НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0619667

Веселов Ю. Г., Глушко В. А., Молчанов А. С.

УДК 778.35

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Россия, Москва, ФГУП «18 ЦНИИ МО РФ»

Россия, Государственный летно-испытательный центр МО РФ

vesel_foto@mail.ru

18ZNII@rambler.ru

GLIZ@rambler.ru

Введение

Анализ современного состояния аэрофотосистем (АФС) и требований к ним показал, что актуальной задачей остается повышение эффективности их применения и технической эксплуатации [1, 2].

Повышение эффективности применения АФС неразрывно связано с оптимизацией параметров системы для различных условий применения.

В настоящее время широкое распространение получил аналитический метод оценки разрешения АФС, базирующийся на теории линейных оптико-электронных систем [3].

Математическая модель АФС, построенная на основе этой теории, реализующая аналитический метод оценки разрешения АФС позволяет эффективно оценивать ее параметры, учитывая особенности конфигурации и условия применения, что дает возможность не только подобрать параметры съемки для повышения результативности применения, но также сформировать стратегию развития перспективных АФС, спланировать распределение сил и средств для их разработки.

В свою очередь при испытаниях АФС использование математического моделирования позволяет существенно сократить количество полетов на испытания в различных условиях, заменив их результатами, полученными посредством математического моделирования.

Вопросам разработки математических моделей аналоговых (пленочных) фотосистем (ФС) посвящено большое количество работ [3-7], однако на сегодняшний день крайне мало работ, в которых рассматриваются пространственно-частотные модели ФС, построенных на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда. При этом имеющиеся труды не учитывают особенности применения ФС на воздушных носителях [8, 12].

Особенности формирования математической модели аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда

Процесс прохождения информации в аэрофотосистеме (АФС) может быть представлен в виде последовательного соединения отдельных передаточных звеньев. Каждое звено характеризуется своей оптической передаточной функцией. Модуль оптической передаточной функции звена, характеризующий зависимость коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты N, определяет функцию передачи модуляции (ФПМ) звена АФС [3].

ФПМ АФС определяет ее разрешающую способность и описывает ее ответ на оптический входной сигнал в виде синусоиды.

В то же время ФПМ АФС представляется как произведение ФПМ всех ее звеньев. При этом результирующую ФПМ для всей АФС построенной на основе фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФППЗ) можно представить следующим выражением [8]:

$$W_{АФС}(N) = W_{АТМ}(N) \cdot W_{ВФ}(N) \cdot W_{ОБ}(N) \cdot W_{СФ}(N) \cdot W_{ФППЗ}(N), \quad (1)$$

где $W_{ATM}(N)$ - ФПМ атмосферы;

$W_{ВФ}(N)$ - ФПМ вибраций АФС на фотоустановке;

$W_{ОБ}(N)$ - ФПМ дифракционного объектива;

$W_{СФ}(N)$ - ФПМ системы фокусировки;

$W_{ФППЗ}(N)$ - ФПМ ФППЗ.

В [7] ФПМ турбулентной атмосферы предложено принять:

$$W_{ATM}(N) = exp\left(-2\pi^2\sigma_{ATM}^2 f^2 N^2\right), \qquad (2)$$

где f - фокусное расстояние объектива;

σ_{ATM} - параметр, значения которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия аэрофотографирования

№ п/п	Направления наблюдения	Условия наблюдения	σ_{ATM}, рад
1	Вниз через свободную атмосферу, с высоты 1700 м	Хорошие Плохие	$2{,}5\cdot10^{-6}$ $2{,}5\cdot10^{-5}$
2	Вниз, через свободную атмосферу, с высоты более 10000 м	Хорошие Плохие	0,017/Н 0,1/Н
3	Сбоку через слой атмосферы шириной 1,6 км на высоте 3 м	Среднее значение Солнечный полдень	$1\cdot10^{-5}$ $3\cdot10^{-5}$

где H – высота фотографирования, м.

Функция передачи модуляции АФС на аэрофотоустановке вычисляется аналогично ФПМ турбулентной атмосферы и имеет вид [5]:

$$T_{ВФ}(N) = \exp\left(-2\cdot\left(\pi\cdot f\cdot\sigma_B\cdot N\right)^2\right), \qquad (3)$$

где σ_B - параметр функции рассеяния точки, обусловленный вибрациями АФС; f – фокусное расстояние.

ФПМ аэрофотообъектива зависит от угла поля зрения между оптической осью и направлением визирования. На оптической оси аэрофотообъектив имеет, как правило, "наилучшую" ФПМ. На характер ФПМ аэрофотообъектива существенно влияет величина относительного отверстия. При уменьшении относительного отверстия от своего максимального значения ФПМ сначала уменьшается, т.к. уменьшаются значения остаточных аберраций, а влияние дифракции еще незначительно. Далее по мере уменьшения относительного отверстия, оказывается увеличение дифракционных искажений, ведущих к ухудшению ФПМ. Для определения ФПМ аэрофотообъектива, с учетом суммарного влияния аберраций, может быть использовано эмпирическое выражение [3, 5]:

$$W_{ОБ}\left(N\right) = exp\left(-0{,}0035\frac{D_{вхзр}^{2}tg2\beta}{f}N\right), \tag{4}$$

где $D_{вхзр}$ - диаметр входного зрачка;

$tg2\beta$ - угол поля зрения объектива.

ФПМ системы фокусировки выглядит следующим образом [5]:

$$W_{СФ}\left(N\right) = \frac{sin\left(\frac{\sqrt{3}\cdot\pi\cdot\Delta f\cdot D_{вхзр}\cdot N}{2\cdot f}\right)}{\frac{\sqrt{3}\cdot\pi\cdot\Delta f\cdot D_{вхзр}\cdot N}{2\cdot f}} \tag{5}$$

где Δf - погрешность фокусировки.

Причинами возникновения расфокусировки Δf может быть перепад температур и давлений. Отсюда, как следствие, достижение температурой и

давлением значений, при которых деформация конструктивных материалов уже существенна.

Функция передачи модуляции матрицы ФППЗ имеет вид [9-11]:

$$W_{ФППЗ}(N) = W_{НПЗ}(N) \cdot W_{ДИФ}(N) \cdot W_{ПИ}(N) \cdot W_{НАК}(N) \cdot W_{СИНХР}(N) \quad (6)$$

где $W_{НПЗ}(N)$ – ФПМ неэффективности переноса заряда;

$W_{ПИ}(N)$ – ФПМ приемника излучения;

$W_{ДИФ}(N)$ – ФПМ диффузии;

$W_{НАК}(N)$ – ФПМ накопления;

$W_{СИНХР}(N)$ – ФПМ синхронизации.

ФПМ учитывающая неэффективность переноса заряда в ФППЗ, работающем в режиме ВЗИ, равна:

$$W\varepsilon взи(\omega) = Nx^{-1} \cdot \left(\frac{A^2(\omega) + B^2(\omega)}{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \right)^{0.5} \quad (7)$$

где $A(\omega) = 1 - \exp(-Nx \cdot a(\omega)) \cdot \cos(Nx \cdot b(\omega))$;

$B(\omega) = \exp(-Nx \cdot a(\omega)) \cdot \sin(Nx \cdot b(\omega))$;

$a(\omega) = \varepsilon \cdot (1 - \cos(\omega))$;

$b(\omega) = \varepsilon \cdot \sin(\omega)$;

$\varepsilon = P_{ф} \cdot \varepsilon_{o}$ – неэффективность переноса на один каскад (перенос на расстояние, равное дискретности фотоэлементов);

ε_{o} – неэффективность переноса на один элементарный перенос;

$P_{ф}$ – число фаз тактового питания.

Если считывание из регистра считывания осуществляется последовательным способом, то в выражение (7) необходимо включить член, учитывающий неэффективность переноса заряда по нему. Таким образом, для центральной точки матрицы ФППЗ, работающего в режиме ВЗИ, ФПМ неэффективности переноса заряда будет равна:

$$W_{НПЗ}(N) = \frac{\left(A^2(N) + B^2(N)\right)^{0.5}}{Nx \cdot \left(a^2(N) + b^2(N)\right)^{0.5}} \cdot exp\left(-0.5 \cdot Ny \cdot a(N)\right). \quad (8)$$

ФПМ диффузии. Часть носителей заряда генерируется вне обедненных областей ФППЗ. При диффузии этих носителей под действием электрического поля в обедненную область имеется боковая компонента, приводящая к расплыванию изображения. ФПМ диффузии для ФППЗ всех типов имеет вид:

$$W_{ДИФ}(N) = cosh\left(\frac{d}{L_0}\right) \cdot cosh\left(\frac{d}{L(N)}\right), \quad (9)$$

где L_0 – диффузионная длина в материале;

d - расстояние от места поглощения света до обедненной области;

$$L(N) = \left(L_0 + \left(2 \cdot \pi \cdot N\right)^2\right)^{-0.5}, \quad (10)$$

ФПМ элементарного приемника излучения определяется геометрией фотоэлемента и описывается Фурье-преобразованием пространственного распределения чувствительности отдельного фотоэлемента.

$$W_{ПИ}(N) = \frac{sin(A \cdot \pi \cdot N)}{A \cdot \pi \cdot N} = sinc(A \cdot N), \quad (11)$$

где A – размер фотоэлемента.

ФПМ накопления обусловлена сдвигом изображения [10] за время накопления заряда $t_н$ (время экспозиции) и определяется выражением:

$$W_{НАК}(N) = sinc(\delta \cdot N), \quad (12)$$

где δ – результирующий сдвиг изображения относительно матрицы ФППЗ за время накопления. Величина сдвига зависит от типа оптической системы, элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимка.

В случае равномерного прямолинейного полета носителя, при отсутствии систем компенсации сдвига изображения в условиях плановой съемки имеем

$$\delta = \frac{W}{H} \cdot f \cdot tн, \quad (13)$$

где W – скорость носителя.

При тех же условиях, но в случае, когда в качестве приемника изображения используется ФППЗ, работающий в режиме ВЗИ, ФПМ накопления определим выражением:

$$W_{НАКВЗИ}(N) = sinc(D \cdot N), \quad (14)$$

где D – дискретность расположения фотоэлементов в направлении перемещения зарядовых пакетов.

В этом случае величина результирующего сдвига за время накопления при равенстве скорости сдвига изображения и средней скорости перемещения зарядовых пакетов определяется дискретностью фотоэлементов.

ФПМ синхронизации. Эта составляющая учитывает несоответствие скорости сдвига изображения, средней скорости перемещения зарядовых пакетов и описывается ФПМ для сдвига:

$$W_{СИНХР}\left(N\right) = sinc\left(Nx \cdot D \cdot \eta_V \cdot N\right), \tag{15}$$

где $\eta_V = \dfrac{Vии - Vзз}{Vии}$ – относительная погрешность компенсации сдвига изображения;

$Vии$ – скорость сдвига изображения;

$Vзз$ – средняя скорость перемещения зарядовых пакетов.

В общем случае η_V является случайной величиной, зависящей от погрешности измерителя скорости и высоты полета носителя, а также от девиации частоты тактового генератора. Полагая, что наибольшую погрешность вносят вышеперечисленные факторы, определим среднеквадратическое отклонение выражением:

$$\sigma_{\eta V} = \left[\left(\frac{\sigma w}{W}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Ft} \cdot D \cdot H}{W \cdot f}\right)^2\right], \tag{16}$$

где σ_W – СКО погрешности измерителя скорости носителя;

σ_H – СКО погрешности измерителя высоты полета носителя;

σ_{f_T} – СКО девиации частоты тактового генератора ФППЗ.

Из (15), (16) получим:

$$W_{СИНХР}\left(N\right)=sinc\left(Nx\cdot D\cdot\sigma_{\eta v}\cdot N\right), \qquad (17)$$

Таким образом, при изменении входных параметров H, W, $\sigma_{СДВ}$, $\sigma_{АТМ}$, v и заданных значениях АФС и параметров ФППЗ $D_{вхзр}$, f, A, $t_н$, Δf, ε, L_0, δ, d, σ_W, $\sigma_н$, σ_{f_T} можно определить общую ФПМ для всей АФС.

Для обеспечения оценки разрешающей способности аналитическим способом помимо выражения результирующей ФПМ АФС используется выражение ПМХ.

Выражение пороговой модуляционной характеристики АФС построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда имеет вид [13].

$$M\left(N\right)=\sqrt{\frac{K_Г^2}{\beta}+\left(\frac{2\cdot q}{\overline{L}}\right)^2\left(S_{0ДК}+S_{0ПИ}+S_{0ВУ}+S_{0ВКУ}\right)\cdot\left(\frac{N}{m}\right)^2} \qquad (18)$$

где $K_Г=K\cdot\sigma_Г\cdot g-$ пороговая модуляция глаза (Принято считать $K_Г=0.01$) [1.24], $K=\frac{\sqrt{\pi}\rho_Г}{\ell}-$ квадратный корень отношение площади корреляции шумов, вызванных флуктуациями нервного возбуждения к площади наблюдаемого фрагмента, $g=4\cdot\ln 10\cdot\Phi^{-1}\left(1-2\cdot P_{ОШ}\right)-$ коэффициент, учитывающий допустимую вероятность ошибки.

Как видно из (18) пороговая модуляционная характеристика определяется шумами: дискретизации и квантования $S_{0ДК}$, приемника излучения $S_{0ПИ}$, видео усилителя $S_{0ВУ}$, видеоконтрольного устройства $S_{0ВКУ}$, а также пороговой модуляцией глаза $K_Г$, отношением сигнал/шум

при заданной вероятности ошибки q, средней яркостью изображения на экране ВКУ $\overline{L}$ и величиной тангенса угла наклона логарифмической зависимости между световым ощущением глаза и наблюдаемой яркостью β.

Разработанная математическая модель уточнялась по результатам проведения натурных испытаний цифрового фотоаппарата (ЦФА) Canon 30D, установленного на БЛА. Впоследствии уточненная модель показала хорошую сходимость результатов математического моделирования с данными летных испытаний рассматриваемого ЦФА по оценкам разрешающей способности.

Сравнительный анализ полученных результатов поведенного исследования показал, что оценка разрешающей способности ЦФА чувствительна к изменению параметров фотографирования и условий применения. Изменение характеристик любого звена системы участвующего в процессе прохождения информации приводит к изменению разрешающей способности ЦФА. По величине изменения разрешающей способности имеется возможность сориентироваться, какое звено системы привело к этому изменению.

Заключение

В работе в качестве одного из признаков технического состояния рассматривается разрешающая способность. Проведенное аналитическое исследование показало, что значение разрешающей способности достаточно чувствительно к изменению рассмотренных выше факторов (погрешность фокусировки, параметры атмосферы, диафрагменное число, вибрации аэрофотоустановки, неэффективность переноса заряда в матрице ПЗС, параметры полета и др.), этот факт доказывает правильность выбора разрешающей способности как параметра диагностирования технического состояния АФС.

Показано, что использование аналитического способа оценки признаков технического состояния цифровых АФС позволяет производить

прогноз рассматриваемых признаков технического состояния с учетом условий и параметров съемки. При сравнении прогнозируемых значений признаков с фактическими представляется возможным сделать вывод о причине несоответствия (техническая причина или фактические условия применения не соответствуют использованным при прогнозе).

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

Список литературы

1. Буков В.Н., Базанов А.П., Колодежный Л.П. и др. Теоретические основы и средства автоматизированного контроля: учеб. пособие. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1997. С. 3-5.

2. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. М.: Транспорт, 1981. С. 5-12.

3. Мельканович А.Ф., Янутш Д.А. К вопросу о синтезе аэрофотографической системы. М.: Научная и прикладная фотография и кинематография, 1979., т. 24. Вып. 1. С. 24-32.

4. Халтобин В.М., Шпилевой Ю.М. Аналитический метод оценки эффективности применения иконических оптико-электронных средств. Научно-методические материалы «Применение ЭВМ для автоматизации процессов сбора и обработки информации». М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1984. С. 47-57.

5. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. Киев: Киевское ВВАИУ, 1988. С. 36-50.

6. Мельканович А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. М.: Министерство обороны СССР, 1984. С. 282-465.

7. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М.: Мир, 1978. С. 304-308.

8. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. С. 88-91.

9. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. Новосибирск: Наука, 2005.

10. 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.

11. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приёмники оптического излучения: Справочник. М.: Радио и связь, 1987.

12. Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Данилин А.А. Функция передачи модуляции цифровой аэрофотосъемочной системы при движении изображения. Успехи современной радиоэлектроники. М.: Радиотехника, 2010, Вып. 1. С. 44-47.

13. Веселов Ю.Г., Гулевич С.П., Карпиков И.В., Островский А.С. Математическая модель цифровой инфракрасной системы дистанционного зондирования Земли // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №. 6. DOI: 10.7463/0612.0423297

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Mathematical model of aerial photosystem based on photosensitive devices with charge transfer transfer

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0619667

Veselov Yu., G., Glushko V.A, Molchanov A.S.

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

FSUE "18 CRI Defense of the Russian Federation"

State Flight Test Center of Defense of the Russian Federation

vesel_foto@mail.ru

18ZNII@rambler.ru

GLIZ@rambler.ru

This paper considers a mathematical model for estimating resolution measuring properties of an aerialphotosystem developed on the basis of photosensitive devices with charge transfer. The proposed mathematical model which implements an analytical method for estimating resolving power of aerial photosystems based on the theory of linear optoelectronic system allows to obtain assessments of resolving power for various types of aerial photosystems with consideration for their conditions of use.

Publications with keywords: mathematical model, aerofotosystem, photosensitive charge-transfer device

Publications with words: mathematical model, aerofotosystem, photosensitive charge-transfer device

References

1. Bukov V.N., Bazanov A.P., Kolodezhnyy L.P., et al. *Teoreticheskie osnovy i sredstva avtomatizirovannogo kontrolya* [Theoretical bases and means of automated control]. Moscow, Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 1997, pp. 3-5.

2. Barzilovich E.Yu., Voskoboev V.F. *Ekspluatatsiya aviatsionnykh sistem po sostoyaniyu* [Operation of aviation systems]. Moscow, Transport, 1981, pp. 5-12.

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. Khaltobin V.M., Shpilevoy Yu.M. *Analiticheskiy metod otsenki effektivnosti primeneniya ikonicheskikh optiko-elektronnykh sredstv. Nauchno-metodicheskie materialy "Primenenie EVM*

dlya avtomatizatsii protsessov sbora i obrabotki informatsii” [Analytical method of evaluation of effectiveness of iconic optoelectronic means. Scientific-methodical materials “Application of computer for automation of processes of acquisition and processing of information”]. Moscow, Zhukovskiy VVIA Pibl., 1984, pp. 47-57.

5. Rebrin Yu.K. *Optiko-elektronnoe razvedyvatel'noe oborudovanie letatel'nykh apparatov* [Opto-electronic reconnaissance equipment of aircraft]. Kiev, Kiev VVAIU Publ., 1988, pp. 36-50.

6. Mel'kanovich A.F. *Fotograficheskie sredstva i ikh ekspluatatsiya* [Photographic resources and their operation]. Moscow, Ministry of Defense of USSR Publ., 1984, pp. 282-465.

7. Freezer H. *Photographic recording of information*. Springer-Verlag, 1978. (in German). (Russ. ed.: Frizer H. *Fotograficheskaia registratsiia informatsii* . Moscow, Mir, 1978, pp. 304-308.).

8. Baklanov A.I. *Sistemy nablyudeniya i monitoringa* [Surveillance and monitoring systems]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009, pp. 88-91.

9. Malinin V.V. *Modelirovanie i optimizatsiya optiko-elektronnykh priborov s fotopriemnymi matritsami* [Simulation and optimization of optoelectronic devices with photodetector matrix]. Novosibirsk, Nauka, 2005. 256 p.

10. Veselov Yu.G., Ponomarenko A.V., Tikhonychev V.V., Khaltobin V.M. Issledovanie kharakteristik tsifrovykh fotoapparatov [Investigation of characteristics of digital cameras]. *Tekhnika kino i televideniya*, 2003, no. 6, pp. 39-41.

11. Aksenenko M.D., Baranochnikov M.L. *Priemniki opticheskogo izlucheniya: Spravochnik* [Receivers of optical radiation: Handbook]. Moscow, Radio i svyaz', 1987. 296 p.

12. Veselov Yu.G., Tikhonychev V.V., Danilin A.A. Funktsiya peredachi modulyatsii tsifrovoy aerofotos"emochnoy sistemy pri dvizhenii izobrazheniya [Modulation Transfer Function of Digital Aerophotography Systems at Image Movement]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2010, no. 1, pp. 44-47.

13. Veselov Yu.G., Gulevich S.P., Karpikov I.V., Ostrovskiy A.S. Matematicheskaya model' tsifrovoy infrakrasnoy sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Mathematical model of digital infrared remote sensing system]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 6. DOI: 10.7463/0612.0423297