

Исследование линейности аэрофотосистем, построенных на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда

09, сентябрь 2013

DOI: 10.7463/0913.0619654

Веселов Ю. Г., Гулевич С. П., Молчанов А. С.

УДК 778.35

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Россия, Люберцы, ОАО «Камов»

Россия, Государственный летно-испытательный центр МО РФ

vesel_foto@mail.ru

market@kamov.ru

GLIZ@rambler.ru

Введение

Основа современного анализа качества изображения – теория линейной фильтрации. Она является частью Фурье анализа – анализа, используемого для изучения реакции на сигнал линейных инвариантных устойчивых систем.

Процесс прохождения информации в оптико-электронной системе (ОЭС) условно может быть представлен в виде системы последовательного соединения отдельных передаточных звеньев. В каждое звено системы вкладывается свое физическое содержание, однако, общим для всех звеньев является то, что каждое звено оказывает свое влияние на сигнал, несущий информацию, и это влияние рассматривается независимо от других звеньев. Каждое звено ОЭС описывается своей оптической передаточной функцией (ОПФ). Оптическая передаточная функция является комплексной величиной, характеризующей способность системы изображения воспроизводить пространственные частоты, содержащиеся в спектре частот объекта. Модуль ОПФ, представляющий собой амплитуду реакции системы на синусоидальное распределение, называется функцией передачи модуляции

(ФПМ). Результирующая ФПМ ОЭС находится как произведение ФПМ отдельных звеньев системы.

Разрешающая способность в настоящее время является наиболее часто используемым критерием качества изображения, а следовательно и параметром контроля технического состояния ОЭС [1, 2]. Достоинством этого критерия является его хорошая корреляция с вероятностью распознавания объектов. Согласно аналитического метода оценки разрешающей способности ОЭС [3, 4], она равна предельной пространственной частоте $N_{\text{ДР}} = R$, на которой еще различаются изображения штрихов миры с требуемой вероятностью, и определяется как проекция на ось абсцисс точки пересечения функции передачи модуляции и пороговой модуляционной характеристики (рис. 1).

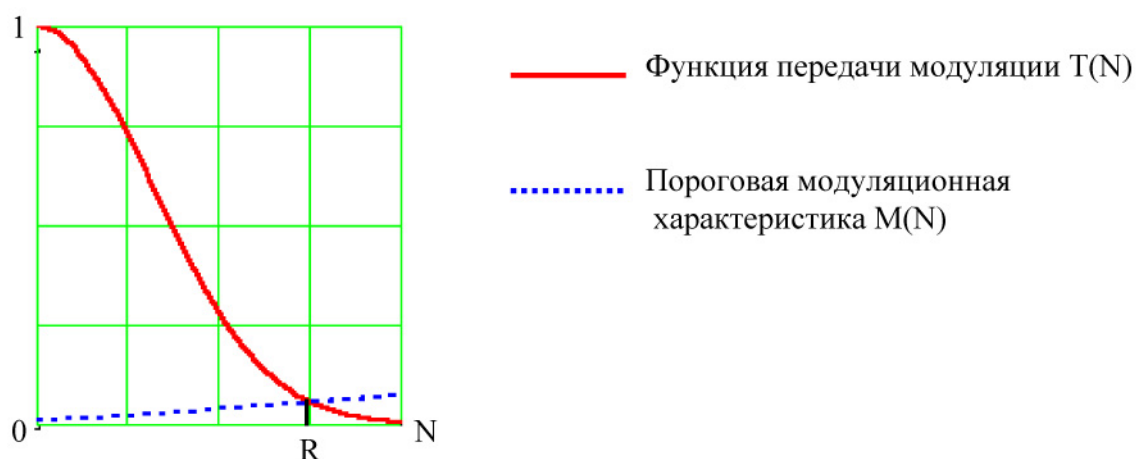


Рисунок 1 – Оценка разрешающей способности аналитическим методом

Следовательно, для определения разрешающей способности R достаточно решить уравнение

$$K_{BX}T(N) - M(N) = 0,$$

где K_{BX} входной контраст, $M(N)$ пороговая модуляционная характеристика, N – пространственная частота.

Пространственная частота, являющаяся корнем уравнения, и есть разрешающая способность фотосистемы при входном контрасте K_{BX} .

Использование аналитического метода определения разрешающей способности аэрофотосистемы (АФС) позволяет оценить влияние на нее конструктивных и эксплуатационных параметров, а так же условий применения.

Применение этого метода возможно в случае линейности процессов формирования изображения. Для оценки линейности аэрофотосистем, построенных на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда предложена методика, в ходе которой осуществляется построение световой характеристики рассматриваемой аэрофотосистемы – зависимости ее выходного сигнала от яркости фотографируемого теста и проверка выполнения принципа суперпозиции - основного признака линейности систем.

Методика проведения физического исследования в целях оценки линейности аэрофотосистем на основе ФППЗ

Предлагаемая методика состоит из двух этапов. Ее целью является проверка линейности ФППЗ. Линейность характеристики преобразования ФППЗ – степень соответствия характеристики преобразования ФППЗ линейному закону [5]).

На первом этапе выполняется построение световой характеристики ФППЗ и оценка ее линейности, а на втором осуществляется проверка выполнения принципа суперпозиции.

Одной из основных характеристик любого приемника излучения является зависимость величины выходного сигнала от величины входного сигнала. Для фотоматериала это кривая зависимости $D = D(\lg H)$ (где

D – оптическая плотность почернения, H – экспозиция), которая называется характеристической кривой [6]. Для ФППЗ зависимость выходного сигнала с ФППЗ – U_c от входного – яркости объекта съемки L , называется световой характеристической [5, 7].

Для построения световой характеристической с целью оценки линейности АФС предлагается использовать экспериментальную установку, приведенную на рисунке 2.

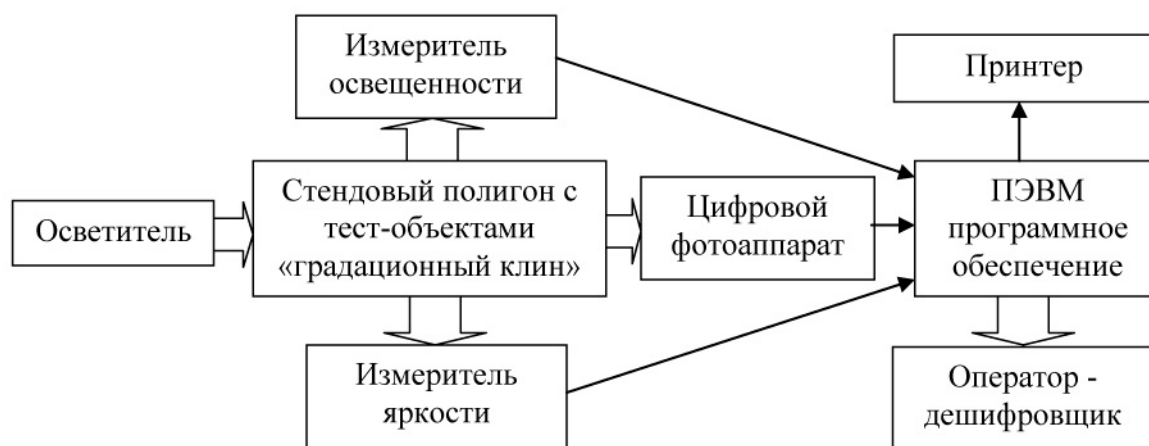


Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки

В качестве тест объекта для оценки линейности использовался оптический клин, имеющий: диапазон яркости элементов клина от 1 до 14 нт, количество элементов клина 21, с заданным перепадом яркостей между соседними элементами, расположенный на светлом (рисунок 3) и темном фоне (рисунок 4). Все измерения проводились при фиксированных условиях $E_{пол} = 600$ лк; $T_{цв} = 5300$ К.

Исследование состоит из двух этапов:

1. Съемка оптического клина в различных условиях (различные фон, фокусное расстояние и температура фотоаппарата).

2. Построение зависимостей сигнала с АФС U_c в уровнях серого тона (УСТ) от яркости каждого элемента оптического клина L в нит.

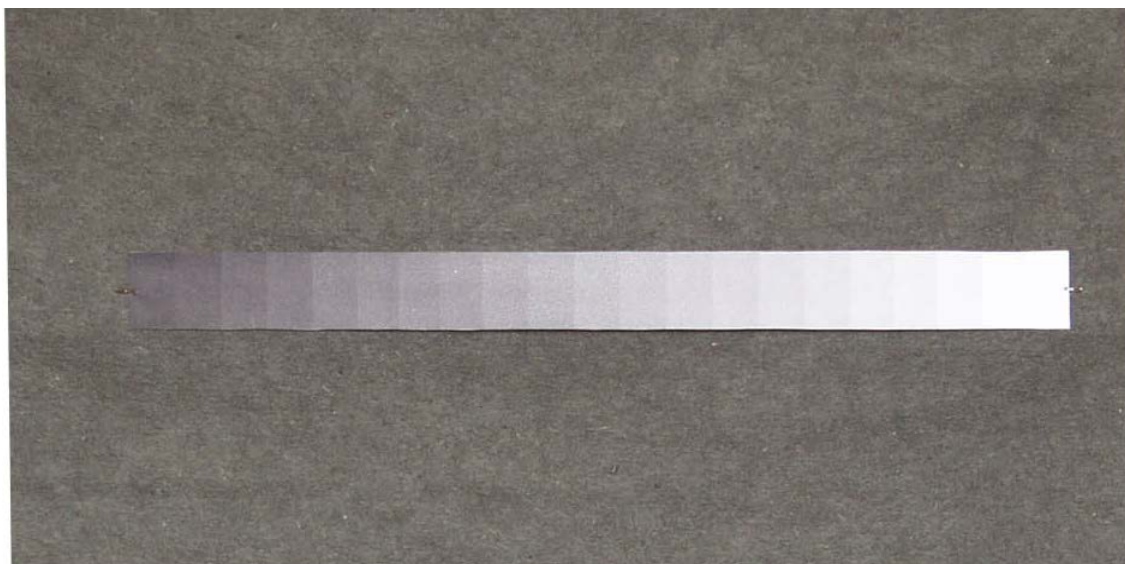


Рисунок 3 – Оптический клин на темном фоне

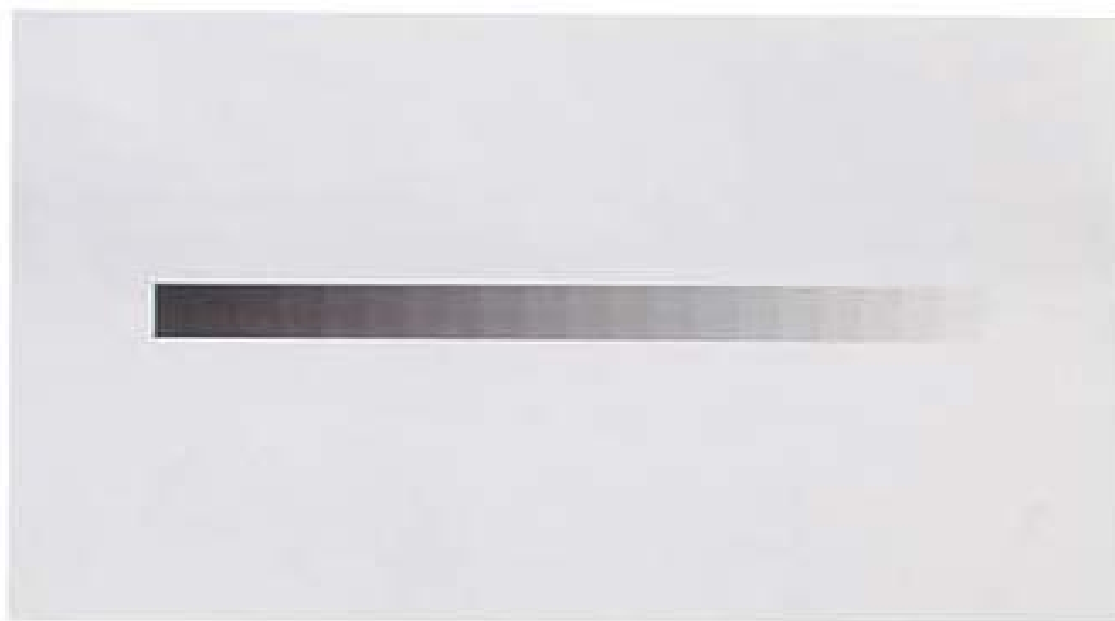


Рисунок 4 – Оптический клин на светлом фоне

Введение понятия световой широты

Анализ изображений серого клина имеющего 21 поле яркостей, показывает, что фотоаппарат Nikon D70 в данных условиях фотографирования не обеспечивает передачи всех полей, т.е. сказывается нелинейность ФППЗ. Для оценки этого явления введем аналог фотографической широты для фотопленок [6], понятие световой широты

($\ell_{сш}$) ФППЗ. Световая широта для ФППЗ – это величина проекции прямолинейного участка световой характеристики на ось абсцисс, которая характеризует диапазон яркостей, в котором изображения объектов фотографирования передаются фотоаппаратом без искажений.

$$\ell_{сш} = \lg \frac{E_{из.мак}}{E_{из.мин}}, \quad (2)$$

где $E_{из.мак,мин}$ – максимальная и минимальная освещенности ФППЗ, соответствующие предельно передаваемым яркостям оптического клина.

Так как

$$\frac{E_{из.мак}}{E_{из.мин}} = \frac{4\pi \cdot L_{мак} \cdot \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cdot \tau_o \cos^4 \beta}{4\pi \cdot L_{мин} \cdot \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cdot \tau_o \cos^4 \beta} = \frac{L_{мак}}{L_{мин}}, \quad (3)$$

то, следовательно, для определения достаточно измерить предельное разрешение яркости полей клина $L_{мак}$ и $L_{мин}$:

$$\ell_{сш} = \lg \frac{L_{мак}}{L_{мин}}, \quad (4)$$

Проведенное исследование показывает, что $\ell_{сш}$ зависит от типа фона и изменяется в пределах от 0,7 до 0,9 что сравнимо с фотографической широтой фотопленок [8].

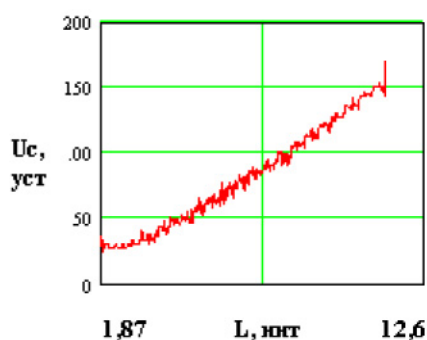
Из выше сказанного можно сделать вывод, что ФППЗ в достаточно широком диапазоне яркостей, который определяется фотографической шириной, является линейным звеном.

Характерной особенностью линейных систем является справедливость для них принципа суперпозиции. Для систем формирующих двумерный сигнал удовлетворяющих принципу суперпозиции справедливо записать:

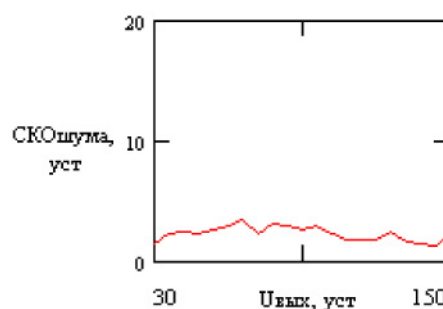
$$A\{a_1 F_1(x, y) + a_2 F_2(x, y) + \dots\} = a_1 A\{F_1(x, y)\} + a_2 A\{F_2(x, y)\} + \dots, \quad (5)$$

где A – обозначение оператора; $F_1(x, y), F_2(x, y)$ – входные сигналы; a_1, a_2 – некоторые постоянные (могут быть комплексными).

Очевидно, что приведенное выше утверждение выполняется на линейном участке световой характеристики фотоаппарата, представленной на рисунках 5-10.



а.

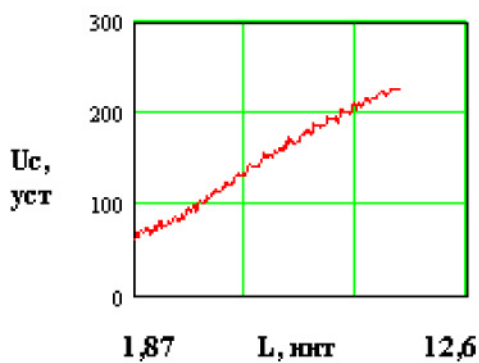


б.

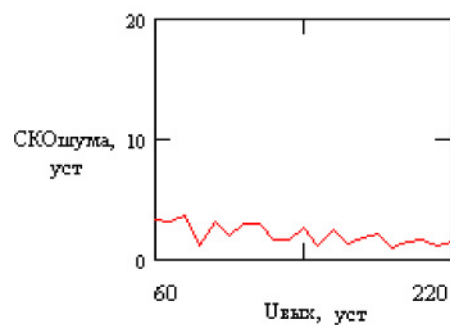
Рисисунок 5 – Оптический клин на светлом фоне $f=36$ мм $t=18^{\circ}\text{C}$ № 624

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала



а.

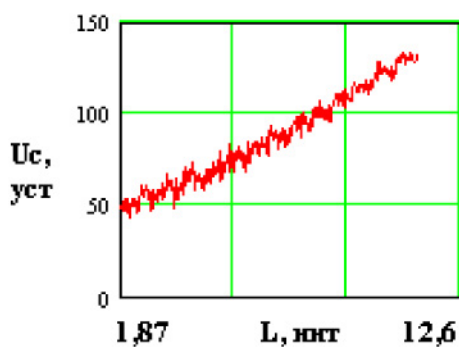


б.

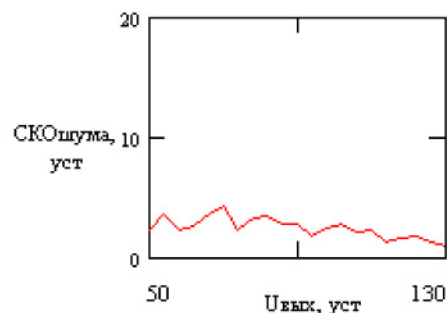
Рисунок 6 – Оптический клин на светлом фоне $f = 9 \text{ мм}$ $t = 18^\circ \text{C}$ № 625

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала



а.

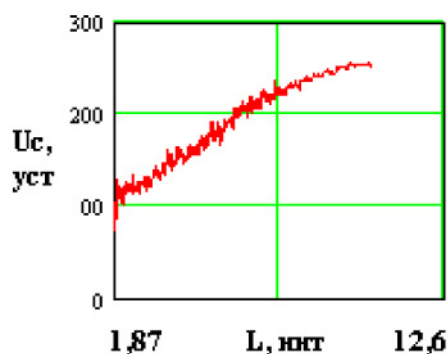


б.

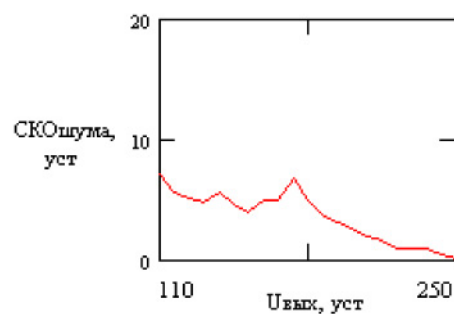
Рисунок 7 – Оптический клин на светлом фоне $f = 36 \text{ мм}$ $t = 25^\circ \text{C}$ № 631.)

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала



а.

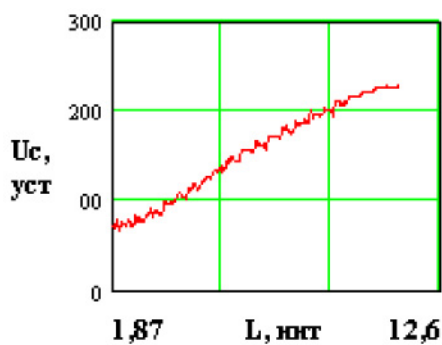


б.

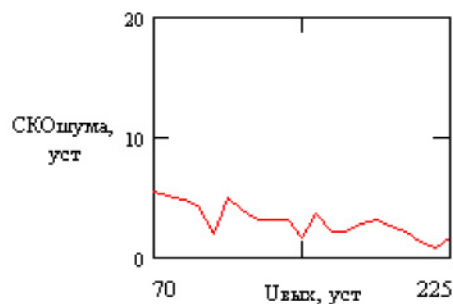
Рисунок 8 – Оптический клин на темном фоне $f = 36 \text{ мм}$ $t = 25^\circ \text{C}$ № 630

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала



а.

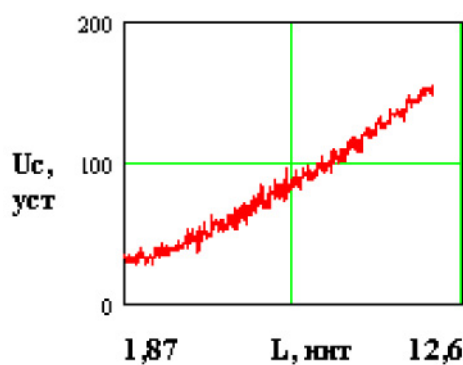


б.

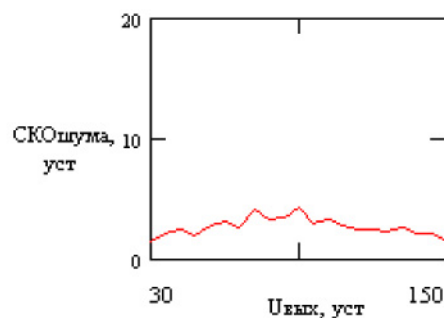
Рисунок 9 – Оптический клин на светлом фоне $f = 9$ мм $t = 35^\circ\text{C}$ № 613

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала



а.



б.

Рисунок 10 - Оптический клин на светлом фоне $f = 36$ мм $t = 35^\circ\text{C}$ № 614

а. – Световая характеристика ФППЗ

б. – Зависимость СКО шума от величины выходного сигнала

Проверим принцип суперпозиции на следующем примере:

Яркость каждого элемента оптического клина была задана таким образом, чтобы выполнялось равенство:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{20} \Delta L_i \quad (6)$$

где ΔL – разность яркостей между первым и последним элементом оптического клина; ΔL_i – разность яркостей между соседними элементами

оптического клина, причем $\Delta L_i = const$. Очевидно, если ФППЗ является линейным звеном, то должно выполняться следующие условия:

$$\Delta U_i = \Delta L_i \cdot \gamma_{i,i+1} \quad (7)$$

$$\gamma_{1,2} = \gamma_{2,3} = \dots = \gamma_{20,21} = \gamma_{1,21} \quad (8)$$

а, следовательно, и

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{21} \Delta L_i \cdot \gamma_{i,i+1} = \sum_{i=1}^{21} \Delta L_i \cdot \gamma_{1,21} \quad (9)$$

где ΔU_i – разность значений уровня серого тона между соседними элементами оптического клина.

$\gamma_{i,i+1}$ – тангенс угла наклона участка световой характеристики приемника излучения цифрового фотоаппарата между соседними элементами градационного клина.

ΔU – разность значений уровня серого тона между первым и последним элементами оптического клина.

Например, для изображений, полученных при фотографировании оптического клина на светлом фоне и $f=36$ мм фотоаппаратом Nikon D70 эти условия выполняются следующим образом:

$$\gamma_{i,i+1} = 0,71 \dots 0,77; i = 1, \dots, 21$$

$$\gamma_{1,21} = 0,74$$

Заключение

В результате проведенных исследований доказано, что ФППЗ является линейным звеном в определенном, достаточно широком диапазоне яркостей. Ширина этого диапазона определяется введенным выше понятием – световая широта ФППЗ $L_{СИ}$. Оценка световой широты, полученная в результате

проведенных исследований находится в диапазоне от 0,7 до 0,9. Анализируя экспериментально построенные световые характеристики ФППЗ можно утверждать, что выше приведенный вывод о линейности подтверждается справедливостью принципа суперпозиции на их линейном участке.

Доказательство линейности цифровых оптико-электронных систем позволяет применять линейную теорию фотосистем для их синтеза и анализа.

Вместе с этим это дает возможность использовать аналитический способ для оценки эффективности применения цифровых оптико-электронных систем работающих в видимом диапазоне в различных условиях.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проекты № 11-08-00292, № 12-08-00588а.

Список литературы

1. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: пер. с нем. М., Мир, 1978. С. 488-489.
2. Мельканович А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. М.: МО СССР, 1984. С. 338-345.
3. Мельканович А.Ф., Янутш Д.А. К вопросу о синтезе аэрофотографической системы. М.: Научная и прикладная фотография и киноматография, 1979., т. 24. вып. 1. С. 24-32.
4. Веселов Ю.Г., Пономаренко А.В., Тихонычев В.В., Халтобин В.М. Исследование характеристик цифровых фотоаппаратов. М.: Техника кино и телевидения, 2003, №6. С. 39-41.
5. ГОСТ 25532-89. Приборы с переносом заряда фоточувствительные. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990.
6. Белоглазов И.Н., Коваленко В.П., Смирнов Ю.Н., Халтобин В.М. Авиационная светотехника. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1987. С. 259-260.

7. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. С. 73-77.
8. Зернов В.А. Фотографическая сенситометрия. М.: Искусство, 1980. С. 134-140.

Study of linear aerial photosystems that are based on the photosensitive charge-transfer devices

09, September 2013

DOI: 10.7463/0913.0619654

Veselov Yu., G., Gulevitch S., P., Molchanov A.S.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

Russia, Lyubertsy, JSC "Kamov"

State Flight Test Center of Defense of the Russian Federation

vesel_foto@mail.ru

market@kamov.ru

GLIZ@rambler.ru

A study of aerial photosystems that are based on the photosensitive charge-transfer devices was carried out in order to determine the linearity of their units. To estimate the linearity of photosensitive charge-transfer devices the authors used results of a specially developed technique of physical research, which is based on the construction of light characteristics and verification of the superposition principle. It was shown that a photosensitive charge-transfer device is a linear unit within a certain range of brightness. Width of this range was determined by the introduction of the notion - light latitude of a photosensitive charge-transfer device.

Publications with keywords: [aerofotosystem](#), [photosensitive charge-transfer device](#), [linearity](#)

Publications with words: [aerofotosystem](#), [photosensitive charge-transfer device](#), [linearity](#)

References

1. Freezer H. *Photographic recording of information*. Springer-Verlag, 1978. (in German). (Russ. ed.: Freezer H. *Fotograficheskaya registratsiya informatsii*. Transl. from German. Moscow, Mir, 1978. pp. 488-489.).
2. Mel'kanovich A.F. *Fotograficheskie sredstva i ikh ekspluatatsiya* [Photographic equipment and its operation]. Moscow, Publ. of USSR Ministry of Defense, 1984, pp. 338-345.
3. Mel'kanovich A.F., Yanutsh D.A. K voprosu o sinteze aerofotograficheskoy sistemy [On synthesis of aerial photographic system]. *Nauchnaya i prikladnaya fotografiya i kinematografiya*, 1979, vol. 24, no. 1, pp. 24-32.
4. Veselov Yu.G., Ponomarenko A.V., Tikhonychev V.V., Khaltobin V.M. Issledovanie kharakteristik tsifrovyykh fotoapparatov [Investigation of characteristics of digital cameras]. *Tekhnika kino i televideniya*, 2003, no. 6, pp. 39-41.

5. GOST 25532-89. *Pribory s perenosom zaryada fotochuvstvitel'nye. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25532-89. Photosensitive charge transfer devices. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publishing House, 1990. 1129 p.
6. Beloglazov I.N., Kovalenko V.P., Smirnov Yu.N., Khaltobin V.M. *Aviatsionnaya svetotekhnika* [Aviation lighting engineering]. Moscow, Zhukovskiy VVIA Pibl., 1987, pp. 259-260.
7. Press F.P. *Fotochuvstvitel'nye pribory s zaryadovoy svyaz'yu* [Photosensitive charge-coupled devices]. Moscow, Radio i svyaz', 1991, pp. 73-77.
8. Zernov V.A. *Fotograficheskaya sensitometriya* [Photographic sensitometry]. Moscow, Iskustvo, 1980, pp. 134-140.