

# МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Молчанов А.С., Чаусов Е.В.

Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова,

Россия, г. Ахтубинск, ул. Академическая д. 23

andryoe@yandex.ru

*Аннотация: Рассмотрены вопросы математического моделирования цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли на основе аппарата функций передачи модуляции. Представлена структура математической модели и предложена методика калибровки модели на основе апостериорной информации летных экспериментов. Показан положительный эффект от применения калибровки математической модели на этапе летных испытаний.*

Ключевые слова: цифровая оптико-электронная система, математическая модель, функция передачи модуляции, штриховая мира, пространственная частота, летные испытания.

## Введение

Современное состояние проблем оценивания линейного разрешения на местности (ЛРМ) при проведении летных испытаний цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) характеризуется тем, что существующие методики испытаний практически не предусматривают использование математического моделирования на основе аппарата функций передачи модуляции (ФПМ). Это обусловлено недостаточной достоверностью оценок ЛРМ, полученных посредством математического моделирования, поскольку существующие подходы не обеспечивают получение математической модели ЦОЭС ДЗЗ, адекватной задачам летных испытаний. Это объясняется множеством вариантов математического описания моделей ЦОЭС ДЗЗ и большим количеством допущений при составлении математической модели (ММ). А многообразие существующих критериев разрешения при использовании ФПМ и низкая корреляция этих критериев со зрительным восприятием изображений еще более обостряют проблему оценивания ЛРМ путем математического моделирования.

Тем не менее, математическое моделирование ЦОЭС ДЗЗ обладает массой достоинств, основными из которых являются: гибкость и наглядность, возможность исследования процессов любой сложности с учетом большого количества факторов, повторяемость экспериментов, простота в организации, приемлемые затраты (сроки, стоимость).

Поэтому актуальной научно-практической задачей является повышение достоверности результатов испытаний ЦОЭС ДЗЗ, полученных посредством математического моделирования, за счет разработки конкретных предложений по повышению адекватности ММ ЦОЭС ДЗЗ.

Целью настоящего исследования является повышение достоверности ММ ЦОЭС ДЗЗ путем разработки методики калибровки модели на основе использования апостериорной информации летных экспериментов.

## 1 Структура математической модели ЦОЭС ДЗЗ

Математическая модель (ММ) ЦОЭС ДЗЗ – это аналитическое выражение ФПМ, которое характеризует свойство ЦОЭС ДЗЗ воспроизводить пространственные частоты снимаемой сцены с различным качеством по резкости и контрастности. ФПМ отражает ухудшение пространственного разрешения системы, вследствие потерь и искажений при прохождении оптического сигнала через передаточные звенья системы [1, 2].

Выделяются следующие передаточные звенья ЦОЭС ДЗЗ, влияние которых на преобразование оптического сигнала является существенным [3-7]:

- внутренние звенья: отдельные элементы и устройства самой ЦОЭС: объектив, приемник оптического излучения (ПОИ), электронный тракт;
- внешние звенья: атмосфера (турбулентность, энергетическое рассеяние и поглощение аэрозолями и молекулами, уплотнение атмосферы перед защитным окном иллюминатора из-за аэродинамического нагрева), факторы полета носителя (вибрации, смещения изображения, проецируемого на ПОИ вследствие линейных и угловых перемещений носителя, дефокусировка вследствие нарушения нормальных термобарических условий), устройство визуализации изображений, цифровая обработка изображений (ЦОИ), дешифровщик.

В результате ММ ЦОЭС ДЗЗ представляется в виде следующего аналитического выражения:

$$W(\nu) = W_{атм.}(\nu) \cdot W_{пол.}(\nu) \cdot W_{об.}(\nu) \cdot W_{ПОИ}(\nu) \cdot W_{ЭТ}(\nu) \cdot W_{виз.}(\nu) \cdot W_{ЦОИ}(\nu) \cdot W_{деши.}(\nu), \quad (1)$$

где  $W_{атм.}(\nu)$  – ФПМ атмосферы;  $W_{пол.}(\nu)$  – ФПМ, обусловленная условиями полета;  $W_{об.}(\nu)$  – ФПМ объектива;  $W_{ПОИ}(\nu)$  – ФПМ ПОИ;  $W_{ЭТ}(\nu)$  – ФПМ электронного тракта;  $W_{виз.}(\nu)$  – ФПМ устройства визуализации изображений;  $W_{ЦОИ}(\nu)$  – ФПМ ЦОИ;  $W_{деши.}(\nu)$  – ФПМ глаза дешифровщика.

Конкретные аналитические выражения для ФПМ передаточных звеньев, составляющих выражение (1), можно найти в [1-7].

На рисунке 1 изображена структурная схема ММ ЦОЭС ДЗЗ, в которой раскрыты составляющие каждого звена системы.

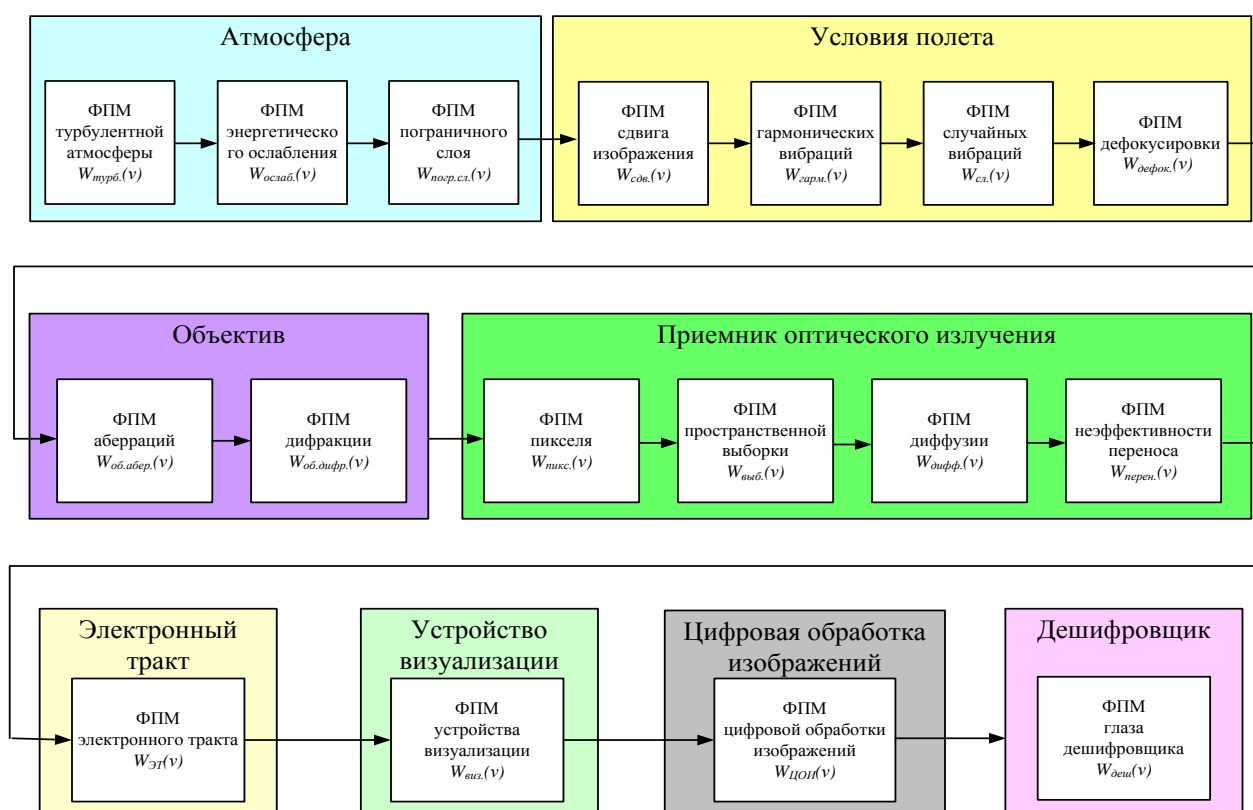


Рис. 1. Структура математической модели ЦОЭС ДЗЗ

С целью повышения достоверности результатов испытаний, полученных с использованием ММ ЦОЭС ДЗЗ, предложен подход по калибровке (уточнению) модели на основе использования апостериорной информации. В качестве апостериорной информации для ММ ЦОЭС ДЗЗ предлагается использовать характеристику, отражающую реальное ухудшение пространственного разрешения ЦОЭС ДЗЗ при ее функционировании в составе летательного аппарата в натуральных условиях. Такой характеристикой является ФПМ, полученная экспериментальным путем в летных условиях. В этом случае калибровка ММ будет заключаться в приведении аналитического выражения ФПМ к виду, обеспечивающего требуемую ее сходимость с экспериментальной ФПМ. В результате сформированная подобным образом новая (откалиброванная) модель позволит оценивать ЛРМ ЦОЭС ДЗЗ без выполнения натуральных экспериментов за счет результатов моделирования, полученных с использованием откалиброванной ММ.

## 2 Методика калибровки математической модели ЦОЭС ДЗЗ

Таким образом, для калибровки ММ ЦОЭС ДЗЗ на основе апостериорной информации летных испытаний необходимо реализовать следующую последовательность действий.

I. Получить апостериорную информацию, для чего определить экспериментальную ФПМ в летном эксперименте.

Определение экспериментальной ФПМ в летном эксперименте производится, принимая во внимание следующие рассуждения. Известно [6], что ФПМ характеризует уменьшение яркостных различий в изображениях объектов (т.е. снижение контраста изображений) с уменьшением

пространственных размеров объектов. В этом случае ФПМ ЦОЭС ДЗЗ  $W(\nu)$  представляет собой зависимость коэффициента передачи модуляции  $T$  от пространственной частоты  $\nu$  [6,7]:

$$W(\nu) = T(\nu) \quad (2)$$

Коэффициент передачи модуляции характеризуется отношением контраста изображения  $K_{из}$  к контрасту объекта  $K_{об}$  для данной пространственной частоты  $\nu$ :

$$T = \frac{K_{из}}{K_{об}} \quad (3)$$

Контраст изображения представляет собой характеристику относительного распределения освещенности  $E$  в изображении объекта и определяется выражением:

$$K_{из} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (4)$$

где  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$  – максимальное и минимальное значения освещенностей изображения объекта.

Определение  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  осуществляется с учетом цифровой (пиксельной) структуры изображений на основе измерений освещенностей пикселей, составляющих цифровое изображение объекта, в значениях уровня серого тона от 0 до 255.

В результате, если на местности расположить штриховую миру видимого диапазона, которая характеризуется контрастом  $K_{об}$  и пространственной частотой следования штрихов  $\nu_i = 1/d_i$ , где  $1, \dots, i$  – количество групп штрихов миры,  $d_i$  – ширина штриха  $i$ -ой группы, выполнить летный эксперимент по аэросъемке миры и далее выполнить дешифрирование полученных аэроснимков миры и на изображениях  $j$ -х дешифрированных (распознанных) групп измерить освещенности светлых ( $E_{\max i}$ ) и темных ( $E_{\min i}$ ) штрихов миры, то можно рассчитать значения коэффициентов передачи модуляции  $T_i$  для каждой распознанной пространственной частоты  $\nu_i$ .

Полученные экспериментальные значения коэффициентов передачи модуляции  $T_i$  позволяют определить графический вид экспериментальной ФПМ  $W_{э}(\nu)$ . Построение графика экспериментальной ФПМ  $W_{э}(\nu)$  осуществляется путем соединения точек с координатами  $(\nu_i; T_i)$  в прямоугольной системе координат, в которой по оси абсцисс откладываются значения пространственной частоты, а по оси ординат – значения коэффициентов передачи модуляции [9-11].

На рисунке 2 представлены варианты исполнения штриховых мир видимого диапазона, используемых при проведении летных испытаний ЦОЭС ДЗЗ: одна мира содержит 5, другая 6 групп штрихов с различной частотой их следования [12-16].



Рис. 2. Штриховые миры видимого диапазона

Графическая зависимость  $W_{э}(\nu)$  является моделью ЦОЭС ДЗЗ, отражающей фактическое изменение пространственного разрешения системы в реальных условиях применения в полете.

Математический вид экспериментальной ФПМ получается в результате решения задачи определения эмпирической формулы на основании экспериментальных данных  $(\nu_i; T_i)$  с использованием численных методов анализа. При этом:

- в качестве аппроксимирующей функции принята экспоненциальная функция двух параметров  $A$  и  $B$  вида [17]:

$$f(x) = \exp\left(- (Ax)^B\right), \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – значения параметров аппроксимации;

- определение наилучших значений параметров аппроксимации  $A$  и  $B$  выполняется с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Таким образом, результатом работы на данном этапе является апостериорная информация в виде эмпирической формулы экспериментальной ФПМ, имеющей вид:

$$W'_3(\nu) = \exp\left(- (A_3\nu)^{B_3}\right), \quad (6)$$

где  $A_3$  и  $B_3$  – значения параметров аппроксимации экспериментальной ФПМ.

II. Построить частную аналитическую ММ ЦОЭС ДЗЗ  $W_q(\nu)$ , имитирующую поведение системы в условиях проведения летного эксперимента, в котором получена экспериментальная ФПМ.

Аналитический вид ФПМ  $W_q(\nu)$  получают путем подстановки в выражения  $W_{атм}(\nu)$ ,  $W_{пол}(\nu)$ ,  $W_{об}(\nu)$ ,  $W_{Полн}(\nu)$ ,  $W_{ЭЛ}(\nu)$ ,  $W_{виз}(\nu)$ ,  $W_{ЦОИ}(\nu)$ ,  $W_{деши}(\nu)$  конкретных значений параметров атмосферы, полета носителя, режима работы ЦОЭС ДЗЗ и условий дешифрирования соответствующие тем, которые были при выполнении летного эксперимента и обработке полученных изображений, и далее формирования обобщенного выражения  $W_q(\nu)$  в соответствии с выражением (1).

III. Определение калибровочного коэффициента для частной аналитической математической модели ЦОЭС ДЗЗ  $W_q(\nu)$ .

Калибровка аналитической ФПМ  $W_q(\nu)$  осуществляется на основе экспериментальной ФПМ и заключается в определении поправочного множителя – калибровочного коэффициента, на который необходимо умножить аналитическую ФПМ  $W_q(\nu)$  с целью компенсации неточностей моделирования и приведения  $W_q(\nu)$  к  $W_3(\nu)$ . Для этого достаточно решить следующее уравнение:

$$W'_3(\nu) - W_q(\nu) \cdot X(\nu) = 0, \quad (7)$$

где  $X(\nu)$  – калибровочный коэффициент.

Поскольку сомножители  $W_{атм}(\nu)$ ,  $W_{пол}(\nu)$ ,  $W_{об}(\nu)$ ,  $W_{Полн}(\nu)$ ,  $W_{ЭЛ}(\nu)$ ,  $W_{виз}(\nu)$ ,  $W_{ЦОИ}(\nu)$ ,  $W_{деши}(\nu)$ , входящие в выражение для ФПМ  $W_q(\nu)$ , представляют собой сложные математические функции различных типов (функции «sinc», Бесселя, экспоненциальные, тригонометрические, степенные), то решение уравнения (7) становится трудновыполнимой задачей. Поэтому необходимо привести математический вид ФПМ  $W_q(\nu)$  к виду, подобному эмпирической формуле экспериментальной ФПМ  $W'_3(\nu)$ . С этой целью осуществляется аппроксимация значений аналитической ФПМ  $W_q(\nu)$  экспоненциальной функцией (5) с использованием МНК. Выражение для аппроксимированной ФПМ частной математической модели будет иметь следующий вид:

$$W'_q(\nu) = \exp\left(- (A_q\nu)^{B_q}\right), \quad (8)$$

где  $A_q$  и  $B_q$  – значения параметров, полученные в результате аппроксимации частной аналитической ФПМ.

Далее осуществляется решение уравнения (7) после подстановки в него выражений (6) и (8), результатом которого является выражение для калибровочного коэффициента:

$$X(\nu) = \exp\left((A_q\nu)^{B_q} - (A_3\nu)^{B_3}\right) \quad (9)$$

IV. Откалибровать ММ ЦОЭС ДЗЗ  $W_q(\nu)$  в соответствии с выражением:

$$W_{an}(\nu) = W_q(\nu) \cdot X(\nu) = W_q(\nu) \exp\left((A_q\nu)^{B_q} - (A_3\nu)^{B_3}\right), \quad (10)$$

где  $W_{an}(\nu)$  – ФПМ ММ ЦОЭС ДЗЗ с учетом апостериорной информации летного эксперимента.

Общее выражение, характеризующее получение множества математических моделей ЦОЭС ДЗЗ, откалиброванных на основе апостериорной информации, которые имитируют поведение системы в  $i$ -х условиях (конфигурациях) без выполнения летных экспериментов в этих условиях (конфигурациях), имеет вид:

$$W_{ani}(\nu) = W_{qi}(\nu) \cdot X_i(\nu) = W_{qi}(\nu) \exp\left((A_i\nu)^{B_i} - (A_3\nu)^{B_3}\right), \quad (11)$$

где  $W_{ani}(\nu)$  – ФПМ ЦОЭС ДЗЗ с учетом апостериорной информации летного эксперимента для  $i$ -го условия (конфигурации);  $W_{qi}(\nu)$  – ФПМ  $i$ -й частной аналитической модели;  $A_i$  и  $B_i$  – значения параметров, полученные в результате аппроксимации  $i$ -й частной аналитической ФПМ при моделировании ЦОЭС ДЗЗ в  $i$ -м условии (конфигурации).

### 3 Результаты экспериментальных исследований

С целью подтверждения сформулированных теоретических положений выполнена сравнительная оценка результатов моделирования с использованием и без использования процедуры калибровки относительно результатов, полученных в ходе летных экспериментов ЦОЭС ДЗЗ. Для обеспечения сопоставимости результатов, в качестве исходных данных при моделировании использовались значения параметров режимов работы ЦОЭС ДЗЗ и полета, соответствующие тем, которые были при выполнении аэросъемки в летных экспериментах.

Сравнительная оценка выполнена по уровню относительной погрешности значений пространственных частот, полученных для значений ФПМ, характеризующих предельное пространственное разрешение (0,8; 0,61; 0,5; 0,368 (ослабление ФПМ в  $e$  раз); 0,3; 0,2; 0,1), при использовании ММ  $W_{an}(v)$ , откалиброванной на основе апостериорной информации, и исходной ММ  $W_{\zeta}(v)$ . При этом за действительные (истинные) значения пространственных частот для тех же значений ФПМ приняты значения, полученные с помощью модели, характеризующейся экспериментальной зависимостью  $W_{\zeta}(v)$ .

Проверка выполнена с использованием результатов аэросъемки штриховых миш, полученных при проведении летных испытаний цифровой аэрофотокамеры (ЦАФК) БЛА «Орлан-10». Фрагмент одного из аэроснимков ЦАФК, полученного при выполнении аэросъемки с высоты 500 м представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Фрагмент аэроснимка с изображением с штриховой миры, полученного ЦАФК

На рисунках 4 – 6 представлены графический вид ФПМ ЦАФК, полученных экспериментальным путем  $W_{\zeta}(v)$  и в результате математического моделирования с использованием  $W_{an}(v)$  и без использования  $W_{\zeta}(v)$  калибровки на основе апостериорной информации.

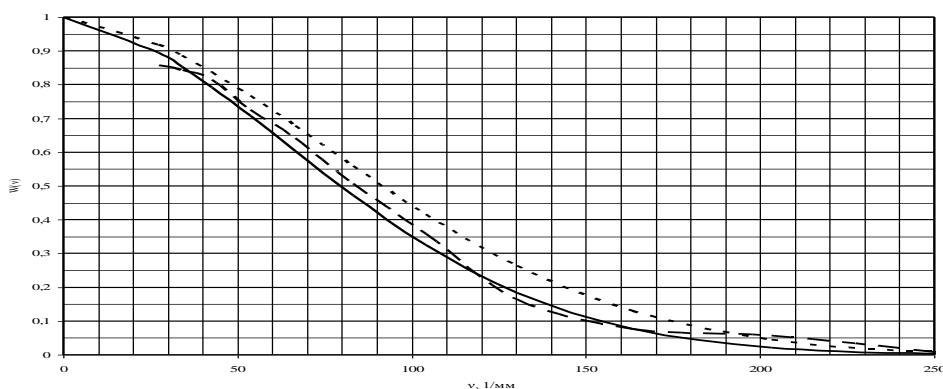


Рис. 4. ФПМ ЦАФК БЛА «Орлан-10» при аэросъемке в надир с высоты полета 500 м:

..... –  $W_{\zeta}(v)$ ; — — — –  $W_{\zeta}(v)$ ; ————— –  $W_{an}(v)$

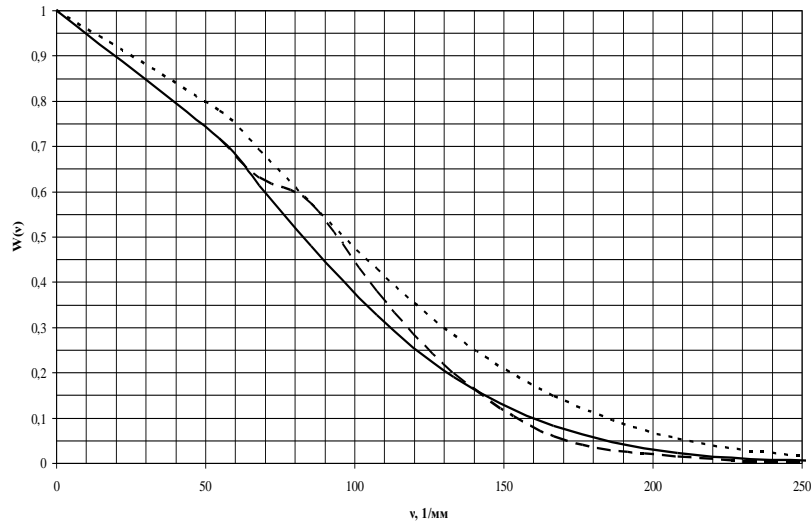


Рис. 5. ФПМ ЦАФК БЛА «Орлан-10» при аэросъемке в надир с высоты полета 1000 м:

.....  $-W_q(v)$ ; - - -  $-W_э(v)$ ; —  $-W_{ан}(v)$

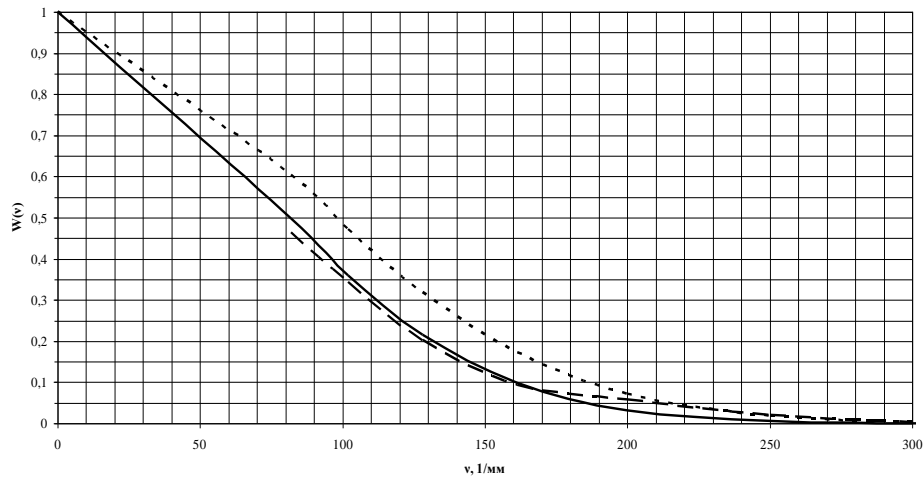


Рис. 6. ФПМ ЦАФК БЛА «Орлан-10» при аэросъемке в надир с высоты полета 1500 м:

.....  $-W_q(v)$ ; - - -  $-W_э(v)$ ; —  $-W_{ан}(v)$

Результаты оценки точности математического моделирования ЦАФК БЛА «Орлан-10» представлены в таблице 1, в которой отражены значения относительной погрешности определения пространственных частот при математическом моделировании с использованием и без использования апостериорной информации.

Таблица 1. Результаты оценки точности математической модели с использованием апостериорной информации

Высота полета, м	W	v, 1/мм			$\frac{ W_q - W_э }{W_э}, \%$	$\frac{ W_{ан} - W_э }{W_э}, \%$
		$W_э(v)$	MM $W_q(v)$	MM $W_{ан}(v)$		
H=500	0,8	45	50	43	11,11111	4,444444
	0,61	71	80	68	12,67606	4,225352
	0,5	85	94	82	10,58824	3,529412
	0,368	103,5	117,5	102,5	13,52657	0,966184
	0,3	111,5	130	112	16,59193	0,44843
	0,1	124	152	131,5	22,58065	6,048387

Высота полета, м	W	v, л/мм			$\frac{ W_q - W_{\text{э}} }{W_{\text{э}}}, \%$	$\frac{ W_{\text{ан}} - W_{\text{э}} }{W_{\text{э}}}, \%$
		W <sub>э</sub> (v)	ММ W <sub>ч</sub> (v)	ММ W <sub>ан</sub> (v)		
	0,2	150	183	160	22	6,666667
H=1000	0,61	77	81	69	5,194805	10,38961
	0,5	95	98	83	3,157895	12,63158
	0,368	110	120	103	9,090909	6,363636
	0,3	118	131	113,5	11,01695	3,813559
	0,1	132,5	153	132	15,4717	0,377358
	0,2	154	187	160,5	21,42857	4,220779
H=1500	0,45	84	97	89	15,47619	5,952381
	0,368	100	120	103	20	3
	0,3	109	132	112	21,10092	2,752294
	0,1	128	153	132	19,53125	3,125
	0,2	159	185	160	16,3522	0,628931
					14,82755	4,421334

Анализ графиков ФПМ, изображенных на рисунках 4 – 6, и результатов, представленных в таблице 1, показывает, что калибровка ММ в соответствии с разработанной методикой увеличивает сходимость моделируемой и экспериментальной ФПМ и повышает достоверность оценок пространственной частоты не менее чем на 10%.

### Заключение

Таким образом, в рамках проведенного исследования получены результаты:

- предложена методика калибровки ММ ЦОЭС ДЗЗ на основе использования апостериорной информации летных экспериментов;
- на примере результатов испытаний ЦАФК БЛА «Орлан-10» показано, что использование процедуры калибровки ММ на основе апостериорной информации, полученной в одном летном эксперименте, повышает достоверность оценок пространственной частоты не менее чем на 10%;
- реализация калибровки ММ ЦОЭС ДЗЗ при проведении испытаний позволит сократить до 35 % объема программы летных испытаний ЦОЭС ДЗЗ на оценку ЛРМ, что обеспечит сокращение продолжительности и трудоемкости испытаний, а также экономию ресурсов.

### Литература

1. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Методика синтеза функции передачи модуляции цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли по результатам летных испытаний // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. 2019, Т.46, № 1. – С.138-148.
2. Веселов Ю.Г., Глушко В.А., Молчанов А.С. Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда // Наука и образование. 2013, Вып. 10. – С.219-232.
3. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем военного назначения при проведении государственных летных испытаний // Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем». 2019. – С. 149-158.
4. Michael C. Dudzik. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. V. 4. – Bellingham: SPIE Optical engineering press, 1993. – 352 p.
5. Holst G.C. Electro-optical imaging system performance. Second Ed. – Bellingham: SPIE Optical engineering press, 2000. – 120 p.
6. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – Киев: КВВАИУ, 1988. – 450 с.
7. Молчанов А.С. Теория построения иконических систем воздушной разведки. – Волгоград: Панорама, 2017. – 224 с.

8. Чаусов Е.В., Молчанов А.С. Программно-методический комплекс обработки изображений при проведении летных испытаний иконических оптико-электронных систем // Геодезия и картография. 2020, Т. 81, № 1. – С.26-33. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-955-1-26-33.
9. Чаусов Е.В., Молчанов А.С. Автоматизированный комплекс обработки цифровых изображений в задаче оценивания линейного разрешения на местности на основе функции передачи модуляции // Сборник трудов международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», Т.1. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С.73-76.
10. Чаусов Е.В., Молчанов А.С. Математическое и программное обеспечение обработки цифровых изображений при оценивании линейного разрешения аэрофотографических систем // Кибернетика и программирование. 2020, № 1. – С.42-52. DOI: 10.25136/2644-5522.2020.1.32974.
11. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Методика оценки качества цифровых оптико-электронных систем на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда с использованием апостериорной информации летных испытаний // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019, Т. 17, № 3. – С.45-51.
12. Koreika N.S. A system engineering approach to imaging. – Bellingham: SPIE Optical Engineering Press. 1998. – 679 p.
13. Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Эффективность цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли в задаче распознавания наземных объектов на основе величин линейного разрешения, полученных по результатам натуральных экспериментов // Информация и космос. 2020, № 3 – С.143-152.
14. Молчанов А.С. Теория и практика дешифрирования объектов авиационной техники иконических оптико-электронных систем. – М.: Перо, 2020. – 171 с.
15. Молчанов А.С., Чаусов Е.В., Баснин В.Г., Абрамов Д.В. Анализ процесса дешифрирования изображений штриховых мир видимого диапазона при проведении испытаний аэрофотосистем дистанционного зондирования Земли. Итоги науки в теории и практике // Евразийское научное объединение. – М., 2017. № 12 (34). – С.54-56.
16. Glenn D. Boreman. Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems. – Bellingham: SPIE, 2001. – 110 p.
17. Сельвесюк Н. И., Веселов Ю. Г., Гайденков А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018, Выпуск № 103. – С.159-174.