

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.398

**Оценка возможности использования существующих
объективов для проецирования видеоизображения
на фоторегистрирующие приборы**

Д. И. Климов, В. А. Благодырев¹

¹*к. т. н.*

АО «Российские космические системы»

e-mail: tm016@rniikp.ru

Аннотация. Оценивается возможность использования существующих объективов при проецировании видеоизображения (ВИ) на фоторегистрирующие приборы путем анализа моделей идеального и реального объективов с оценкой быстродействия считывания спроецированного изображения на фоточувствительную зону прибора с зарядовой связью (ПЗС). Приведены основные понятия и определения, требующиеся для оценки ВИ на ПЗС. Рассмотрены и проанализированы различные виды ПЗС. Проведен анализ существующих ПЗС с виртуальной фазой (ВФПЗС) и инфракрасных ПЗС (ИК ПЗС) отечественного производства (ОП).

Определено пороговое значение потока излучения в зависимости от длины волны, диаметр отверстия объективов и фокусные расстояния, а также оценено быстродействие проецирования ВИ для ПЗС ОП ISD017 как для модели идеального объектива, так и для модели реального объектива.

Ключевые слова: видеоизображение, объектив, прибор с зарядовой связью, инфракрасный ПЗС, виртуальная фаза

**Estimation of Possibility of Use of Objectives
at Video Image Displaying on Photo Registering Devices**

D. I. Klimov, V. A. Blagodyryov

¹*candidate of engineering science*

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: tm016@rniikp.ru

Abstract. The estimation of possibility of use of objectives is considered at video image displaying on photoregistering devices by the analysis of models of ideal and real objectives with an estimation of speed of displaying of the image on a photosensitive zone of charge-coupled devices (CCD). The basic concepts and the definitions which are required for estimation of video image on charge-coupled devices are resulted. Various kinds of CCD are considered and analyzed. The analysis of existing CCD's with a virtual phase and infra-red CCD's of domestic production is carried out.

Threshold value of a stream of radiation depending on length of a wave, diameter of an aperture of objectives and focal lengths is defined, and also speed of displaying of video image for a domestic production CCD ISD017 is estimated both at model of an ideal objective, and at model of a real objective.

Key words: video image, objective lens, charge-coupled devices (CCD), infra-red CCD, virtual phase

Структуры ПЗС

Основным элементом для преобразования видеоинформации в электромагнитные колебания являются приборы с зарядовой связью (ПЗС), представляющие собой линейки или матрицы близко расположенных друг к другу МОП-конденсаторов.

ПЗС-структуры — это интегральные полупроводниковые приборы, в основе работы которых лежит принцип накопления, передачи и хранения локализованного зарядового пакета в потенциальных ямах, образуемых в полупроводнике под действием внешнего электрического поля.

Ввод и вывод информационного сигнала, то есть динамической неоднородности в ПЗС, осуществляется транзисторной структурой, в которой формируется зарядовый пакет.

Упрощенно прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных **МОП-конденсаторов** (электрод, отделенный от кремния слоем диэлектрика или окисной пленкой). С физической точки зрения ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом.

ПЗС с виртуальной фазой

Один из наиболее эффективных способов расширения спектрального диапазона измерительного прибора — использование **ПЗС с виртуальной фазой**. Суть этого способа в том, что один из электродов обычного ПЗС заменяется на мелкий замкнутый на стоп-каналы слой р-типа непосредственно на поверхности кремния (виртуальный затвор). Доза зарядов канала под виртуальным затвором делается больше, чем под тактовыми затворами. Структура с виртуальным затвором, замкнутым на подложку, с точки зрения канала переноса не отличается от состояния фиксации в обычном ПЗС со скрытым каналом.

По сравнению с обычными ПЗС, в ней около половины площади ячейки свободны от поликремния, отсюда высокая чувствительность в синей и УФ областях спектра (теоретически даже и до мягкого рентгена).

В отличие от обычной ПЗС (с электродами из поликристаллического кремния, рис. 1), ПЗС с виртуальной фазой (рис. 2) обладают высокой квантовой эффективностью и чувствительностью в большем диапазоне длин волн (240–1000 нм), как показано на рис. 3 [2].

Основные области применения ВФПЗС — системы астроориентации и астронавигации искусственных спутников Земли и космических станций, наземная и космическая астрономия, экспериментальное физическое оборудование.

Наиболее ярким примером ВФПЗС отечественного производства являются ПЗС [1], выпускаемые ГУП «НПП “Электрон-Оптроник”» с характеристиками, представленными в табл. 1. Здесь HS — скоростной (двухкаскадный) выходной узел, LN — малозумящий (однокаскадный) выходной узел.

Способы реализации и модели ИК ПЗС

Матричный ИК ПЗС представляет собой монолитный прибор со строчно-кадровым переносом и объемным каналом. Его фоточувствительная секция выполнена на основе диодов с барьером Шоттки из силицида платины. Информация с фоточувствительного массива считывается с помощью вертикальных и горизонтального ПЗС-регистров с четырех- или трехфазной организацией.

Существует разработка заказных ПЗС-модулей, заключающаяся в основном в модификации матричных и линейных фоточувствительных ПЗС (ФПЗС), выпускаемых ведущими мировыми производителями в соответствии с техническими требованиями заказчика, с монтажом неохлаждаемых ФПЗС (как в виде чипов, так и в корпусе изготовителя) на термоэлектрические холодильники (Пельтье) в вакуумно-плотные газонаполненные корпуса собственной разработки и производства.

Примеры моделей ИК ПЗС отечественного производства — ПЗС [1], выпускаемые ГУП «НПП “Электрон-Оптроник”» с характеристиками, которые представлены в табл. 2.

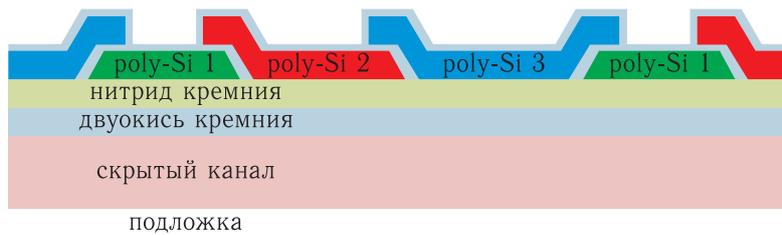


Рис. 1. Структура ПЗС

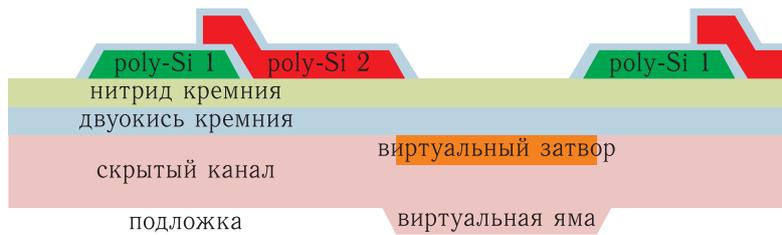


Рис. 2. Структура ВФПЗС

Таблица 1. Характеристики моделей ВФПЗС ОП

Модель ВФПЗС	ISD017	ISD029	ISD048	ISD049	ISD075
Формат (число элементов)	1040 × 1160	512 × 512	386 × 290	578 × 578	1225 × 1300
Архитектура	SFF	FF	FT	FT	SFF
Площадь пикселя, мкм ²	16 × 16	16 × 16	22 × 22	22 × 22	14 × 14
Число считывающих регистров и типы выходов	2LN, 2HS	1LN, 1HS	1HS	1HS	2LN, 2HS
Фоточувствительная площадь, мм ²	16,6 × 18,6	8,2 × 8,2	8,5 × 6,4	12,7 × 12,7	18,8 × 17,2
Заряд насыщения, тыс. эл.	200	130	300	300	130
Шум считывания двухкаскадного выходного устройства (HS) при частоте 1 МГц, число эл.	10–12	10–15	15	15	10
Шум считывания однокаскадного выходного устройства (LN), число эл.	7	6	–	–	6
Темновой сигнал при –35 °С, не более эл/яч/с	7				
Неоднородность чувствительности, не более %	3				

Таблица 2. Характеристики моделей ИК ПЗС ОП

Параметр	Тип ИК ПЗС		
	ISD200M	ISD090	ISD091
Формат	256 × 290	480 × 320	320 × 240
Площадь пикселя, мкм ²	50 × 33	28 × 28	40 × 40
Спектральный диапазон, мкм	1,3–5,3		
Зарядовая емкость, (число эл.)	7 × 10 ⁵	10 ⁶	1,2 × 10 ⁶

ИК-системы диапазона 8–14 мкм

Предназначены для детального рассмотрения термообстановки в области температур от +80 до –70 °С. Для получения видеоизображения в данной области длин волн требуется термоохлаждение кристалла ПЗС азотным криостатом или жидким азотом. Применение данных систем несет за собой дополнительные массогабаритные ограничения и сложность реализации целевых модулей, а также использование специальных объективов, выполненных из германия.



Рис. 3. Зависимость квантовой чувствительности ПЗС и ВФПЗС

Разработкой подобных объективов, например, занимается фирма Optics-M, выпускающая объективы под штучные заказы или малыми сериями.

ИК-объективы для ИК-систем диапазона 8–14 мкм состоят из двух асферических германиевых линз (фокусное расстояние 50 и 100 мм) и из двух асферических и одной сферической германиевой линзы (фокусное расстояние 18 мм). Перефокусировка осуществляется вручную. Объективы по резьбе прикручиваются непосредственно к кожуху камеры, что допускает замену фокусного расстояния простым вкручиванием другого объектива.

В табл. 3 приведены характеристики описанных выше объективов.

Таблица 3. Характеристики объективов с германиевыми линзами

Технические характеристики				
Фокусное расстояние, мм	18	50	100	18–100
Размер изображения, мм	16			
Зона обзора, °	50	18	9	50–9
Пропускание, %	88	91	88	70
Задний рабочий отрезок, мм	30	33	33	35

Разбиение спектральных составляющих на поддиапазоны, в соответствии с реальными моделями ПЗС и объективами

Рассматриваемый диапазон длин волн (0,3–15 мкм) разобьем на поддиапазоны, в соответствии с реальными моделями ПЗС и объективами, как представлено в табл. 4.

В соответствии с распределением чувствительности ПЗС по диапазонам длин волн, в каждой из точек установки видеорегастратора будут установлены по две ВК в защитном термокожухе: одна с ВФПЗС, другая — с ИК ПЗС. Обе камеры настроены на одну и ту же область обзора и пересылают на наземную станцию потоки информации, получаемой с двух камер одновременно. Так как, согласно табл. 1 и 2, форматы изображения ВФПЗС шире, чем ИК ПЗС, то перед ВК с ВФПЗС необходимо устанавливать объектив с зоной обзора примерно в 1,2–2 раза меньше, чем у объективов, устанавливаемых перед ВК с ИК ПЗС.

Пороговое значение чувствительности ПЗС

Ограничение чувствительности ПЗС определяется уровнем шумов [2], который, как видно из табл. 1, приближенно равен сумме шума считывания выходного устройства и темнового тока. Пороговое значение потока излучения определяется как

$$P_{\text{пор}} = \frac{hc}{\lambda} \sqrt{\frac{SN}{\eta}}, \quad (1)$$

где η — квантовая эффективность ПЗС (см. рис. 3), которая имеет примерный вид нормального распределения и определяется как отношение среднего числа сфотогенерированных фотонов к числу фотонов, попадающих на ПЗС [2], S — площадь фоточувствительной части ПЗС, N — число электронов, вызывающих шумы ПЗС.

Построим семейство графиков $P_{\text{пор}}(\lambda, \text{нм})$ при разных значениях η , взятых из графика рис. 3,

Таблица 4. Поддиапазоны длин волн с учетом реальных ПЗС и объективов

Наименование поддиапазона в программе	Диапазон длин волн, мкм	Диапазон цветowych температур, К	Тип видеорегистратора
УФ	0,3–0,38	9653–7621	ВК с ВФПЗС
ВД	0,38–0,74	7621–3914	
ИК1	0,74–1,10	3914–2630	
ИК2	1,10–5,5	2630–525	ВК с ИК ПЗС
ИК3	5,5–8,0	525–362	ИК-системы с глубоким термоохлаждением
ИК4	8,0–15,0	362–190	

Примечание: ВК — видеокамера.

для ПЗС ISD017 (см. табл. 1). Для данной ПЗС

$$S = 16,6 \times 18,6 \text{ (мм)} = 3,088 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$N = 20.$$

Стоит отметить, что значение $P_{\text{пор}}(\lambda)$ без участия фокусирующих оптических систем очень незначительно, поэтому для построения семейства графиков и наглядности результатов домножим значения $P_{\text{пор}}$ на коэффициент масштабирования $= 10^{19}$ (рис. 4).

Из графика видно, что с ростом длины волны пороговое значение потока излучения падает. Следовательно, большей интенсивности излучения соответствует меньшая длина волны.

Теперь построим на одном графике зависимость от длины волны (в нм) квантовой эффективности и порогового значения ($P_{\text{пор}}$) потока излучения (домноженного на коэффициент масштабирования 10^{19}), применимые к матрице ISD017 (рис. 5).

Из графика видно, что значение $P_{\text{пор}}$ уменьшается с ростом квантовой эффективности ПЗС.

Модель идеального объектива

Идеальной моделью объектива с точки зрения спектрального диапазона и фокусировки является **камера-обскура** — простейший вид устройства, позволяющего получать оптическое изображение объектов, которая представляет собой светонепроницаемый ящик с отверстием в одной из стенок и экраном (матовым стеклом или белой бумагой) на противоположной стенке. Лучи света, проходя

сквозь небольшое отверстие, создают перевернутое изображение на экране. На основе камеры-обскуры были сделаны некоторые фотокамеры.

Камера-обскура имеет отверстие диаметром приблизительно 0,5–5 мм, выполняющее роль объектива фотокамеры. Однако простое отверстие вместо линзы не обеспечивает высокой резкости изображения. До определенного предела резкость изображения может быть повышена путем уменьшения диаметра отверстия, но при слишком сильном уменьшении начинают сказываться эффекты дифракции и изображение становится еще более расплывчатым, кроме того, резко падает освещенность экрана (т. к. уменьшается относительное отверстие «диафрагмы»). Обскура характеризуется бесконечно большой глубиной резко изображаемого пространства (глубиной резкости). Говорить о фокусном расстоянии обскуры можно только условно. Под эквивалентным фокусным расстоянием такой камеры обычно понимают расстояние от отверстия до экрана f_1 . Соотношение f_1/d определяется, как и в объективе, числом диафрагмы.

Пусть в нашем случае экраном камеры-обскуры будет служить фоточувствительная зона ПЗС со сторонами a и b , а диаметр отверстия d . Расстояние от отверстия до ПЗС f_1 , а до поверхности, откуда снимается изображение, f_2 . Размер проецируемого изображения с рассматриваемой поверхности $D_1 \times D_2$. Одно из сечений проецирования изображения с поверхности на ПЗС через идеальный объектив представлено на рис. 6. Число диафрагмы будет определяться граничным значением чувствительности ПЗС, т. е. N .

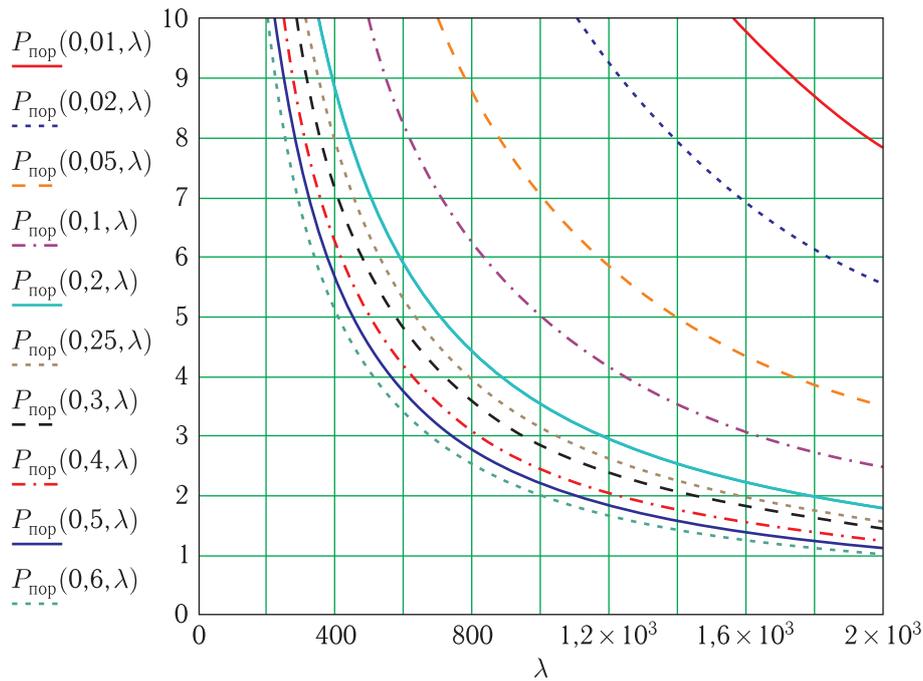


Рис. 4. Семейство графиков при разных значениях квантовой эффективности для матрицы ISD017

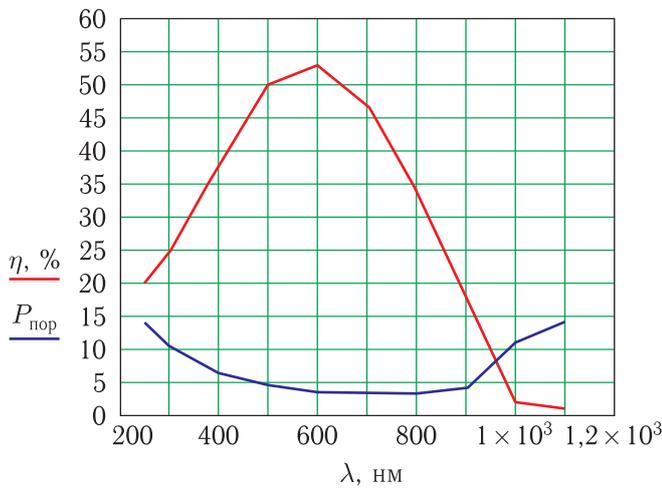


Рис. 5. Зависимость от длины волны квантовой эффективности и порогового значения потока излучения для матрицы ISD017

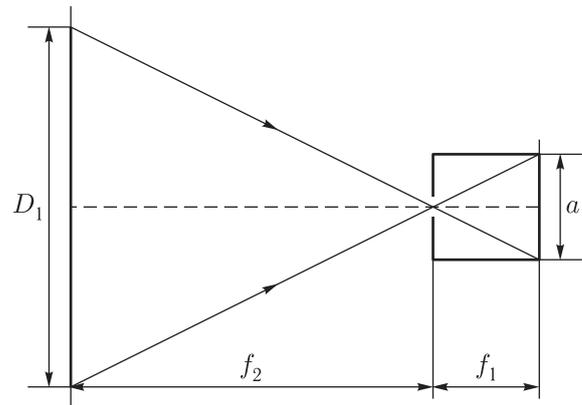


Рис. 6. Зависимость от длины волны квантовой эффективности и порогового значения потока излучения для матрицы ISD017

На рис. 6 показано одно из сечений рассматриваемой модели. Геометрическое построение сечения со сторонами b и D_2 ПЗС и плоскости изображения соответственно аналогично. Из подобия равнобедренных треугольников получаем:

$$f_{21}(D_1, f_1) = \frac{f_1}{a} D_1 \quad \text{и} \quad f_{22}(D_2, f_1) = \frac{f_1}{b} D_2. \quad (2)$$

Так как $a \approx b$ и отверстие камеры-обскуры расположено посередине светонепроницаемого ящика, то

$$f_2(D, f_1) = \frac{f_{21}(D_1, f_1) + f_{22}(D_2, f_1)}{2}, \quad (3)$$

где

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}. \quad (4)$$

Построим семейство графиков $f_2(D)$ при фиксированных значениях f_1 (рис. 7) для ПЗС ISD017, представляющих собой линейную зависимость. Причем с ростом f_1 растет f_2 , а следовательно, растет и D .

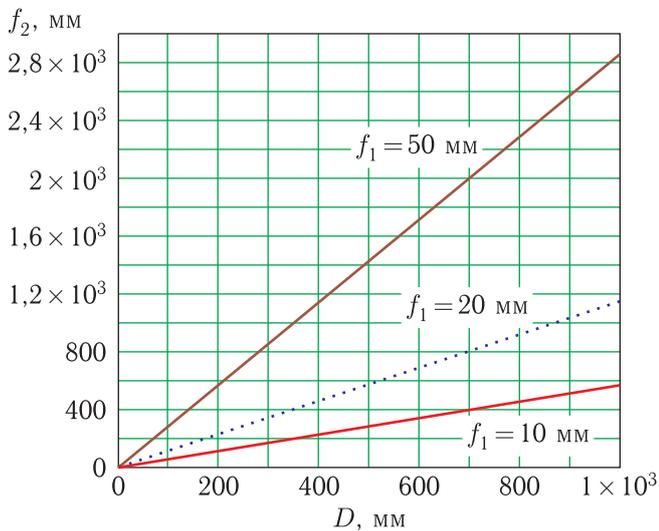


Рис. 7. Зависимость расстояния от линзы объектива до объекта от размеров объекта при различных расстояниях от отверстия до фоторегистрирующего прибора

Важной характеристикой объектива является **светосила** — величина освещенности оптических изображений в (фокальных) плоскостях различных оптических устройств, характеризующая степень светопропускания объектива. Геометрическая светосила вычисляется как отношение максимального диаметра входного зрачка объектива к заднему фокусному расстоянию.

Любой световой поток сквозь кольцо, которое ограничивает источник света, определяет мощность светового излучения этого потока, и его называют полным световым потоком источника света. Его величина не может быть увеличена никакими оптическими устройствами. Световой поток сквозь оптическую систему (объектив) может только уменьшить свою мощность.

Камера-обскура представляет собой модель идеального объектива, пропускающего малую долю светового потока с бесконечно широким спектральным диапазоном. В нашем случае светосила будет определяться соотношением

$$E_{\min} = \frac{d}{f_1}. \quad (5)$$

Также известно, что светосила идеального объектива бесконечной полосы спектрального диапазона определяется уровнем шумов, т. е.

$$E_{\min} = N. \quad (6)$$

Светосила обратно пропорциональна диафрагменному числу, т. е. чем больше диафрагменное число, тем меньше света попадет на фоточувствительную зону ПЗС.

Таким образом, подставляя (6) в (5), получаем

$$N = \frac{d}{f_1}, \quad (7)$$

$$\Rightarrow d(N, f_1) = f_1 N. \quad (8)$$

Построим графики $d(f_1)$ при разных фиксированных значениях N для ПЗС ISD017 (рис. 8).

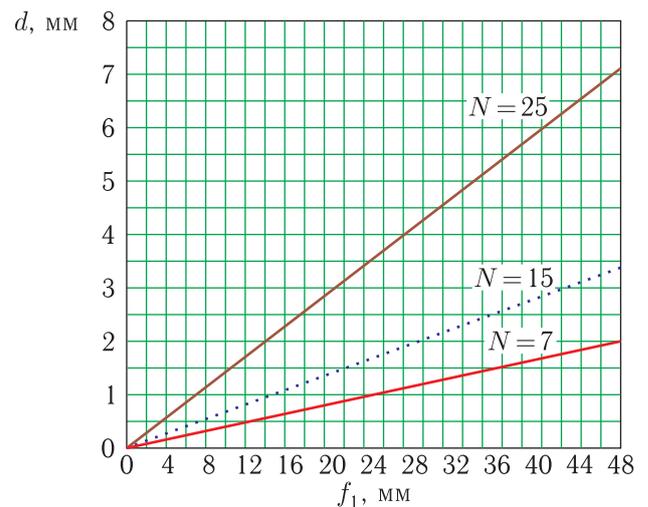


Рис. 8. Зависимость диаметра отверстия от расстояния от линзы объектива до фоторегистрирующего прибора при разных диафрагменных числах (N)

Как видно из рисунка, отверстие идеального объектива тем уже, чем меньше число электронов, вызывающих шумы ПЗС, которые определяют граничную чувствительность ПЗС. С ростом f_1 диаметр отверстия возрастает. Это объясняется тем, что чем больше заднее фокусное расстояние, тем больше фотонов, пройдя через объектив, должны попасть в нужное место фоточувствительной зоны ПЗС.

Быстродействие проецирования изображения при идеальном объективе

Оценим быстродействие проецирования изображения величиной D через идеальный объектив диаметром d и задним фокусным расстоянием f_1 на фоточувствительную зону ПЗС площадью $S = a \cdot b$. При заданных условиях время проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС будет оцениваться как

$$t = \frac{D}{d} t_{\text{ПЗС}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{ПЗС}} = 1/F_{\text{сч}}$ — время срабатывания ПЗС после попадания на фоторегистрирующую поверхность фотонов, а $F_{\text{сч}}$ — частота считывания ПЗС.

При уменьшении частоты считывания уменьшается уровень шумов считывания и возрастает время накопления заряда, поэтому меньшему быстродействию соответствует меньший диаметр отверстия идеального объектива и большая четкость изображения (попадание фотонов на фоточувствительную зону ПЗС и их последующее накопление при проецировании изображения).

Представим значения величин для оценки быстродействия для ПЗС ISD017 при двух значениях частоты считывания ПЗС, как показано в табл. 5.

Таблица 5. Оценка быстродействия проецирования изображения на ПЗС ISD017 при модели идеального объектива

$F_{\text{сч}}$, кГц	f_1 , мм	d , мм	N	f_2 , мм	D , мм	t , мс
1000	10	2,5	25	200	352	0,246
	20	5,0		500	440	0,154
	30	7,5		800	470	0,110
	40	10,0		1000	440	0,077
	50	12,5		1500	528	0,074
50	10	0,4	7	200	352	18,000
	20	0,8		500	440	11,000
	30	1,2		800	470	7,822
	40	1,6		1000	440	5,500
	50	2,0		1500	528	5,280

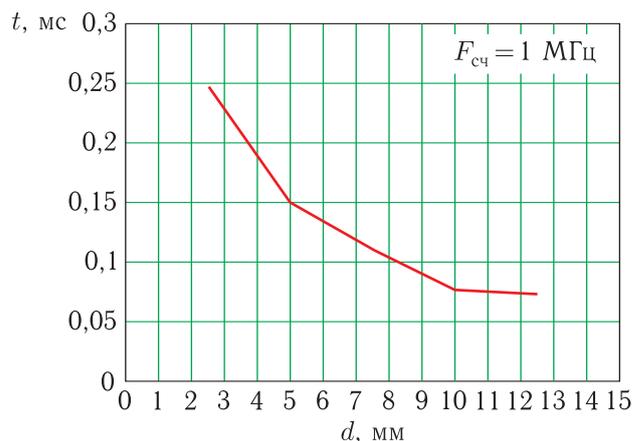


Рис. 9. Оценка быстродействия проецирования изображения для ПЗС ISD017 при изменении диаметра отверстия идеального объектива при частоте считывания ПЗС 1 МГц

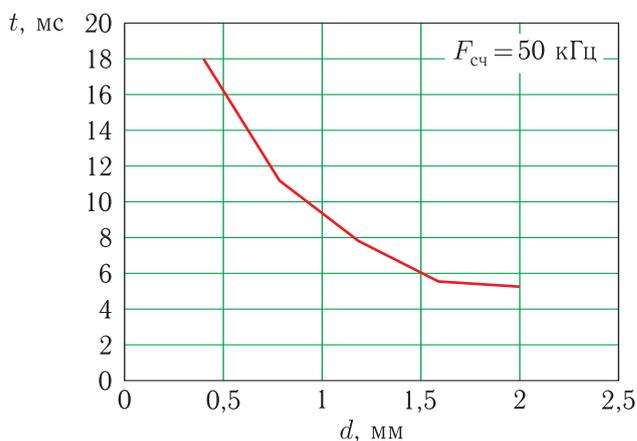


Рис. 10. Оценка быстродействия проецирования изображения для ПЗС ISD017 при изменении диаметра отверстия идеального объектива при частоте считывания ПЗС 50 кГц

Используя табл. 5, построим зависимость быстродействия проецирования изображения от диаметра отверстия идеального объектива (рис. 9, 10).

Проецирование изображения на ПЗС через модель реального объектива

Напомним, что камера-обскура — модель идеального объектива, который пропускает малый световой поток бесконечно большого спектрального

диапазона. Светосила данного объектива очень мала и определяется уровнем шумов фоторегистрирующего прибора. Для увеличения светосилы требуется перейти к реальному объективу, светосила которого будет $E = k \cdot E_{\min}$, где $k = S_o/S$, причем $S = a \cdot b$ — площадь фоточувствительной зоны ПЗС, $S_o = \frac{\pi}{4}d^2$ — площадь действующего отверстия объектива диаметром d . Следовательно, для светосилы объектива получаем выражение

$$E = \frac{\pi d^2}{4Nab}. \quad (10)$$

Построим зависимость $E(d)$ для ПЗС ISD017 при двух значениях N (рис. 11).

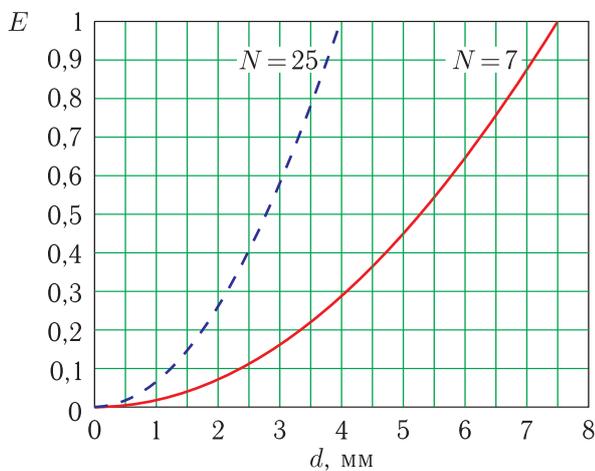


Рис. 11. Зависимость светосилы от действующего отверстия объектива для ПЗС ISD017

Чем больше уровень шумов, тем больший порог чувствительности у ПЗС и тем больший световой поток должен пройти через объектив на фоточувствительные элементы ПЗС. Следовательно, при увеличении уровня шумов ПЗС требуется выбирать объектив с большей светосилой, а значит, и с большим действующим отверстием.

Учитывая то, что в геометрическом смысле светосила также определяется как S_o/f^2 [3], где f — фокусное расстояние объектива, то, принимая во внимание (10),

$$\frac{N}{ab} = \frac{1}{f^2} \rightarrow f = \sqrt{\frac{S}{N}}. \quad (11)$$

Существует понятие **диафрагменного числа** [3], равного отношению фокусного расстояния

объектива к диаметру его действующего отверстия, т. е.

$$K = f/d. \quad (12)$$

Подставляя (11) в (12), получим:

$$K = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{S}{N}}. \quad (13)$$

Чем выше диафрагменное число, тем меньший световой поток пройдет через объектив и тем меньше будет его светосила [3]. Из (13) видно, что диафрагменное число также увеличивается при уменьшении уровня шумов ПЗС (а следовательно, и при уменьшении частоты считывания ПЗС). Величина, обратная диафрагменному числу, называется **относительным отверстием** объектива.

Быстродействие проецирования изображения при использовании реального объектива

Оценим задержку проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС ISD017 с учетом свойств реального объектива. Для этого построим график $d(E)$ (рис. 12), выразив зависимость через соотношение (10):

$$d(E) = \sqrt{\frac{4SE}{\pi N}}. \quad (14)$$

Затем представим значения величин для оценки быстродействия для ПЗС ISD017, сведя их в табл. 6 при двух значениях частоты считывания ПЗС.

Как видно из рис. 9, 10, 13 и 14, при увеличении действующего отверстия объектива быстродействие проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС ускоряется, потому что с увеличением диаметра действующего отверстия увеличивается и его светосила, а следовательно, и доля светового потока. Время накопления фотонов на ПЗС уменьшается при переходе от модели идеального объектива к модели реального.

Стоит отметить, что для ВК на КА или РН необходимо использовать длиннофокусные объективы, т. к. из рис. 6, 7 и соотношения (2) следует, что чем больше расстояние до объекта, тем больше должно быть фокусное расстояние объектива.

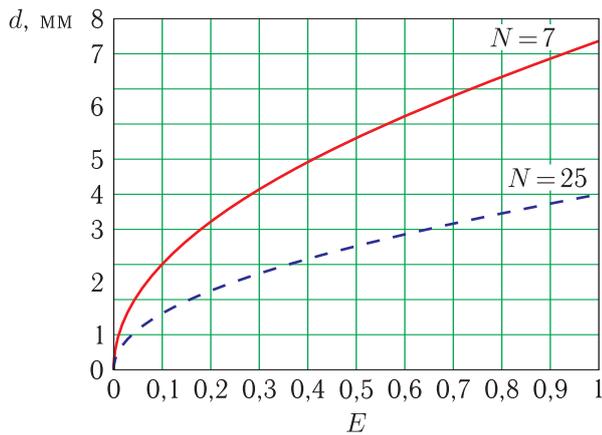


Рис. 12. Зависимость действующего отверстия от светосилы объектива для ПЗС ISD017

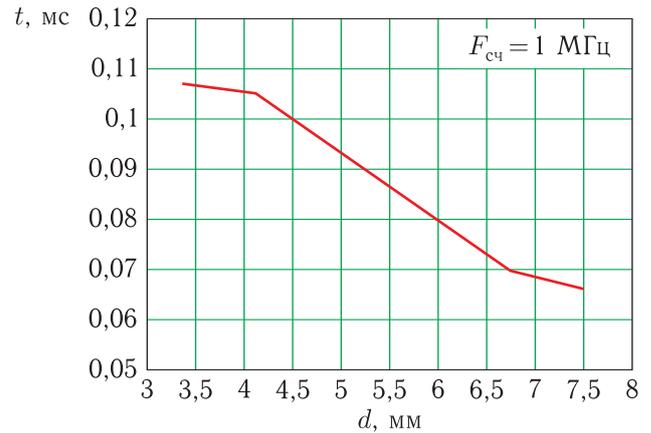


Рис. 13. Быстродействие проецирования изображения при модели реального объектива (частота считывания ПЗС ISD017 1 МГц)

Т а б л и ц а 6. Оценка быстродействия проецирования изображения на ПЗС ISD017 при модели реального объектива

$F_{сч}$, кГц	E	d , мм	N	D , мм	f_2 , мм	t , мс
1000	0,2	3,35	25	200	352	0,107
	0,3	4,10		500	440	0,105
	0,5	5,30		800	470	0,089
	0,8	6,70		1000	440	0,070
	1,0	7,50		1500	528	0,066
50	0,2	1,77	7	200	352	4,052
	0,3	2,17		500	440	3,971
	0,5	2,80		800	470	3,352
	0,8	3,55		1000	440	2,663
	1,0	3,97		1500	528	2,481

При уменьшении расстояния от объекта до объектива в КА и РН для сохранения модели используемого объектива необходимо увеличить глубину резкости, т.е. увеличить диафрагменное число путем уменьшения действующего отверстия объектива в соответствии с соотношением (12). Настройку диаметра действующего отверстия объектива ВК предполагается проводить при монтаже ВК на РН. Следует учитывать, что при уменьшении d увеличивается задержка проецирования изображения на фоторегистрирующий прибор, как следует из соотношения (12) и рис. 13, 14, однако даже при $F_{сч} = 50$ кГц задержка проецирования составляет не более 200 мкс. Тем не менее, при наземной

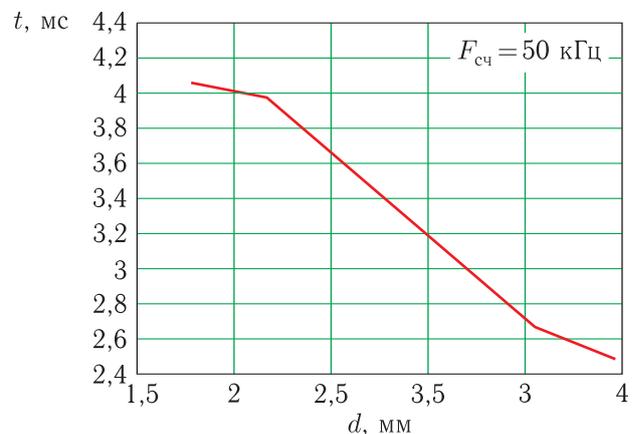


Рис. 14. Быстродействие проецирования изображения при модели реального объектива (частота считывания ПЗС ISD017 50 кГц)

обработке ВИ для измерения температуры разницу задержек проецирования для конкретных выбранных моделей объективов и ПЗС нужно учитывать.

Список литературы

1. Вишневецкий Г.И., Выдревич М.Г., Нестеров В.К., Ривкинд В.Л. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе / Электроника: наука, технология, бизнес, 2003, № 8.
2. Формозов Б.И. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. СПбГУАП, 2002. 120 с.
3. Кулагин С.В., Апарин Е.М. Проектирование фото- и киноприборов». М.: Машиностроение, 1986.