

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 629.7

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-1-138-147

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

SYNTHESIS METHOD OF TRANSMISSION FUNCTIONS MODULATION OF DIGITAL OPTIC-ELECTRONIC SYSTEMS OF EARTH REMOTE SENSING BY AIRCRAFT TEST RESULTS

А.С. Молчанов, Е.В. Чаусов
A.S. Molchanov, E.V. Chausov

Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова,
Россия, 416500, Астраханская обл., г. Ахтубинск

State Flight Test Center named after V.P. Chkalov,
Ahtubinsk, Astrakhan region, 416500, Russia

E-mail: andryoe@yandex.ru

Аннотация

В статье представлена авторская методика синтеза функции передачи модуляции цифровых оптико-электронных систем при проведении летных испытаний, разработанная для оценивания качества цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли, и описана архитектура реализующего ее специализированного программного комплекса. Адекватность разработанной методики подтверждена удовлетворительной сходимостью аналитической и полученной по результатам летных испытаний функций передачи модуляции авиационной многофункциональной оптико-электронной системы. Использование критерия качества цифровых оптико-электронных систем, основанного на функции передачи модуляции, позволяет получить максимум информации о передаточных свойствах этой системы или отдельного ее звена и синтезировать цифровые оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли по отдельным звеньям, а с помощью разработанной методики синтеза функции передачи модуляции обеспечивается корректный выбор математической модели цифровой оптико-электронной системы при проведении испытаний.

Abstract

The article presents the author's method of synthesis of the modulation transfer function of digital optical-electronic systems during flight tests, developed for assessing the quality of digital optical-electronic systems of remote sensing of the Earth, and describes the architecture of the specialized software complex that implements it. The adequacy of the developed methodology is confirmed by satisfactory convergence of the analytical and derived from the flight tests of the modulation transfer functions of the aviation multi-functional optical-electronic system. Using the quality criterion of digital optical-electronic systems, based on the modulation transfer function, allows you to get maximum information about the transmission properties of this system or an individual link and to make a choice of links and systems based on specific requirements. This allows you to synthesize digital optical-electronic systems of remote sensing of the Earth along individual links, and using the developed method of synthesizing the modulation transfer function, you will ensure that the mathematical model of the digital optical-electronic system is correctly selected during the tests.

Ключевые слова: цифровая оптико-электронная система, дистанционное зондирование Земли, линейное разрешение на местности, функция передачи модуляции, пространственная частота, штриховая мира.

Keywords: digital optical-electronic system, remote sensing of the Earth, linear resolution on the ground, modulation transfer function, spatial frequency, dashed world.

Введение

При проведении испытаний цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) большое внимание уделяется исследованиям их характеристик в летных (натурных) условиях, поскольку конечной целью летных испытаний является рекомендация образцов в серийное производство и эксплуатацию [Молчанов, 2017; Жилияков и др., 2011]. Поэтому важным фактором в обеспечении создания систем ДЗЗ являются теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию методического обеспечения их испытаний. Показателем качества ЦОЭС является линейное разрешение на местности: это требование обязательно задается в тактико-технических заданиях (ТТЗ) на разработку ЦОЭС и подлежит оцениванию в летных экспериментах [Ребрин, 1988; Чернуха и др., 1994; Коломиец и др., 2010; Куликов, 2016; Молчанов, 2017].

Традиционно для решения этой задачи применяют визуальный метод оценивания линейного разрешения, предусматривающий дешифрирование изображения штриховой мира [Молчанов, 2017]. За оценку линейного разрешения принимают ширину штриха в изображении штриховой мира, в котором дешифровщик различает все штрихи раздельно по всей их длине (имеется визуальное восприятие разницы в уровне серого тона между каждой светлой полосой и соседними с ней темными полосами по всей их длине). Однако этот метод имеет недостатки, заключающиеся в зависимости найденного значения от формы и контраста между элементами штриховой мира, характеристик устройства, с помощью которого рассматривается оцениваемое изображение, свойств наблюдателя, условий проведения испытаний и других факторов [Молчанов и др., 2017; Куликов и др., 2017; Захарченко и др., 2018].

Это обстоятельство стимулирует поиск и использование альтернативных, более точных способов оценки линейного разрешения на местности ЦОЭС ДЗЗ в натурных условиях, в частности способа оценивания системы с помощью функции передачи модуляции (ФПМ). Поэтому проведено исследование, целью которого являлся анализ качества ЦОЭС ДЗЗ с использованием ФПМ при проведении летных испытаний.

Постановка задачи

Активное внедрение методов математического моделирования позволяет существенно сократить количество испытательных полетов за счет результатов, полученных посредством моделирования, что в конечном итоге обеспечивает сокращение ресурсных и временных затрат. Поэтому большинство исследователей отдают предпочтение квалиметрии ЦОЭС ДЗЗ путем синтеза математической модели ЦОЭС, построенной с помощью аппарата ФПМ, и дальнейшему исследованию качества системы в соответствии с выбранным критерием.

Важным условием возможности использования для целей испытаний математической модели ЦОЭС, построенной на основе ФПМ, является сходимость и адекватность модели относительно эталона. Проверка этого условия возможна путем сравнения моделируемой и экспериментально полученной ФПМ системы. Решению задачи построения математической модели ЦОЭС посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов [Ребрин, 1988; Holst, 2000; Лихошерстный, Жилияков, 2010; Новикова, Ноаман, 2012; Айвазян и др., 2013; Веселов и др., 2013; Есев, Лагойко, 2015; Жилияков, Ефимов, 2015; Молчанов, 2017; Черноморец, 2012; Молчанов, Чаусов, 2018а; Мол-

чанов, 2018; Степанов и др., 2018 и др.], однако на сегодняшний день крайне мало работ, в которых рассматриваются вопросы определения ФПМ по результатам натурных испытаний ЦОЭС ДЗЗ. Поэтому задачей проведенного исследования была разработка методики синтеза ФПМ ЦОЭС в условиях натурального эксперимента.

Математическая модель ЦОЭС

Анализ ЦОЭС, состоящей из различных по физической природе звеньев, возможен только в том случае, когда имеется адекватное математическое описание функционирования этих звеньев и системы в целом. В этом случае ЦОЭС может быть представлена в виде математической модели, отражающей существенные свойства системы.

Отдельные звенья ЦОЭС можно представить в виде фильтров, изменяющих пространственно-частотный спектр изображения, что позволяет описать их с помощью функций передач – так называемых оптических передаточных функций. Модуль оптической передаточной функции звена, характеризующий зависимость коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты, определяет ФПМ звена ЦОЭС [Ребрин, 1988].

Таким образом, математическая модель ЦОЭС представляет аналитическое выражение ФПМ системы, которое может быть описано произведением ФПМ всех звеньев, оказывающих влияние на качество формируемого изображения [Веселов и др., 2013; Молчанов, 2017]:

$$W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{расч}}(\nu) = W_{\text{атм.}}(\nu) \cdot W_{\text{ОЭС}}(\nu) \cdot W_{\text{СО}}(\nu) \cdot W_{\text{зл.}}(\nu),$$

где $W_{\text{атм.}}(\nu)$ – ФПМ атмосферы; $W_{\text{ОЭС}}(\nu) = W_{\text{сдв.}}(\nu) \cdot W_{\text{об.}}(\nu) \cdot W_{\text{диф.}}(\nu) \cdot W_{\text{СФ}}(\nu) \cdot W_{\text{ПИ}}(\nu)$ – ФПМ ОЭС; $W_{\text{сдв.}}(\nu)$ – ФПМ сдвига и вибраций на фотоустановке; $W_{\text{об.}}(\nu)$ – ФПМ объектива; $W_{\text{диф.}}(\nu)$ – ФПМ дифракционных искажений объектива; $W_{\text{СФ}}(\nu)$ – ФПМ системы фокусировки; $W_{\text{ПИ}}(\nu)$ – ФПМ приемника оптического излучения; $W_{\text{СО}}(\nu)$ – ФПМ системы отображения; $W_{\text{зл.}}(\nu)$ – ФПМ глаза дешифровщика; ν – пространственная частота.

Математическая модель, построенная в соответствии с выражением (1), позволяет эффективно оценивать качество ЦОЭС ДЗЗ путем построения графика ФПМ и определения значения пространственной частоты, которому соответствует величина ФПМ согласно выбранному критерию. В качестве таких критериев можно выделить критерии Шадэ, Линфута, Крейна и др. Также в качестве характерных точек ФПМ на практике используют следующие значения: 0,8; 0,61; 0,5; 0,37; 0,3; 0,03 (соответствует порогу контрастной чувствительности глаза) [Молчанов, 2017].

Кроме того, такая математическая модель позволяет эффективно оценивать параметры ЦОЭС, учитывая особенности конфигурации и условия применения, а именно [Молчанов, Чаусов, 2108б]:

- анализировать работу ЦОЭС на уровне его функциональной схемы и по результатам анализа делать вывод о соответствии системы своему целевому назначению;
- сравнивать различные варианты ЦОЭС между собой;
- оценивать влияние отдельного звена на эффективность работы системы в целом;
- моделировать, в случае необходимости, работу отдельных звеньев независимо от остальных;
- построить наиболее рациональную с точки зрения реализации на ЭВМ программную систему, отвечающую требованиям гибкости, модифицируемости, структурированности и эффективности сопровождения;
- генерировать на ЭВМ любую физически возможную структуру системы, допустимую с точки зрения набора программных модулей.

Методика определения ФПМ ЦОЭС ДЗЗ по результатам летных испытаний

Использование математической модели при испытаниях ЦОЭС ДЗЗ, построенной в соответствии с выражением для математической модели ЦОЭС, возможно в случае ее достоверности. Для проверки этого условия необходимо сравнить расчетную $W_{ЦОЭС}^{расч.}(ν)$ и экспериментальную $W_{ЦОЭС}^{эксп.}(ν)$ ФПМ системы. Рассмотрим порядок определения экспериментальной ФПМ ЦОЭС $W_{ЦОЭС}^{эксп.}(ν)$, полученной по результатам летного эксперимента.

Известно [Молчанов и др., 2017], что ФПМ описывает качество системы в терминах контраста изображения периодических тест-объектов различной пространственной частоты и представляет собой зависимость коэффициента передачи модуляции T от пространственной частоты $ν$:

$$W_{ЦОЭС}(ν) = T(ν), \quad T = \frac{K}{K_0},$$

$$K = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}, \quad K_0 = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}},$$

где K – контраст изображения периодического тест-объекта; K_0 – контраст периодического тест-объекта; E_{max} , E_{min} – максимальная и минимальная освещенности изображения периодического тест-объекта, полученного ЦОЭС; L_{max} , L_{min} – максимальная и минимальная яркости оригинала периодического тест-объекта; $ν$ – пространственная частота – количество периодов регулярной структуры, приходящихся на единицу длины.

В настоящее время в качестве периодических тест-объектов для определения характеристик качества оптико-электронных систем различного назначения широко используют штриховые миры, представляющие собой набор групп, состоящих из черных и белых штрихов, расположенных вдоль и поперек полета носителя, с равной шириной штрихов (постоянной пространственной частотой) в пределах группы, и нарастающей/убывающей шириной штрихов (пространственной частотой) от группы к группе (рис. 1).



Рис. 1. Штриховая мира для квалиметрии ЦОЭС ДЗЗ
 Fig. 1. Test-object for qualimetry TSOES of Earth Remote Sensing

Анализ записанной зависимости коэффициента передачи модуляции T от пространственной частоты $ν$ показывает, что для определения экспериментальной ФПМ ЦОЭС ДЗЗ можно воспользоваться следующей методикой:

1. Разместить на земной поверхности штриховую миру.
2. Выполнить в ясную безоблачную погоду аэросъемку штриховой миры с помощью ЦОЭС ДЗЗ при заданных условиях полета носителя (высота и скорость полета, углы курса, крена, тангажа носителя (воздушного судна)).
3. Отобрать для дальнейшего анализа изображения с штриховой мирой, полученные при угловых колебаниях носителя, не превышающих допустимые значения.

4. На отобранных изображениях измерить значения максимального E_{max} и минимального E_{min} уровней освещенности для каждой группы штриховой миры (для каждой пространственной частоты ν).

Ввиду того, что аэроснимки, полученные с помощью ЦОЭС, являются цифровыми, то измерение E_{max} и E_{min} как правило проводят на технологической линии обработки испытательной информации (ТЛОИ) на базе ЭВМ с использованием специализированного программного обеспечения.

5. Рассчитать значения контрастов $K_{\nu 1}, K_{\nu 2}.. K_{\nu n}$ и коэффициентов передачи модуляции $T_{\nu 1}, T_{\nu 2} ... T_{\nu n}$ для каждой пространственной частоты $\nu_1, \nu_2.. \nu_n$.

6. Построить график зависимости полученных коэффициентов передачи модуляции $T_{\nu 1}, T_{\nu 2} ... T_{\nu n}$ от пространственной частоты $\nu_1, \nu_2.. \nu_n$.

Рассмотрим пример определения ФПМ, согласно приведенному алгоритму, по изображениям тест-объекта, полученным при проведении летных испытаний многофункциональной ОЭС (МОЭС), установленной на борту самолета.

В качестве тест-объекта использовались 2 набора штриховых мир видимого диапазона с характеристиками:

- контраст мир $K_0=0,75$;
- количество штрихов в группе: для миры № 1 – 3 штриха в группе, для миры № 2 – 4 штриха в группе;
- ширина штрихов миры № 1 (группа 1-1 $d=0,4$ м; группа 1-2 $d=0,356$ м; группа 1-3 $d=0,317$ м; группа 1-4 $d=0,283$ м; группа 1-5 $d=0,252$ м; группа 1-6 $d=0,224$ м; группа 1-7 $d=0,2$ м; группа 1-8 $d=0,178$ м; группа 1-9 $d=0,159$ м; группа 1-10 $d=0,141$ м);
- ширина штрихов миры № 2 (группа 2-1 $d=0,98$ м; группа 2-2 $d=0,88$ м; группа 2-3 $d=0,78$ м; группа 2-4 $d=0,7$ м).

В ходе испытательных полетов были получены с помощью исследуемой МОЭС аэроснимки с изображениями штриховых мир. Одно из отобранных изображений для дальнейшего анализа представлено на рис. 2.

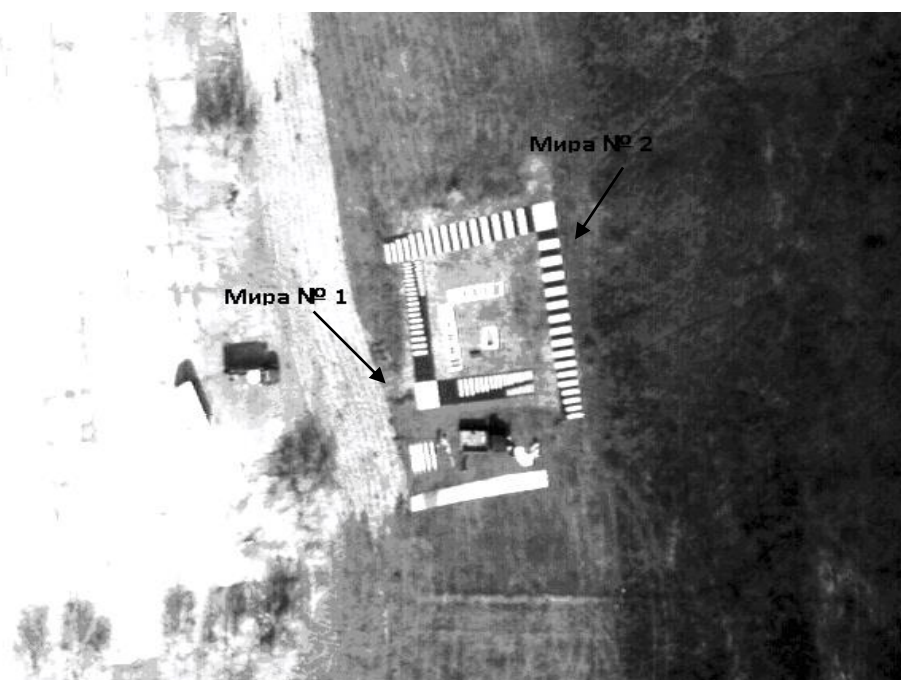


Рис. 2. Изображение штриховых мир, полученное МОЭС в ходе испытательных полетов

Fig. 2. The image of the test-object obtained by MOES during test flights

Для расчета ФПМ системы отобранный цифровой аэроснимок был загружен в технологическую линию обработки испытательной информации (ТЛОИ).

С помощью специализированного «Программного комплекса обработки цифровых изображений» (ПКОЦИ) [Молчанов, Чаусов, 2018б] определена экспериментальная ФПМ в соответствии с зависимостью коэффициента передачи модуляции T от пространственной частоты ν . Для этого с помощью инструментария ПКОЦИ были измерены значения максимальной E_{max} и минимальной E_{min} интенсивностей освещенности изображения в значениях уровня серого 0 и 255 для темных и белых участков миры соответственно для каждой группы штрихов миры № 1 и миры № 2, далее построен график ФПМ исследуемой МОЭС (рис. 4).

Результаты измерений E_{max} и E_{min} для каждого участка изображения, содержащего отдельную группу штрихов миры № 1 и миры № 2, а также рассчитанные значения контрастов и коэффициентов передачи модуляции представлены в таблице.

Таблица
Table

Исходные данные для построения ФПМ МОЭС
Baseline data for the construction of MTF MOES

№ группы	$d, \text{ м}$	$\nu=1/d, \text{ 1/м}$	E_{max}	E_{min}	K	T
2-1	0,98	1,020408	255	49	0,677632	0,903509
2-2	0,88	1,136364	255	49	0,677632	0,903509
2-3	0,78	1,282051	255	52	0,661238	0,88165
2-4	0,7	1,428571	252	53	0,652459	0,869945
1-1	0,4	2,5	255	63	0,603774	0,805031
1-2	0,356	2,808989	255	80	0,522388	0,696517
1-3	0,317	3,154574	255	92	0,469741	0,626321
1-4	0,283	3,533569	240	92	0,445783	0,594378
1-5	0,252	3,968254	230	99	0,398176	0,530902
1-6	0,224	4,464286	212	97	0,320872	0,42783
1-7	0,2	5	217	130	0,25072	0,334294
1-8	0,178	5,617978	197	122	0,23511	0,31348
1-9	0,159	6,289308	185	120	0,213115	0,284153
1-10	0,141	7,092199	170	118	0,180556	0,240741

В качестве примера на рис. 3, 4 представлены фрагменты диалогового окна ПКОЦИ, на котором изображен результат измерения E_{max} и E_{min} для шестой распознанной группы штрихов миры № 1.



Рис. 3. Изображение распознанной группы штриховых мир
Fig. 3. The image of the recognized group of test-object

Шкала времени		Журнал измерений			
Записать измерения					
	Маркировка	Дата и время	Документ	Значение серого (минимальное)	Значение серого (максимальное)
0001	Измерение 1	16.12.2018 23:10:24	17_04_18_10_47_1...	97,000000	211,000000

Рис. 4. Фрагменты окна программы ПКОЦИ с результатами измерения E_{\max} и E_{\min} для шестой группы штрихов мираы № 1

Fig. 4. Fragments of the PKOZI program window with the results of the measurement of E_{\max} and E_{\min} for the sixth group of test-object № 1

На рис. 5 представлены график экспериментальной ФПМ исследуемой МОЭС и для сравнения график типичной ФПМ МОЭС.

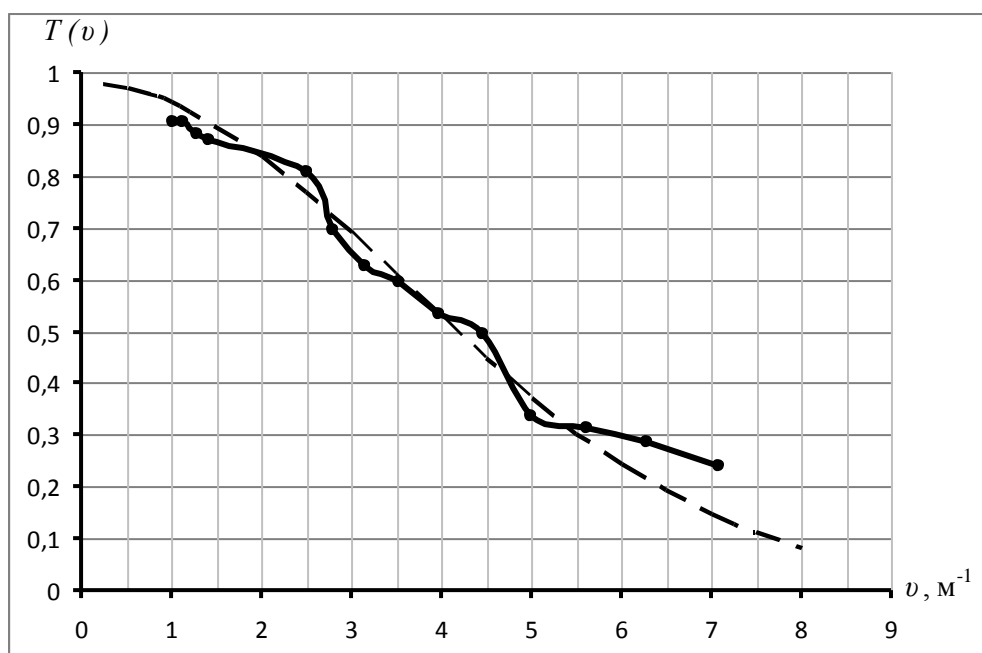


Рис. 5. ФПМ МОЭС (сплошная линия – ФПМ исследуемой МОЭС, штриховая линия – ФПМ типичной МОЭС)

Fig. 5. MTF MOES (full line – MTF of the investigated MOES, dashed line – MTF of typical MOES)

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов:

1. Форма графика экспериментальной ФПМ практически совпадает с формой типичной ФПМ МОЭС, что подтверждает правильность предлагаемого алгоритма определения ФПМ. Отличие в графиках объясняется индивидуальными параметрами конкретной исследуемой МОЭС и недостаточной статистикой измерений.

2. Совмещение графиков экспериментальной и расчетной ФПМ позволяет оценить адекватность и сходимость построенной математической модели, описываемой выражением для $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{расч.}}(v)$, относительно реальной, характеризуемой $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп.}}(v)$ и, как следствие, целесообразность использования математической модели ЦОЭС при проведении испытаний.

3. График экспериментальной ФПМ позволяет определить критерий разрешения исследуемой ЦОЭС и использовать его в дальнейшем при квалиметрии системы с использованием математической модели в различных условиях без выполнения полетов в этих условиях.

В представленном примере по результатам дешифрирования изображения, представленного на рисунке 3, предельно различимой группой штрихов является группа № 1-8 с шириной штриха 0,178 м ($v_{\text{пр}}=5,62 \text{ м}^{-1}$), что в соответствии с рис. 4 соответствует значе-

нию ФПМ, равному 0,31. Полученный результат подтверждается одним из критериев пространственной частоты, соответствующему характерной точке на ФПМ, изложенному в [Молчанов, 2017].

Заключение

Использование критерия качества ЦОЭС, основанного на ФПМ, позволяет получить максимум информации о передаточных свойствах этой системы или отдельного ее звена и производить выбор звеньев и систем, исходя из конкретных специфических требований. Это позволяет синтезировать ЦОЭС ДЗЗ по отдельным звеньям, а с помощью разработанной методики синтеза ФПМ обеспечивается корректный выбор математической модели ЦОЭС при проведении испытаний. Разработанная математическая модель позволяет по результатам определения характеристик ЦОЭС в одном полете адекватно оценивать качество ЦОЭС для различных условий полета без проведения дополнительных полетов.

Список литературы

References

1. Айвазян С.А., Есев А.А., Ткачук А.В., Солдатов А.С., Зыкин А.П. 2013. Комплексная автоматизированная визирная система перспективных авиационных комплексов. Двойные технологии. 64(3): 57–59.

Ayvazyan S.A., Yesev A.A., Tkachuk A.V., Soldatov A.S., Zykin A.P. 2013. Kompleksnaya avtomatizirovannaya vizirnaya sistema perspektivnykh aviatsionnykh kompleksov. Dvoynuyye tekhnologii. 64(3): 57–59 (in Russian).

2. Веселов Ю.Г., Глушко В.А., Молчанов А.С. 2013. Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда. Наука и образование, 9: 219–232.

Veslov Yu.G., Glushko V.A., Molchanov A.S. 2013. Matematicheskaya model' aerofotosistemy, postroyennoy na osnove fotochuvstvitel'nykh priborov s perenosom zaryada. Nauka i obrazovaniye, 9: 219–232 (in Russian).

3. Есев А.А., Лагойко О.С. 2015. Методика автоматизированной обработки изображений в авиационных системах визуального мониторинга внекабинной обстановки. Программные системы и вычислительные методы. 1: 79–88.

Yesev A.A., Lagoyko O.S. 2015. Metodika avtomatizirovannoy obrabotki izobrazheniy v aviatsionnykh sistemakh vizual'nogo monitoringa vnekabinnoy obstanovki. Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody. 1: 79–88 (in Russian).

4. Жилияков Е.Г., Ефимов Н.О. 2015. О субполосном анализе изображений. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 198(1): 118–124.

Zhilyakov Ye.G., Yefimov N.O. 2015. O subpolosnom analize izobrazheniy. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 198(1): 118–124 (in Russian).

5. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А., Заливин А.Н. 2011. О выделении контуров объектов на изображениях земной поверхности. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 1(96): 196–200.

Zhilyakov Ye.G., Chernomorets A.A., Zalivin A.N. 2011. O vydelenii konturov ob'yektov na izobrazheniyakh zemnoy poverkhnosti. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 1(96): 196–200 (in Russian).

6. Захарченко Н.Г., Маматов Е.М., Яцынюк Д.А., Колос Н.В. 2018. Комплексная оценка качества изображения с использованием информационного критерия однородности. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 45(1): 184–191.

Zakharchenko N.G., Mamatov Ye.M., Yatsynyuk D.A., Kolos N.V. 2018. Kompleksnaya otsenka kachestva izobrazheniya s ispol'zovaniyem informatsionnogo kriteriya odnorodnosti. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 45(1): 184–191 (in Russian).

7. Лихошерстный А.Ю., Жилияков Е.Г. 2010. Алгоритмы обработки аэрокосмических изображений на основе частотных представлений. Вопросы радиоэлектроники. 4(1): 73–84.
- Likhosherstnyy A.Yu., Zhilyakov Ye.G. 2010. Algoritmy obrabotki aerokosmicheskikh izobrazheniy na osnove chastotnykh predstavleniy. Voprosy radioelektroniki. 4(1): 73–84 (in Russian).
8. Коломиец Л.В., Федоров М.В., Богомолов А.В., Мережко А.Н., Солдатов А.С., Есев А.А. 2010. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники. Информационно-измерительные и управляющие системы. 8(5): 38–40.
- Kolomiyets L.V., Fedorov M.V., Bogomolov A.V., Merezko A.N., Soldatov A.S., Yesev A.A. 2010. Metod podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu resursami pri ispytaniyakh aviatsionnoy tekhniki. Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy. 8(5): 38–40 (in Russian).
9. Куликов В.Е., Гладкая Д.Ю., Юрченко А.С. 2017. Синтез многосвязной системы автоматического управления траекторным движением самолета в вертикальной плоскости. Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 16: 16–27.
- Kulikov V.E., Gladkaya D.Yu., Yurchenko A.S. 2017. Synthesis of a multiply connected system of automatic control of the trajectory movement of an aircraft in a vertical plane. Proceedings of MIEA. Navigation and aircraft control. 16: 16–27 (in Russian).
10. Куликов В.Е. 2016. Система функционального контроля электромеханического привода самолета с диагностической моделью наблюдения. Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 4: 21–31.
- Kulikov V.Ye. 2016. Sistema funktsional'nogo kontrolya elektromekhanicheskogo privoda samoleta s diagnosticheskoy model'yu nablyudeniya. Trudy FGUP "NPTSAP". Sistemy i pribory upravleniya. 4: 21–31 (in Russian).
11. Молчанов А.С. 2017. Иконические системы воздушной разведки: основы построения, оценка качества и их применение в комплексах с беспилотными летательными аппаратами. Волгоград: Панорама, 216.
- Molchanov A.S. 2017. Ikonicheskiye sistemy vozdushnoy razvedki: osnovy postroyeniya, otsenka kachestva i ikh primeneniye v kompleksakh s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Volgograd: Panorama, 216 (in Russian).
12. Молчанов А.С. 2018. Оценка качества аэрофотосистем методом математического моделирования с использованием критерия Шадэ. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 61(1): 28–33.
- Molchanov A.S. 2018. Otsenka kachestva aerofotosistem metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniyem kriteriya Shade. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka. 61(1): 28–33 (in Russian).
13. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. 2018. Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем и их оценка при проведении летных испытаний. Сборник материалов XIV международной научно-практической конференции. Курск: ЮЗГУ: 178–181.
- Molchanov A.S., Chausov Ye.V. 2018. Matematicheskoye modelirovaniye tsifrovyykh optiko-elektronnykh sistem i ikh otsenka pri provedenii letnykh ispytaniy. Sbornik materialov XIV mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kursk: YUZGU: 178–181.
14. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. 2018. Программный комплекс обработки цифровых изображений. Ахтубинск, 12.
- Molchanov A.S., Chausov Ye.V. 2018. Programmnyy kompleks obrabotki tsifrovyykh izobrazheniy. Akhtubinsk, 12 (in Russian).
15. Молчанов А.С., Чаусов Е.В., Баснин В.Г., Абрамов Д.В. 2017. Анализ процесса дешифрирования изображений штриховых мир видимого диапазона при проведении испытаний аэрофотосистем дистанционного зондирования Земли. М.: Евразийское научное объединение, 75.
- Molchanov A.S., Chausov Ye.V., Basnin V.G., Abramov D.V. 2017. Analiz protsessa deshifirovaniya izobrazheniy shtrikhovykh mir vidimogo diapazona pri provedenii ispytaniy aerofotosistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli. M.: Yevraziyskoye nauchnoye ob'yedineniye, 75 (in Russian).
16. Новикова Н.М., Ноаман С.А. 2012. Компьютерная модель статистического распознавания изображений. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 13(132): 135–141.
- Novikova N.M., Noaman S.A. 2012. Komp'yuternaya model' statisticheskogo raspoznavaniya izobrazheniy. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 13(132): 135–141 (in Russian).

17. Ребрин Ю.К. 1988. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов: учебник. Киев, 449 с.

Rebrin Yu.K. 1988. Optiko-elektronnoye razvedyvatel'noye oborudovaniye letatel'nykh apparatov: uchebnik. Kiyev, 449 (in Russian).

18. Степанов В.С., Комаров Д.Б., Прокофьева А.С., Драган С.П., Богомолов А.В., Дёшин И.А., Фомина Т.В. 2018. Лазерные технологии в задачах обеспечения военной безопасности. Стратегическая стабильность. 2018, 84(3): 16–21.

Stepanov V.S., Komarov D.B., Prokof'yeva A.S., Dragan S.P., Bogomolov A.V., Doshin I.A., Fomina T.V. 2018. Lazernyye tekhnologii v zadachakh obespecheniya voyennoy bezopasnosti. Strategicheskaya stabil'nost'. 2018, 84(3): 16–21 (in Russian).

19. Черноморец А.А. 2012. О вычислительной сложности оценки энергии сигналов и изображений. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 7(126): 101–110.

Chernomorets A.A. 2012. O vychislitel'noy slozhnosti otsenki energii signalov i izobrazheniy. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 7(126): 101–110 (in Russian).

20. Чернуха В.Н., Новокшенов Ю.В., Пляскота С.И. 1994. Основы испытаний авиационной техники. Часть II. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 334.

Chernukha V.N., Novokshonov YU.V., Plyaskota S.I. 1994. Osnovy ispytaniy aviatsionnoy tekhniki. Chast' II. M.: VVIA im. N.Ye. Zhukovskogo, 334 (in Russian).

21. Holst G.C. 2000. Electro-optical imaging system performance, Second Ed., SPIE Optical engineering press. Bellingham, 120.