

## МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Баврина А.Ю.<sup>1,2</sup>, Мясников В.В.<sup>1</sup>, Сергеев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Предложен метод определения структуры и оценки параметров оптико-электронного тракта (ОЭТ). В основу метода положен анализ перепада яркости на границах изображений объектов, используемый для получения реализации сечения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ОЭТ. Принцип работы метода, позволяющий осуществлять оценку параметров ОЭТ, заключается в минимизации показателя, характеризующего интегральную величину отклонения реализаций сечений АЧХ ОЭТ от математической модели АЧХ, известной с точностью до этих параметров. Экспериментальное исследование иллюстрирует эффективность предложенного метода оценки структуры и параметров ОЭТ и границы его применения.

Ключевые слова: оптико-электронный тракт, амплитудно-частотная характеристика, параметрическая оценка, генетический алгоритм.

### Введение

Задача оценки качества цифровых изображений актуальна в различных прикладных областях. Решение этой задачи позволяет в общем случае ответить на важный практический вопрос – какие прикладные задачи могут быть решены с использованием конкретных изображений, а также оценить потенциально достижимую точность их решения.

Существуют различные подходы к оценке качества изображения [1, 2]. Одним из наиболее универсальных является подход, в котором качество изображения оценивается посредством определения степени искажения анализируемого изображения – идентификацией искажающей системы. Известно, что задача идентификации искажающей системы может быть решена относительно просто при условии наблюдаемости как входного, так и выходного сигнала [3, 4]. Однако в реально действующих системах дистанционного формирования оптических изображений (СДФОИ) доступ к входному изображению, как правило, отсутствует и имеются лишь общие сведения о его характеристиках и структуре.

В настоящее время существует несколько подходов к решению задачи «слепой» идентификации ЛПП-системы только по сигналу на её выходе. Один из методов основан на выявлении нулей спектра выходного сигнала [5, 6]. По выявленным нулям (в двумерном случае траекториям нулей в комплексном пространстве) с точностью до константы восстанавливаются сомножители спектра входного сигнала и частотная характеристика искомой системы. Метод удовлетворительно работает на модельных примерах, когда отсутствует шум наблюдения и входной сигнал пространственно ограничен, но в реальных ситуациях при наличии шумов и бесконечной протяжённости функции яркости оказывается крайне неустойчивым.

Другой метод, называемый методом «слепой деконволюции», предполагает получение модуля частотной характеристики ЛПП-системы через оцени-

ваемый энергетический спектр выходного сигнала и известный энергетический спектр сигнала на входе, а затем восстановление фазы частотной характеристики по модулю [6, 7, 8]. Реализация метода связана с большими вычислительными затратами из-за перехода к спектральному представлению сигналов и медленной сходимости итерационных процедур оценки фазы (и далеко не всегда дающих однозначный результат) [7]. Кроме того, здесь требуются достаточно полные сведения о корреляционных свойствах входного сигнала, описываемого моделью стационарного случайного процесса (поля).

Ещё один известный метод – это метод «выявления границ» [6, 9, 10], модификация которого использована в данной работе. Для работы этого метода требуется интерактивное (выполняемое оператором) или автоматическое [11, 12, 13] нахождение на анализируемом изображении участков с прямолинейными границами, разделяющими «постоянные» по яркости области. Примерами таких участков для аэрофото- или космических изображений Земли могут являться переходы типа «тротуар – дом», «одна сторона крыши – другая сторона крыши», «тротуар – земля» и т.п. Для каждой такой границы указывается один или несколько отрезков, пересекающих эту границу строго перпендикулярно и заданных координатами начала и окончания. По этой информации формируется набор одномерных сигналов – сечений функции яркости изображения вдоль соответствующих отрезков. На основании теоремы о Фурье-сечении [6] существует связь между Фурье-образами производной функции такого сечения и сечением (под определённым углом) АЧХ искажающей системы. Недостаток этого метода заключается в том, что нет оснований полагать, что на изображениях имеются границы различной ориентации в количестве, достаточном для построения непараметрической оценки импульсной характеристики (ИХ) искажающей системы (по сути – построе-

ния изображения АЧХ или ИХ). Возможным способом устранения такого недостатка может являться уменьшение числа оцениваемых параметров. Это может быть сделано путём внесения ограничений на вид АЧХ. Например, можно считать АЧХ радиальной – в этом случае оценке подлежит одномерный сигнал – сечение АЧХ вдоль луча, проведённого из центра АЧХ.

Альтернативой, позволяющей существенно сократить число оцениваемых параметров, является использование параметрической оценки. Использование параметрического оценивания предполагает наличие математической модели искажающей системы с малым числом неизвестных параметров. Именно этот способ предлагается в представленной работе: система искажений ОЭТ полагается заданной с точностью до ряда параметров, что переводит задачу прямой оценки АЧХ (или конечной ИХ) ОЭТ к задаче её параметрического оценивания.

Работа организована следующим образом. Формальная постановка задачи параметрического оценивания дана в первом разделе. Во втором разделе описываются компоненты ОЭТ и вводится вектор независимых параметров АЧХ ОЭТ. В третьем разделе представлен предлагаемый алгоритм определения параметров ОЭТ. Экспериментальное исследование, направленное на определение степени эффективности и границ применимости предложенного метода, дано в четвёртом разделе. В заключение работы приведены выводы и рекомендации, основанные на результатах исследования, благодарности и список использованной литературы.

### 1. Постановка задачи оценивания параметров ОЭТ

Пусть  $f(x_1, x_2)$  – функция яркости анализируемого изображения,  $\{l_n(t)\}_{n=0}^{N-1}$  – набор одномерных сигналов сечений функции яркости изображения вдоль соответствующих отрезков ( $N$  – их количество):

$$l_n(t) = f(x_1^n + \cos(\phi_n)t, x_2^n + \sin(\phi_n)t),$$

$$n = 0, N-1.$$

Здесь  $(x_1^n, x_2^n), \phi_n$  – параметры, определяющие, соответственно, расположение и ориентацию  $n$ -го отрезка-сечения функции яркости, расположенного перпендикулярно «идеальной» границе. На основании теоремы о Фурье-сечении [6] связь одномерного сигнала  $l_n(t)$  с двумерной АЧХ  $H(\Omega_1, \Omega_2)$  искажающей системы анализируемого изображения определяется следующим образом:

$$H(\Omega \cos(\phi_n), \Omega \sin(\phi_n)) = L_n(\Omega), \tag{1}$$

где величина  $L_n(\Omega)$ , определяемая выражением

$$L_n(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial l_n(t)}{\partial t} e^{-it\Omega} dt,$$

– Фурье-образ производной одномерного сигнала.

Учитывая возможную «неидеальность» выбранных границ на реальном изображении, наличие шумов и других факторов, соотношение (1) следует интерпретировать приближённо. Таким образом, в качестве исходной информации для параметрического оценивания мы имеем множество реализаций сечений АЧХ в виде  $\{H(\Omega \cos(\phi_n), \Omega \sin(\phi_n))\}_{n=0}^{N-1}$ . Задача состоит в получении оценки АЧХ в виде:

$$H_{atm}(\Omega_1, \Omega_2) H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) H_{ccd}(\Omega_1, \Omega_2), \tag{2}$$

которая в некотором смысле наилучшим образом согласована с набором реализаций  $\{H(\Omega \cos(\phi_n), \Omega \sin(\phi_n))\}_{n=0}^{N-1}$ . В выражении (2):

$H_{atm}(\Omega_1, \Omega_2)$  – АЧХ атмосферы;

$H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2)$  – АЧХ оптической системы;

$H_{ccd}(\Omega_1, \Omega_2)$  – АЧХ устройства регистрации сигнала (например, прибора с зарядовой связью – ПЗС).

Пусть далее  $\bar{a}$  – вектор параметров модели АЧХ ОЭТ (2), которую ниже кратко обозначаем  $H_{\bar{a}}(\Omega_1, \Omega_2)$ . Тогда формальная задача параметрического оценивания может быть сформулирована как задача безусловного минимума функционала отклонения параметризованной модельной АЧХ  $H_{\bar{a}}(\Omega_1, \Omega_2)$  от реализаций сечений АЧХ, полученных по анализируемому изображению:

$$J(\bar{a}) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} F \left( \begin{matrix} H(\Omega \cos(\phi_n), \Omega \sin(\phi_n)) \\ -H_{\bar{a}}(\Omega_1, \Omega_2) \end{matrix} \right) \rightarrow \min_{\bar{a}}, \tag{3}$$

где  $F(\dots)$  – некоторая выпуклая функция, например, квадрат или модуль.

### 2. Состав и параметры ОЭТ

Рассмотрим АЧХ составляющих ОЭТ.

АЧХ атмосферы допускает довольно точную гауссовскую аппроксимацию [2]:

$$H_{atm}(\Omega_1, \Omega_2) = \exp(-0,5r^2(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)),$$

где  $r$  – параметр, служащий оценкой радиуса «пятна размытия» двумерного сигнала.

АЧХ оптической системы имеет следующий вид:

$$H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{\Omega_0^2}\right) - \sqrt{\frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{\Omega_0^2}} \sqrt{1 - \frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{\Omega_0^2}} \right], & \frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{\Omega_0^2} < 1, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Здесь  $\Omega_0$  – частота среза оптической системы, определяемая в соответствии с соотношением:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi d}{H\lambda},$$

где  $d$  – диаметр зрачка,  $H$  – расстояние наблюдения,  $\lambda$  – длина волны светового излучения. Учитывая взаимную зависимость четырёх указанных параметров, независимым параметром для оптической системы выберем частоту её среза  $\Omega_0$ .

В общем случае АЧХ виртуальной апертуры идеализированного датчика ПЗС имеет вид кратного произведения

$$H_{ccd}(\Omega_1, \Omega_2) = \prod_{j=0}^4 H_j(\Omega_1, \Omega_2), \tag{4}$$

в котором каждый из пяти сомножителей допускает определённую физическую интерпретацию [14]. В частности, пусть рассматриваемый ПЗС-датчик представляет собой матрицу  $M_1 \times M_2$  прямоугольных фоточувствительных электродов размером  $L_1 \times L_2$  каждый, расположенных на плоскости с шагами  $S_1$  и  $S_2$  по вертикали и горизонтали соответственно. Пусть, далее, изображение (поле интенсивности излучения) в плоскости датчика смещается с постоянной скоростью  $V_1$  по вертикали («догоняя» зарядовые пакеты) и  $V_2$  по горизонтали, а через интервалы времени  $\Theta$  происходит сдвиг каждой ячейки (зарядового пакета) на один электрод вниз по плоскости датчика,  $K$  – количество электродов в накапливающей ячейке ПЗС. Тогда сомножители (4) представимы в виде следующих выражений:

$$H_0(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{4 \sin \frac{\Omega_1 L_1}{2} \sin \frac{\Omega_2 L_2}{2}}{\Omega_1 L_1 \cdot \Omega_2 L_2}$$

– частотная характеристика системы, усредняющей двумерный сигнал по площади электрода ПЗС;

$$H_1(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin PK}{K \sin P}$$

– частотная характеристика системы, описывающей формирование накапливающей ячейки из  $K$  электродов;

$$H_2(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin Q}{Q}$$

– частотная характеристика «смаза» сигнала из-за различия непрерывного движения изображения и скачкообразного движения ячейки;

$$H_3(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin[(Q-P)(M_1-K+1)]}{(M_1-K+1)\sin(Q-P)}$$

– частотная характеристика «смаза» за счёт накопления зарядового пакета в  $(M_1-K+1)$  различных положениях ячейки при рассогласовании средней скорости её движения со скоростью изображения;

$$H_4(\Omega_1, \Omega_2) = \exp\left\{i\left[Q(M_1+K-1)-P(M_1-1)\right]\right\}$$

– чисто фазовая частотная характеристика, отражающая сдвиг выходного сигнала относительно входного. В приведённых выражениях для краткости введены обозначения:

$$P = \frac{\Omega_1 S_1}{2}, \quad Q = \frac{(\Omega_1 V_1 + \Omega_2 V_2) \Theta}{2},$$

и для каждого сомножителя из (4) выполняются условия нормировки  $H_j(0,0) = 1$  ( $j = \overline{0,4}$ ). Заметим,

что если пренебречь сдвигом выходного сигнала, отбросив в формуле (4) последний множитель, то АЧХ виртуальной апертуры ПЗС оказывается вещественной, а соответствующая импульсная характеристика – центрально-симметричной.

Для задачи параметрической оценки ОЭТ выражение (4) будем рассматривать в «идеализированной» ситуации, когда ОЭТ оказывается сбалансированным, то есть в нём на этапах проектирования и выбора режима использования устранены все возможные искажения. Это достигается в следующей ситуации:

- ячейки расположены без «зазоров»:  $S_1 = L_1, S_2 = L_2$ ;
- горизонтальное смещение отсутствует:  $V_2 = 0$ ;
- период вертикального сдвига заряда в ПЗС синхронизирован со скоростью движения изображения и размером ячейки:  $S_1 = V_1 \Theta$ .

В этом случае выражение (4) преобразуется к виду:

$$H_{ccd}(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin\left(\frac{\Omega_1 L_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_2 L_2}{2}\right) \sin\left(K \frac{\Omega_1 L_1}{2}\right)}{\frac{\Omega_1 L_1}{2} \frac{\Omega_2 L_2}{2} K \frac{\Omega_1 L_1}{2}}.$$

Как видно из этого выражения, независимыми параметрами АЧХ виртуальной апертуры идеализированного датчика ПЗС в этом случае являются величины  $K, L_1, L_2$ . А остальные параметры ПЗС  $S_1, S_2, \Theta, V_1, V_2$  определяются на основании вышеприведённых соотношений.

Окончательно, вектор  $\bar{a}$  параметров ОЭТ состоит из следующих величин:  $r, \Omega_0, K, L_1, L_2$ .

### 3. Алгоритм определения параметров ОЭТ

В выражении (3) зададим функцию  $F$  в виде квадрата:

$$F(H(\Omega_1, \Omega_2) - H_{\bar{a}}(\Omega_1, \Omega_2)) = (H(\Omega_1, \Omega_2) - H_{\bar{a}}(\Omega_1, \Omega_2))^2.$$

Для определения решения задачи (3) предложен следующий численный алгоритм, состоящий из двух этапов.

### Этап 1. Локализация решения

Производится локализация искомого решения путём решения задачи (3) с помощью генетического алгоритма [15, 16]. Основными операциями генетического алгоритма являются селекция, скрещивание и мутация. Эти операции выполняются последовательно над набором (множеством) хромосом. В качестве отдельной хромосомы используется вектор независимых параметров  $(r, \Omega_0, K, L_1, L_2)$ . При таком выборе указанные операции генетического алгоритма реализуются наиболее простым и естественным образом. Кроме того, генетический алгоритм позволяет просто реализовать ограничения, присущие отдельным параметрам. Например,  $K$  является целой положительной величиной, задаваемой в определённом интервале; размеры ячеек ПЗС  $L_1, L_2$  также имеют определённый диапазон, связанный с развитием нанотехнологий и т.п.

### Этап 2. Уточнение решения

Окончательное решение задачи оптимизации – искомый вектор параметров  $\bar{a} = (K, L_1, L_2, \Omega_0, r)$ , обеспечивающий минимум функционала в (2), – находится методом градиентного спуска, в котором частные производные функционала из (3) по компонентам вектора  $\bar{a}$  находятся аналитически, а начальной точкой поиска является решение, полученное с помощью генетического алгоритма. Выражение для пересчёта вектора параметров в градиентном алгоритме имеет вид:

$$\bar{a}(m+1) = \bar{a}(m) - \rho \frac{\partial J(\bar{a})}{\partial \bar{a}} \Big|_{\bar{a}=\bar{a}(m)} \quad (\rho > 0).$$

Модификация параметра  $K$  не используется по причине его дискретного характера.

### 4. Экспериментальное исследование

В рамках экспериментального исследования рассматривались следующие вопросы:

- зависимость качества оценки от количества сечений  $N$ , определение рекомендуемого количества;
- зависимость качества оценки от отношения сигнал/шум и квантования;
- зависимость качества оценки от числа и состава оцениваемых параметров;
- зависимость качества оценки от параметров сигнала и ОЭТ (то есть соотношение между граничными частотами по дискретизации и частотой пропускания искажающей системы);
- граница применимости предложенного метода параметрической оценки ОЭТ;
- применимость метода для решения задачи идентификации ОЭТ, подразумевающей определение как конструкции (состава элементов) ОЭТ, так и его параметров.

Далее используются следующие обозначения.

Ошибка  $\varepsilon(p)$  оценки  $\hat{p}$  некоторого независимого параметра  $p$  определяется по формуле:

$$\varepsilon(p) = \frac{|p - \hat{p}|}{p} * 100\%,$$

где  $\hat{p}$  – численное значение оценки этого параметра. Для группы параметров ошибка записывается как максимум ошибок по всем параметрам, например:

$$\varepsilon(L_1, L_2, K) = \max_{p \in \{L_1, L_2, K\}} \varepsilon(p).$$

В проведённых исследованиях также контролировалась ошибка представления собственно АЧХ ОЭТ:

$$\varepsilon_{AFR}^2(p_1, p_2) = \frac{\sum_{m,n} (H_{p_1, p_2}(m, n) - H_{\hat{p}_1, \hat{p}_2}(m, n))^2}{\sum_{m,n} (H_{p_1, p_2}(m, n))^2}.$$

Здесь  $H_{p_1, p_2}(m, n)$  – АЧХ ОЭТ, рассчитанная при «истинных» значениях оцениваемых параметров  $p_1, p_2$ ;  $H_{\hat{p}_1, \hat{p}_2}(m, n)$  – АЧХ ОЭТ, рассчитанная при оцененных значениях этих параметров  $\hat{p}_1, \hat{p}_2$ . Суммирование в приведённом выражении ведётся по всей области определения анализируемой дискретной АЧХ, задаваемой в плоскости выходного изображения.

Приводимые ниже иллюстративные результаты соответствуют обработке изображений, полученных в результате моделирования искажений ОЭТ изображения, приведённого на рис. 1.

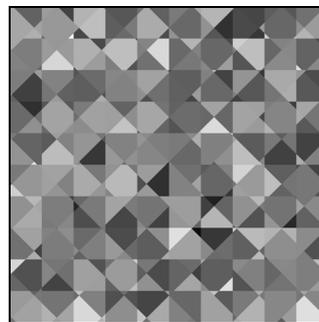


Рис. 1. Исходное (неискаженное) изображение, используемое при исследовании алгоритма параметрической оценки

Поскольку используемое изображение «идеально» подходит для алгоритма реализации метода выделения границ (в отличие от реальных изображений), получаемые ниже результаты можно рассматривать как оптимистичные.

При выбранном исходном изображении для экспериментов требуемые сечения функции яркости  $L_n(\Omega)$  могут быть легко получены в достаточном количестве интерактивно (указаны оператором с приемлемой точностью) или автоматически (информация о границах между однородными областями может быть сохранена при построении изображения на рис. 1). Исходное изображение подвергалось искажениям ОЭТ с известными параметрами, и затем производилась оценка этих параметров (по

отдельности или группами – см. таблицу 3) предложенной реализацией метода выделения границ.

Моделируемые искажения ОЭТ характеризовались линейной частью (описываемой выражением (2)) и мощностью аддитивного белого шума. В исследовании значение радиуса пятна размытия в выделении для АЧХ атмосферы полагалось  $r=0,5$ .

Входное изображение имеет шаг дискретизации  $\Delta t_1 = 1$  (в метрах), что соответствует предельной отображаемой частоте  $\Omega_1 = \frac{\pi}{\Delta t_1} = \pi$ . Выходные изображения имеют шаги дискретизации  $\Delta t_2 = 1$  (в метрах, передискретизация отсутствует) и  $\Delta t_2 = 2,7$  (передискретизация присутствует). Эти шаги соответствуют предельным отображаемым частотам  $\Omega_2 = \frac{\pi}{\Delta t_2} = \pi$  и  $\Omega_2 = 1,16$ . Параметры линейной части тракта подбирались таким образом, чтобы обеспечить рассмотрение трёх ситуаций, представленных в таблице 1.

Варианты шумовых искажений представлены в таблице 2. Варианты оцениваемых параметров и их групп приведены в таблице 3. Заметим, что последняя группа соответствует ситуации, когда оценка производится не только для значений параметров ОЭТ, но и для его структуры (конструкция ОЭТ). Далее в таблицах 4-9 приведены результаты исследования зависимостей ошибок оценивания параметров и АЧХ для различных ситуаций.

Таблица 1. Варианты анализируемых ситуаций

Ситуация	Комментарий
$\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$	Передискретизация не производится. Шаг дискретизации достаточен для представления АЧХ ОЭТ (нет потерь информации, вносимых дискретизацией).
$\Omega_1 = \Omega_2 < \Omega^*$	Передискретизация не производится. Шаг дискретизации не достаточен для представления АЧХ ОЭТ (есть потери информации в результате дискретизации).
$\Omega_2 \leq \Omega^* < \Omega_1$	Передискретизация производится. Шаг дискретизации в новом изображении не достаточен для представления АЧХ ОЭТ. Данная ситуация соответствует реально используемому ОЭТ (есть потери информации в результате дискретизации).

Таблица 2. Варианты шумовых искажений

Дисперсия шума	Уровень сигнал/шум (дБ)
0	$\infty$
1	32,04
4	26,02
9	22,50

Таблица 3. Варианты групп оцениваемых параметров

Группа параметров для идентификации	Комментарий
$d$	диаметр оптической системы
$L_1$	вертикальный размер ячейки
$L_1, L_2$	вертикальный и горизонтальный размер ячейки
$L_1, L_2, K$	вертикальный и горизонтальный размер ячейки, число электродов в ячейке (идентификация параметров и конструкции ОЭТ)

Таблица 4. Зависимость ошибки оценивания параметра  $\varepsilon(L_1)$  от числа используемых сечений  $N$  функции яркости. Ситуация  $\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$

Дисперсия шума	$N=20$	$N=100$	$N=1000$
0	5,773	5,421	2,321
1	2,124	0,284	1,903
4	3,985	9,525	9,063
9	99,961	65,535	19,031

Таблица 5. Зависимость ошибки оценивания параметров  $\varepsilon(\cdot)$  от ситуации

Дисперсия шума	$\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2, \varepsilon(L_1)$	$\Omega_1 = \Omega_2 < \Omega^*, \varepsilon(d)$
0	5,421	13,436
1	0,284	21,383
4	9,525	144,336
9	65,535	2497,334

Таблица 6. Зависимость ошибки оценивания параметров  $\varepsilon(\cdot)$  от их состава. Число сечений  $N=100$ . Ситуация  $\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$

Дисперсия шума	$L_1$	$L_1, L_2$	$L_1, L_2, K$
0	5,421	6,380	33,333
1	0,284	9,091	133,333
4	9,525	10,567	166,667
9	65,535	99,871	200,000

Таблица 7. Зависимость ошибки оценивания АЧХ  $\varepsilon_{AFR}^2(\cdot)$  от состава оцениваемых параметров. Число сечений  $N=100$ . Ситуация  $\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$

Дисперсия шума	$L_1$	$L_1, L_2$	$L_1, L_2, K$
0	0,013	0,296	0,303
1	0,009	0,178	0,390
4	0,101	0,174	0,454
9	0,121	0,175	0,666

Таблица 8. Зависимость ошибки оценивания параметров  $\varepsilon(\cdot)$  от их состава. Число сечений  $N=100$ . Ситуация

$$\Omega_2 \leq \Omega^* < \Omega_1$$

Дисперсия шума	$d$	$L_1$	$L_1, L_2$	$L_1, L_2, K$
0	37,484	102,629	82,340	309,326
1	36,468	96,893	79,979	296,075
4	32,984	84,985	73,000	274,331
9	26,227	55,661	92,202	183,004

Таблица 9. Зависимость ошибки оценивания АЧХ  $\varepsilon_{AFR}^2(\cdot)$  от состава оцениваемых параметров. Число сечений  $N=100$ . Ситуация  $\Omega_2 \leq \Omega^* < \Omega_1$ 

Дисперсия шума	$d$	$L_1$	$L_1, L_2$	$L_1, L_2, K$
0	0,138	0,181	0,220	0,218
1	0,097	0,184	0,256	0,224
4	0,088	0,179	0,203	0,239
9	0,063	0,103	0,165	0,136

### Выводы и рекомендации

На основании полученных результатов, некоторые из которых представлены в приведённых выше таблицах, можно сделать следующие выводы относительно эффективности и границ применимости разработанного алгоритма параметрической оценки ОЭТ.

1) Наблюдается рост качества и устойчивости оценки от количества используемых сечений/границ функции яркости; рекомендуемое количество сечений  $N=100$ .

2) Зависимость качества оценки от отношения сигнал/шум (и, как следствие, квантования) чаще всего не носит монотонный характер. Возможная причина такого поведения – наличие дополнительных шумов и искажений, вносимых дискретным характером изображения и, как следствие, используемыми алгоритмами интерполяции. Уровень влияния на результат для таких искажений оказывается сопоставимым с уровнем искажения, вносимым шумами, или большим.

3) Достаточно качественная оценка параметров возможна только для ситуации  $\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$  (потери информации за счёт дискретизации отсутствуют), причём когда «конструкция ОЭТ» оказывается известной. В этом случае качество тем выше, чем меньше число идентифицируемых параметров.

4) Для ситуаций  $\Omega_2 \leq \Omega^* < \Omega_1$  и  $\Omega_1 = \Omega_2 < \Omega^*$  (происходят потери информации за счёт дискретизации, наиболее реальная ситуация) оценка как отдельных параметров тракта, так и определение его конструкции (состав звеньев ОЭТ) практически невозможна: ошибки при идентификации отдельных параметров оказываются не менее 30%. Несмотря на это, «поточечная» оценка АЧХ происходит с прием-

лемым качеством (ошибка на уровне 20%), что подтверждает корректность работы предложенного метода оценки.

Исходя из перечисленных выводов, принципиальной границей применимости алгоритмов параметрической оценки ОЭТ является ситуация  $\Omega^* < \Omega_1 = \Omega_2$ . Для практически более важной ситуации, когда  $\Omega_2 \leq \Omega^* < \Omega_1$ , «качественная» параметрическая оценка оказывается практически невозможной. Идентификация ОЭТ, подразумевающая определение конструкции ОЭТ и оценку её параметров, оказывается практически невозможной ни в одной из рассматриваемых ситуаций.

### Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке:

- грантов РФФИ, проекты 09-01-00434-а, 11-07-12060-офи-м-2011, 11-07-12062-офи-м-2011;
- программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы информатики и информационных технологий», проект 2.12;
- целевой программы Президиума РАН «Поддержка молодых учёных».

### Литература

1. Прэтт, У.К. Цифровая обработка изображений. Кн.1. / У.К. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – 312 с.
2. Прэтт, У.К. Цифровая обработка изображений. Кн.2. / У.К. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
3. Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
4. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 688 с.
5. Бакалов, В.П. Цифровой алгоритм восстановления пространственно-ограниченного сигнала по свёртке с неизвестной искажающей функцией / В.П. Бакалов, Ю.Ю. Мартюшев, Н.П. Русских // Автометрия. – 1988. – N. 1. – С. 101-103.
6. Бейтс, Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннелл. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
7. Василенко, Г.И. Восстановление изображений / Г.И. Василенко, А.М. Тараторин. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
8. Стокхэм, Т. Цифровое восстановление сигналов посредством неопределённой инверсной свёртки / Т. Стокхэм, Т. Кэннон, Р. Ингебретсен // ТИИЭР. – 1975. – № 4. – С. 160-177.
9. Мельканович, А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация / А.Ф. Мельканович. – М.: Изд-во Министерства обороны, 1984. – 576 с.
10. Хуанг, Т. Обработка изображений / Т. Хуанг, В. Шрейбер, О. Третьяк // Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин. – М.: Мир, 1973. – С. 17-47.
11. Myasnikov, V.V. Computer program for automatic estimation of digital image quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Pattern Recognition and Image Analysis, 2011. – Vol. 21, N. 3. – P. 415-418.

12. **Гашников, М.В.** Обнаружение информативных фрагментов в задаче оценки качества изображений / М.В. Гашников, В.В. Мясников // 8-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации – 2010». – М.: МАКС Пресс, 2010. – С. 325-328.
13. **Myasnikov, V.V.** Software System for Identification of Optoelectronic Digital Imaging Systems and Estimation of Their Quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Proceedings of the 10-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information technologies (PRIA-10'2010), St-Peterburg, Russian Federation. – St. Petersburg: Politechnika, 2010. – Vol. 2. – P. 109-112.
14. **Белоусова, М.П.** Математическое моделирование ПЗС-видеодатчика с временной задержкой и накоплением / М.П. Белоусова, В.В. Сергеев // Самарский авиационный институт. – Самара, 1991. – 45 с.
15. **Goldberg, D.E.** Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning / D.E. Goldberg. – Boston, MA: Addison-Wesley Co., Inc., 1989. – 154 p.
16. **Holland, J.H.** Adaptation in natural and artificial systems / J.H. Holland. – Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 183 p.

### References

1. **Pratt, W.K.** Digital image processing / W.K. Pratt. – Moscow: “Mir” Publisher, 1982. – B.1. – 312 p. – (in Russian).
2. **Pratt, W.K.** Digital image processing / W.K. Pratt. – Moscow: “Mir” Publisher, 1982. – B.2. – 480 p. – (in Russian)
3. **Tsyppkin, Ya.Z.** Foundations of the information identification theory / Ya.Z. Tsyppkin. – Moscow.: “Nauka” Publisher, 1984. – 320 p. – (in Russian).
4. **Eikhoff, P.** The basics of control system identification / P. Eykhoff. – Moscow: “Mir” Publisher, 1975. – 688 p. – (in Russian).
5. **Bakalov, V.P.** Digital algorithm for reconstruction of spatially bounded signal after its convolution with unknown. distorting function / V.P. Bakalov, Yu.Yu. Martyushev, N.P. Russkikh // Avtometriya. – 1988. – N 1. – P. 101-103. – (in Russian).
6. **Bates, R.H.T.** Image restoration and reconstruction / R.H.T. Bates, M.J. Mc-Donnell. – Moscow: “Mir” Publisher, 1989. – 336 p. – (in Russian).
7. **Vasilenko, G.I.** Image restoration / G.I. Vasilenko, A.M. Taratorin. – Moscow: “Radio i svyaz” Publisher, 1986. – 304 p. – (in Russian).
8. **Stockham, T.G.** Digital signal reconstruction by means of an indefinite inverse convolution / T.G. Stockham, T.M. Cannon, R.B. Ingebretsen // TIHER. – 1975. – N 4. – P. 160-177. – (in Russian).
9. **Mel'kanovich, A.F.** Photographic facilities and their operation / A.F. Mel'kanovich. – Moscow: Publisher of Department of Defense, 1984. – 576 p. – (in Russian).
10. **Huang, T.S.** Image processing / T.S. Huang, W.F. Schreiber, O.J. Tretiak // Image processing using of digital computers. – Moscow: “Mir” Publisher, 1973. – P. 17-47. – (in Russian).
11. **Myasnikov, V.V.** Computer program for automatic estimation of digital image quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Pattern Recognition and Image Analysis, 2011. – Vol. 21, N. 3. – P. 415-418.
12. **Gashnikov, M.V.** Detection of informative fragments in the problem of estimation of image quality / M.V. Gashnikov, V.V. Myasnikov // The 8-th International Conference «Intellectualization of information processing – 2010», Moscow: “Max Press” Publisher, 2010. – P. 325-328. – (in Russian).
13. **Myasnikov, V.V.** Software System for Identification of Optoelectronic Digital Imaging Systems and Estimation of Their Quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Proceedings of the 10-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information technologies (PRIA-10'2010), St-Peterburg, Russian Federation. – St. Petersburg: Politechnika, 2010. – Vol. 2. – P. 109-112.
14. **Belousova, M.P.** Mathematical modeling of a CCD video sensor with a time delay and the accumulation / M.P. Belousova, V.V. Sergeev // Samara aviation institute. – Samara, 1991. – 45 p. – (in Russian).
15. **Goldberg, D.E.** Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning / D.E. Goldberg. – Boston, MA: Addison-Wesley Co., Inc., 1989. – 154 p.
16. **Holland, J.H.** Adaptation in natural and artificial systems / J.H. Holland. – Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 183 p.

## METHOD OF PARAMETRIC ESTIMATION OF OPTOELECTRONIC TRACT OF REMOTE SENSED OPTICAL IMAGE FORMATION

*A.Yu. Bavrina<sup>1,2</sup>, V.V. Myasnikov<sup>2</sup>, A.V. Sergeev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,*

<sup>2</sup> *Image Processing Systems Institute of the RAS*

### Abstract

Method of definition of a structure and estimation of parameters of optoelectronic tract (OET) is suggested in the work. The method uses the places of «jump» of image intensity function, that occurs on the borders of imaged objects, for obtaining of realizations of sections of amplitude frequency response (AFR) of OET. The principle of the method that allows to fulfill the OET parameters estimation consists in minimization of the criterion that characterizes cumulative value of the difference between realizations of AFR sections and mathematical model of AFR that is known up to these parameters. Experimental investigation illustrates the effectiveness of suggested method of OET structure and parameters estimation and the limits of its competence.

**Key words:** optoelectronic tract, amplitude frequency response, parametric estimation, genetic algorithm.

*Сведения об авторах*

**Баврина Алина Юрьевна**, 1980 года рождения. В 2003 г. окончила Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В 2006 защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. В настоящее время работает научным сотрудником в Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН и по совместительству ассистентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, геоинформатику, распознавание образов. Имеет 26 публикаций, из них 8 статей. Является членом Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.

E-mail: [alina@smr.ru](mailto:alina@smr.ru).

**Alina Yurievna Bavrina** (1980 b.), graduated from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) at 2003, received her PhD in Technical sciences at 2006. At present she is a researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of assistant at SSAU's Geoinformatics and Information Security sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics, pattern recognition. She is co-author of 26 scientific papers, including 8 articles. She is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.



**Мясников Владислав Валерьевич**, 1971 года рождения. В 1994 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В 1995 году поступил в аспирантуру СГАУ, в 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, а в 2008 – диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником в Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН и, одновременно, доцентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, геоинформатику, нейронные сети, компьютерное зрение, распознавание образов и искусственный интеллект. Имеет около 100 публикаций, в том числе 40 статей и две монографии (в соавторстве). Член Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MyasVV.htm>.

E-mail: [vmyas@smr.ru](mailto:vmyas@smr.ru).

**Vladislav Valerievich Myasnikov** (1971 b.), graduated (1994) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical sciences (2002) and DrSc degree in Physics & Maths (2008). At present he is a leading researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, and ), holding a part-time position of Associate Professor at SSAU's Geoinformatics and Information Security sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics, neural networks, computer vision, pattern recognition and artificial intelligence. He's list of publications contains about 100 scientific papers, including 40 articles and 2 monographs. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.



**Сергеев Александр Владиславович**, 1986 года рождения. В 2009 г. окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В настоящее время работает стажёром-исследователем в Учреждении Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН и по совместительству инженером-математиком в ОАО «Самара-Информспутник». Круг научных интересов включает обработку изображений, геоинформационные технологии, веб-технологии. Имеет 7 публикаций, из них 1 статья. Является членом Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.

E-mail: [a.sergeyev@gmail.com](mailto:a.sergeyev@gmail.com).

**Aleksandr Vladislavovich Sergeev** (1986 b.), graduated from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) at 2009. At present he is intern-researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of engineer-mathematician at JSC «Samara-Informsputnik». The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics and web-technologies. He's list of publications contains 7 papers, including 1 article. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.

*Поступила в редакцию 28 сентября 2011 г.*