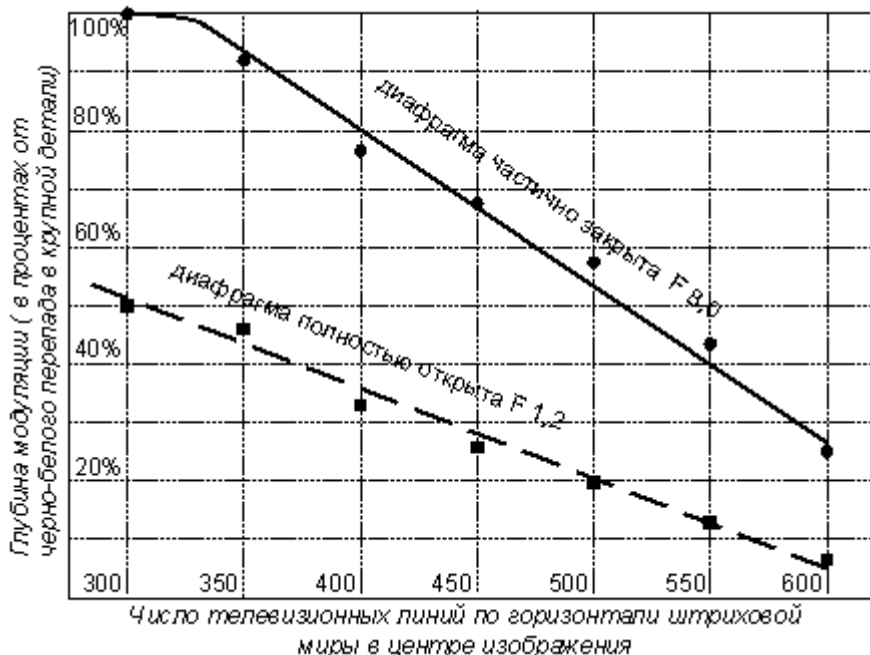
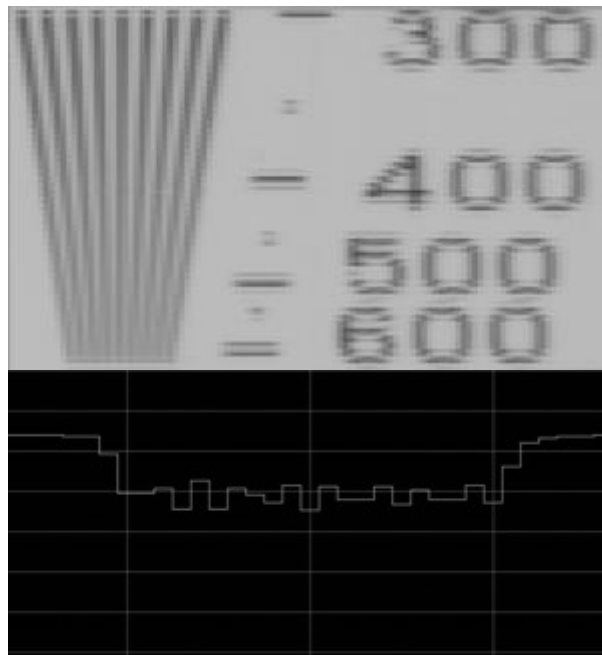
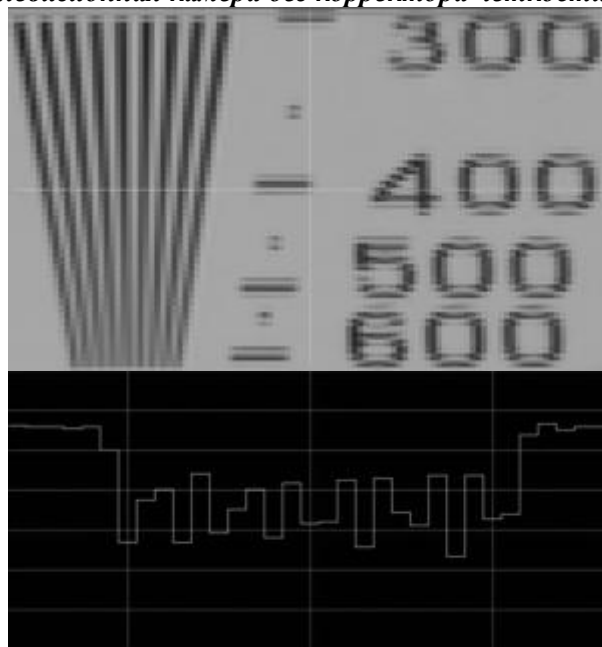


Рис.4 Частотно-контрастная характеристика телевизионной камеры высокого разрешения при выключенном корректоре четкости.

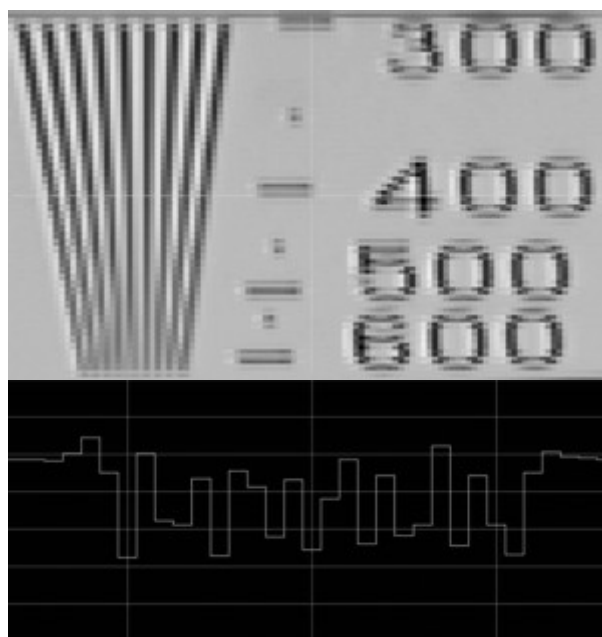
Если в телевизионной камере не принять мер к коррекции частотно-контрастной характеристики объектива, то в результате формируемое изображение будет нечетким, что нередко можно наблюдать в дешевых камерах восточной сборки. В камерах более высокого класса устанавливают специальные корректоры четкости, компенсирующие потери в объективе. Корректоры бывают разные. В простом случае (например, камера WAT-902H фирмы WATEC) устанавливают асимметричный корректор, подчеркивающий первую производную сигнала. Лучшие результаты дают симметричные адаптивные корректоры четкости, учитывающие вторую производную сигнала, степень коррекции, которых зависит от освещенности изображения (камера VNC-742 фирмы ЭВС). Для оценки реальной четкости изображения используется параметр “глубина модуляции сигнала на частоте максимального разрешения”, равный отношению размахов сигналов от мир с числом штрихов, равным максимальному разрешению, и с минимальным числом штрихов (крупная деталь изображения). Видно (рис 5), что амплитуда сигнала на частоте 550 линий в камере с симметричным корректором четкости заметно превосходит эти значения в камерах с корректором по первой производной и тем более, в камере без корректора четкости.



a) – телевизионная камера без корректора четкости CV-300



b) – телевизионная камера с несимметричным корректором четкости WAT-902H



с) – телевизионная камера с адаптивным, симметричным корректором четкости VNC-742.
 Рис.5 Изображения (вверху) и осциллограммы строки 550 телевизионных линий (внизу) вертикального клина, полученные с помощью трех различных телевизионных камер высокого разрешения, при установленных в них одинаковых объективах Т0412F1СS при значении диафрагмы $F 8,0$.

К сожалению, параметр глубина модуляции (в некоторых источниках называемый “амплитуда частотно-контрастной характеристики на частоте максимального разрешения”) не приводится в рекламных проспектах и паспортах на телевизионные камеры. Поэтому, реальную разрешающую способность телевизионной камеры можно оценить, только наблюдая формируемое камерой изображение в процессе ее испытания.

Потери разрешающей способности и глубины резкости в объективах с автоматической диафрагмой.

Для расширения диапазона рабочих освещенностей телевизионных камер в них устанавливают объективы с автоматической регулировкой диафрагмы (АРД). При использовании таких объективов, можно получить диапазон рабочих освещенностей от 0,01 люкс до 100000 люкс и даже шире, то есть, обеспечить работу камеры и днем и ночью [2]. Особенно популярны в настоящее время, так называемые “асферические” объективы с минимальным относительным отверстием, достигающим 0,75. Однако, с точки зрения разрешающей способности, при использовании АРД объективов возникает ряд неприятных моментов:

- Глубина модуляции сигнала на высоких пространственных частотах в АРД объективах зависит от значения диафрагмы, и при полностью открытой диафрагме может уменьшаться в 10 и более раз.
- Глубина резкости (диапазон расстояний, в пределах которых обеспечивается заданная четкость изображения) еще в большей степени зависит от величины диафрагмы, и при полностью открытой диафрагме минимальна.
- Светорассеяние в объективе [2] также зависит от значения диафрагмы и становится максимальным при полностью открытой диафрагме.

Следовательно, разрешающая способность и контраст изображения телекамеры с АРД объективом значительно ухудшаются в вечернее, и особенно ночное время, когда диафрагма объектива полностью открыта (рис.б).

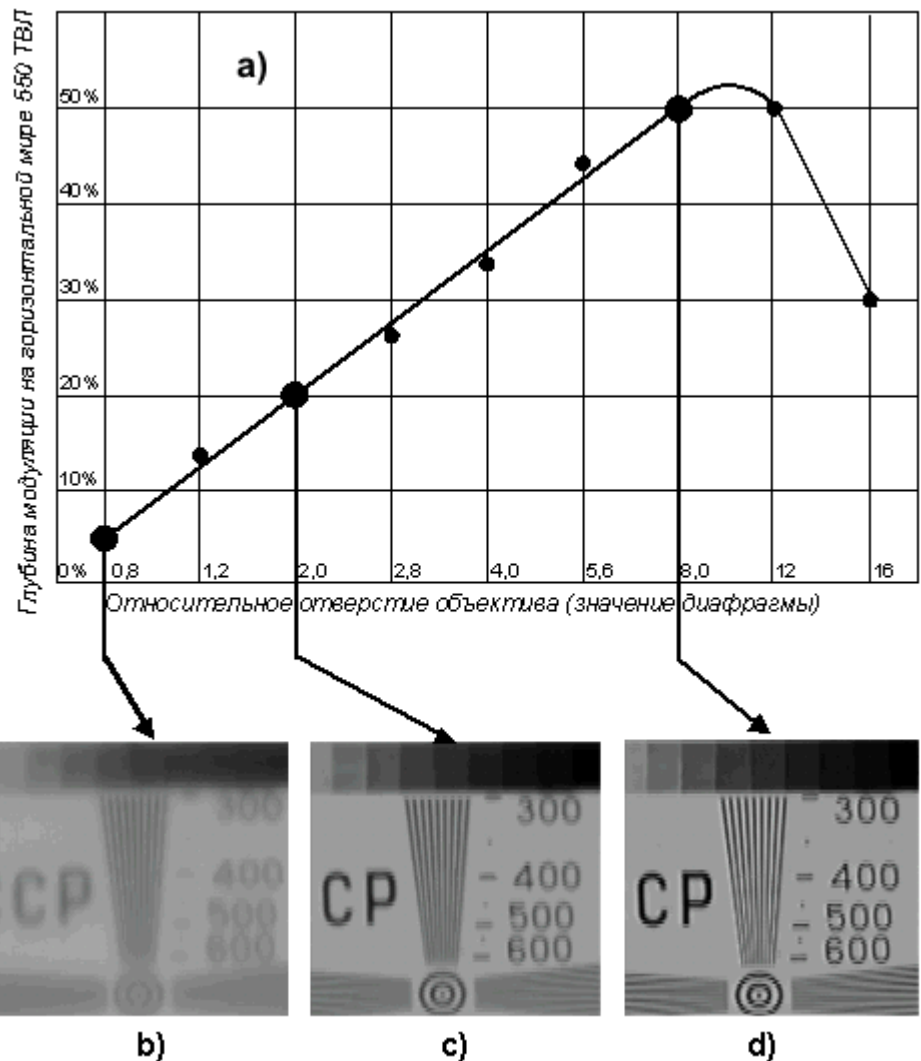


Рис. 6. Зависимость глубины модуляции сигнала (амплитуды частотно-контрастной характеристики) на горизонтальной mire 550 ТВЛ от относительного отверстия объектива (значения диафрагмы) в телевизионной камере высокого разрешения, при установленном объективе *TO412FICS* фирмы *Computar*.

a) Значение при F 0,8 получено при установленном асферическом объективе HG0608AFCS-HSP этой же фирмы.

Изображения центральной части тест-таблицы, формируемые телевизионной камерой высокого разрешения при установленном объективе с относительными отверстиями:

b) F 0,8

c) F 2,0

d) F 8,0

Помимо общего ухудшения четкости, ночью происходит и дополнительная расфокусировка разноудаленных объектов, изображения, которые днем были четко сфокусированными. Расфокусировка происходит не только из-за уменьшения глубины резкости при полностью открытой диафрагме, но и из-за изменения спектрального состава источника освещения (Солнце или искусственное освещение). Особенно сильная расфокусировка происходит ночью при использовании ИК прожекторов. Из этого следуют два правила, которые нужно соблюдать при установке камер с АРД объективами:

- Фокусировать камеры с АРД объективами нужно обязательно в темное время суток, когда диафрагма объектива полностью открыта (глубина резкости минимальна), и включено соответствующее искусственное освещение.
- В камерах с АРД объективами обязательно нужно отключать встроенную систему электронного затвора, иначе, диафрагма объектива будет полностью открыта не только

ночью, но и днем с вытекающими из этого потерями разрешающей способности и глубины резкости.

В ночное время, при недостаточном искусственном освещении, основной причиной потери разрешающей способности камеры будет влияние собственного флуктуационного шума телевизионной камеры [3]. Разрешающая способность камеры начинает резко ухудшаться при уменьшении отношения сигнал/шум. При уменьшении отношения сигнал/шум с 40 дБ (100 раз) до значения 20 дБ (10 раз), при котором обычно указывается пороговая чувствительность телекамеры, разрешающая способность снижается с 500 до 100 телевизионных линий (рис.7).

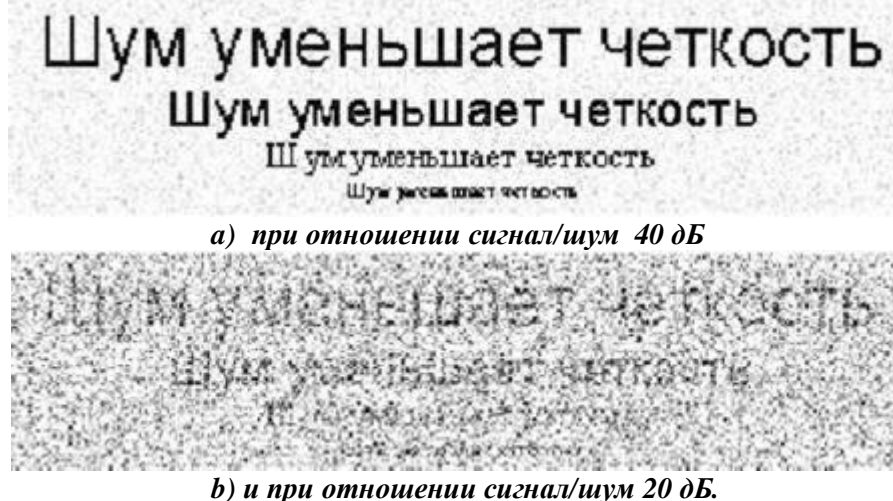


Рис. 7. Иллюстрация уменьшения разрешающей способности при наблюдении телекамерой текста с различными величинами шрифта

Особый случай потери разрешающей способности происходит в телекамерах с длиннофокусными объективами (25 мм и более), предназначенными для наблюдения удаленных или протяженных объектов. Эти потери обусловлены действием нескольких факторов. Во-первых, кружок рассеяния реального объектива возрастает с увеличением фокусного расстояния, начиная примерно с 16 мм (для камер с форматом матриц ПЗС 1/3 дюйма и менее). Во-вторых, при наблюдении на больших расстояниях, оказывает заметное влияние турбулентность воздуха, особенно если недалеко от камеры вдоль оси ее зрения имеются открытые окна теплых помещений, трубы отопительной системы, работающие моторы механизмов или другие теплые объекты. В результате возникновения сильных потоков воздуха, происходит размывание и дрожание мелких деталей изображения, что приводит к дополнительной потере разрешающей способности. Кроме того, при наблюдении на дальних дистанциях, даже незначительные атмосферные осадки и туман вызывают заметное светорассеяние и потерю четкости и контраста изображения.

Еще одной причиной ухудшения разрешающей способности становится естественное загрязнение стекол объективов и иллюминаторов наружных телекамер в процессе работы. Одновременно с потерей разрешающей способности, в этом случае возможно появление пятен и полос на изображении.

Потери разрешающей способности в кабельной сети.

Расстояния от камер до пультовых, особенно на больших объектах, могут достигать многих сотен метров и даже километров. В качестве соединительных кабелей обычно используют коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 75 Ом, либо телефонные витые пары. Помимо общего уменьшения уровня сигнала в кабелях происходит и дополнительное снижение уровня высокочастотных составляющих. В результате, разрешающая способность системы камера-кабель дополнительно уменьшается. Величина потерь разрешающей способности зависит от погонной емкости коаксиального кабеля, которая в первом приближении обратно-пропорционально его диаметру. В кабелях диаметром 8 мм потери разрешающей способности уже заметны при длинах более 100 метров и становятся недопустимыми при длинах выше 300 метров. Для компенсации потерь необходимо устанавливать специальные усилители-корректоры сигнала, степень коррекции высокочастотных составляющих сигнала в которых должна подстраиваться под длину кабеля. При длинах кабеля до 600 метров, возможно использование одного усилителя корректора на приемном конце кабеля. При длинах 600 – 1200 метров, для компенсации потери разрешающей

способности необходимы два усилителя корректора на приемном и передающем концах. При более длинных линиях необходимо устанавливать дополнительные усилители корректоры через определенные интервалы. Указанные ориентировочные расстояния сильно зависят от типа и в первую очередь диаметра кабеля. Например, при использовании магистральных кабелей, диаметром около 20 мм, можно устанавливать корректоры через интервалы более 2 километров.

Потери разрешающей способности в мультиплексах, видеомагнитофонах, платах ввода изображения в компьютер и видеомониторах.

В реальных телевизионных системах заметные потери разрешающей способности происходят из-за неправильного согласования и ограничения полосы частот в различных устройствах телевизионной системы. Особенно большие потери происходят в устройствах консервации изображений (видеомагнитофоны и цифровые видеорегистраторы), и видеомультиплексах. В настоящее время аналоговые системы все более вытесняются цифровыми. Как правило, разрешающая способность цифровых систем записи превосходит этот параметр у аналоговых видеомагнитофонов, особенно устаревшего формата VHS. Но, и здесь, нередко, рекламные заявления далеки от действительности. Иногда, в рекламных материалах замалчиваются некоторые недостаточно хорошие характеристики, в других случаях заявляются высокие параметры, но без указания, что они достигаются не во всех режимах. Например, проверка ряда современных мультиплексов (табл.1) показала, что большинство из них производит запись мультиплексированного сигнала “полями”, а не “кадрами”, то есть, без черезстрочной развертки. Но, в паспортах на них не указывается, что разрешающая способность по вертикали при этом ухудшается в 2 раза! В ряде изделий указывается разрешение в аналого-цифровом преобразователе до 1024 выборок на строку. Это соответствует горизонтальной разрешающей способности по видеосигналу более 700 телевизионных линий. Однако, после включения приборов выясняется, что столь высокое разрешение получается лишь на дополнительных аналоговых выходах, в то время как на основных выходах (ради которых и покупается мультиплексор) разрешающая способность не превышает 400 -500 линий. В развивающемся сегменте мультиплексов и цифровых видеомагнитофонов много “узких” мест, которые приводят к потере разрешающей способности. Например, нередко, в черно-белом режиме работы не предусматривается отключение режекторного фильтра подавления цветоразностных поднесущих (около 4 МГц для системы PAL). Из-за этого фильтра, глубина модуляции сигнала, начиная с 350 линий, снижается в 10 и более раз. В паспортах на эти устройства заявлено разрешение 500 телевизионных линий, но изображения линий в области 350 -450 имеют столь слабый контраст, что их почти не видно, даже при установленной на максимум ручке контрастности видеомонитора.

Таблица 1 Разрешающая способность и современных мультиплексов

Фирма изготовитель	Тип мультиплексора	Число выборок АЦП строке	Разрешающая способность в магнитофонном выходе (ТВЛ)	Режекторный на фильтр диапазоне 350 - 450 ТВЛ)	Способ записи сигнала
BAXALL	ZMXS/16MD	720	500	Не отключается	полями
ROBOT	MV16i	640	320	Не отключается	полями
Dedicated Micros	Sprite DX16	1024	530	Выключен	полями
GYYR	DSP16x	750	550	Отключается	полями
HITRON	HBX16C	640	320	Не отключается	полями
KALATEL	CALIBUR CBR16MDx	750	550	Отключается	полями
ATV (цветной)	DPX16	720	540	Не отключается	Кадрами

При определении разрешающей способности мультиплексов в первую очередь нужно учитывать число выборок АЦП, приходящееся на строку изображения. Из-за того, что частота дискретизации в мультиплексе не совпадает с частотой следования элементов, в ПЗС камере, происходит дополнительное наложение частот дискретизации (возникают муары аналогичные рис.3). В результате, разрешающая способность системы с мультиплексором получается переменной. Появляются биения разрешающей способности по строке. При вычислении

среднестатистической разрешающей способности мультиплексоров также как и в ПЗС камерах необходимо дополнительное умножение числа выборок по строке на 0,75.

Все приведенные выше замечания справедливы не только для мультиплексоров, но и для систем цифровой записи изображений (платы ввода телевизионного сигнала в компьютер, системы типа: Digieye, VidGuard и т.п.). При использовании алгоритмов компрессированной записи видеосигнала (JPEG, Wavelet, MPEG-2, MPEG-4) в этих устройствах происходит дополнительная, необратимая потеря не только разрешающей способности, но и ряда малоконтрастных, мелких объектов, которые игнорируются при кодировании изображения, особенно при больших коэффициентах сжатия.

Отдельно следует сказать о разрешающей способности видеомониторов, которая в первую очередь ограничивается размерами зерен люминофора в кинескопе. Известно, что чем больше размер диагонали кинескопа – тем выше разрешающая способность. Тем не менее, и в этой области активно работает реклама, выдавая желаемое за действительность. Часто можно встретить заявления о разрешающей способности 600 и даже 700 телевизионных линий в малогабаритных видеомониторах с диагональю размерами 12 дюймов. И действительно, можно увидеть эти линии. Но какой ценой они достигаются. Во-первых, контраст изображения мира в 600 или 700 линий не превышает 10 %, то есть они еле видны. Во-вторых, 30% изображения (левый и правый края) отсутствуют, так как выходят за пределы экрана. В таких мониторах изображение специально увеличено, чтобы ценой потери его части, достигнуть заявленную в паспорте разрешающую способность. Реально, мониторы с размерами диагонали 12 – 14 дюймов обеспечивают надежное разрешение не более 400 - 450 линий, то есть их можно использовать только с камерами стандартного разрешения. Для полноценного просмотра камер высокого разрешения, следует использовать мониторы с размерами диагонали экрана не менее 17 дюймов. Нужно отметить, что цветные видеомониторы обеспечивают возможность наблюдения изображений с разрешающей способностью не более 350 - 400 линий, поэтому их нельзя применять с камерами высокого разрешения. Лишь специальные цветные видеомониторы, в основном большого размера, с возможностями компьютерного VGA режима, позволяют работать при разрешениях до 500 телевизионных линий.

В настоящее время все шире используют для наблюдения компьютерные мониторы, при этом сигнал с камеры поступает на плату ввода телевизионного изображения в компьютере. К сожалению, компьютерные мониторы, обладая высокой разрешающей способностью, имеют в 5 – 10 раз меньший контраст изображения по сравнению с обычными мониторами, что ограничивает их возможности при наблюдении днем, а также вызывает повышенную утомляемость у операторов.

Выводы.

1. Разрешающую способность телевизионных ПЗС камер принято определять числом элементов фотоприемника по соответствующим координатам, умноженным на коэффициент 0,75.
2. Реальная разрешающая способность камеры в телевизионной системе меньше расчетной по следующим причинам:
 - a. Из-за потери разрешающей способности в объективах. Особенно заметна потеря четкости в “асферических” АРД объективах при полностью открытой диафрагме, когда глубина модуляции сигнала на частоте разрешения и глубина резкости уменьшаются в 10 и более раз. Максимальные потери возникают на краях изображения. Потери четкости возникают также из-за дрожания воздушных потоков перед камерой и от естественного загрязнения стекол объективов.
 - b. Из-за маскирующего влияния шума в темное время суток, а также из-за изменение фокусировки объектива при использовании искусственного освещения со спектральной характеристикой, отличающейся от естественного.
 - c. Из-за завала высоких частот видеосигнала в соединительных кабелях.
 - d. Из-за потери разрешающей способности в других блоках телевизионной системы, в первую очередь в мультиплексорах, видеомагнитофонах и цифровых видеорегистраторах.
 - e. Из-за потери разрешающей способности в малогабаритных видеомониторах, обусловленной конечными размерами зерен люминофора кинескопов.

3. Суммарное ухудшение разрешающей способности телевизионных камер в охранных телевизионных системах может уменьшаться по сравнению с расчетным до 2-х раз днем до 3 – 5 раз и более, ночью.
4. При построении охранных систем необходимо учитывать возможные потери разрешающей способности телевизионных камер и принимать дополнительные меры по усилению охраны объекта. Способ повышения надежности системы состоит в установке дополнительных телевизионных камер и охранных датчиков в наиболее сложных местах наблюдения, а также в обеспечении более интенсивного, а главное более распределенного и равномерного искусственного освещения в ночное время.

Список литературы.

1. Оптические головки передающих телевизионных камер цветного телевидения: Справочник/ Н.И. Валов, О.Н. Василевский, А.Н. Великожон и др. под общ. Ред. О.Н. Василевского. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988 – 109 с., ил.
2. Куликов А.Н. Телевизионное наблюдение при ярком солнечном свете., “Специальная техника”, №1, 2001 г., стр. 11 – 20.
3. Космическое телевидение. Изд. второе, дополненное, М., “Связь”, 1973.

