

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

© 2020 г. В.Е. Махов^{1,*}, С.Е. Шалдаев¹, А.И. Потапов^{2,**}, Я.Г. Смородинский^{3,4}

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Россия 197082 Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13

²Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

⁴ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *wmahov@gmail.com; **apot@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020; после доработки 14.03.2020

Принята к публикации 24.04.2020

Проведен анализ методов оценки качества изображений в оптико-электронных системах (ОЭС). Исследовано влияние качества и информационной структуры изображения на точность измерения параметров исследуемых объектов. Проведено сравнение точности измерения для параметров геометрических форм и координат сложных объектов в их изображениях в зависимости от качества изображений. Указаны пути повышения качества и информативности изображения в ОЭС. Установлено, что повышение точности в измерительных алгоритмах происходит при повышении качества изображения, которое достигается увеличением объема выборки получаемых ОЭС кадров изображений, а повышение качества изображения достигается совместной обработкой серии кадров алгоритмами повышения разрешения и снижения уровня шума как в однопунктных ОЭС, так и многопозиционных ОЭС на базе нескольких регистраторов с матричным фотоприемником. Максимальный эффект повышения качества и информативности изображения, обеспечивающих точность применяемых измерительных алгоритмов, определяется структурой и вариациями пиксельной структуры каждого кадра изображения в области границ градиента яркости. В условиях однопунктной ОЭС, дающих высокое качество оптического изображения без факторов шума и вариаций других внешних параметров, оптимальное количество кадров для совместной обработки не более четырех. В ОЭС на базе регистраторов светового поля максимальное количество кадров, обеспечивающих повышение качества изображения, определяется количеством пикселей под каждым элементом массива микролинз. Формирование значимых кадров в регистраторе светового поля может быть получены алгоритмом сканирования поля зрения или формирования слоев отображаемого пространства. Результаты исследований дают возможность более эффективно проводить оценку технического состояния малоразмерных (удаленных) объектов, в том числе отечественных космических аппаратов.

Ключевые слова: оптико-электронная система, ОЭС, однопунктная ОЭС, многопозиционная ОЭС, качество изображения, регистратор светового поля, глубина резко отображаемого пространства, ГРИП, двумерные вариации, сложность изображения, оценка технического состояния.

DOI: 10.31857/S0130308220070040

ВВЕДЕНИЕ

Изображения контролируемых объектов в оптико-электронной системе (ОЭС) используются для получения количественных информационных характеристик интересующих объектов. Достижимая точность и достоверность измерений характеристик объектов зависит от качества получаемых изображений, которое определяется свойствами ОЭС, индивидуальными особенностями и состоянием исследуемого объекта, трактом передачи оптического изображения в ОЭС [1]. С целью повышения точности и достоверности получаемой информации об объектах контроля в настоящее время широко используют различные методы повышения качества изображения, в том числе полученных методом совместной обработки серии изображений, полученных с нескольких ОЭС, или во временной последовательности изображений, полученных с одной или нескольких ОЭС.

Наряду с методами построения многопозиционных ОЭС известны так же принципы построения однокамерных гибридных оптических систем, например, цифровых камер (ЦК) светового поля (СП) [2], регистрирующих координаты и направление хода лучей от поверхности объектов контроля в ОЭС. Такие системы, имеющие один матричный фотоприемник (МФП) и массив микролинз, расположенных перед ним, можно рассматривать как плоский массив цифровых камер низкого разрешения, что позволяет определять форму поверхности объекта контроля [3].

Алгоритм обработки, получаемых с ЦК СП файлов объемного изображения ($4D$), имеет отличительную особенность, которая заключается в получении выходного плоского изображения ($2D$) с выбранной вариацией набора входящих в ОЭС лучей. Фактически это соответствует изменению плоскости фокусировки, глубины резко отображаемого пространства (ГРИП), угла визирования ОЭС. Отличительных особенностей ЦК СП является то, что каждая пиксель синтезируемого плоского изображения формируется из множества разнесенных в сенсоре МФП пикселей, что устраняет факторы их взаимного влияния.

На практике часто встает вопрос получения достаточно высокого качества изображений в значимых фрагментах исследуемых объектов с целью достижения в дальнейшем максимально точной и достоверной информации об исследуемых характеристиках частей объекта. Обеспечить это можно путем детального анализа структуры ОЭС и задания необходимых режимов получения изображений. Решение задачи получения необходимого качества и информативности изображения позволит проводить достоверную оценку качества сложных объектов, например отечественных космических аппаратов, при воздействии на них космического мусора.

КАЧЕСТВО И ИНФОРМАТИВНОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В настоящее время существуют различные подходы количественной оценки качества и структурной сложности изображений, основанные, в первую очередь, на теории информации и понятии энтропии [4] или анализа искажений волнового фронта [5]. Оценить сложность дискретных изображений можно в сравнении их двумерных вариаций [6]. Распространенной метрической характеристикой изменчивости и сложности одномерной функции $f(x)$ в интересующей области $D[a, b]$ является полная вариация. Известны обобщения вариации для функций нескольких переменных (Витали, Арцела, Фреше, Тонелли и др.). Все они являются вариантом интеграла модуля градиента функции по области своего носителя D . Для реальных функций значения различных вариаций близки. Каждая из рассмотренных вариаций дает в результате одно значение, в основе которого лежит величина градиента в точке. Обобщив выводы и теоремы разных типов вариаций, Кронрод [7] показал, что функция нескольких переменных $r = (x_1, x_2, \dots)$ должна характеризоваться не одним, а несколькими независимыми функционалами, определяющих длину границ компонент и число, которое характеризует и выраженность их локальных экстремумов $f(r)$.

С другой стороны, сложность изображения можно описать фрактальностью [8]. Размерность Минковского — один из способов задания фрактальной размерности ограниченного множества в метрическом пространстве, которая тесно связана с размерностью Хаусдорфа. На практике могут быть другие подходы к оценке сложности и информативности изображений, например, путем определения параметров сегментации [9]. В сегментации методом водораздела рассматривается абсолютная величина градиента изображения в виде топографических поверхностей.

Наряду с этими методами оценку информативности и анализ структуры изображения можно реализовать другими математическими методами, например, путем анализа мгновенной пространственной частоты (преобразование Гильберта), разложение по адаптивным базисам (Хуанга), кратко масштабный анализ [10]. Так или иначе, количественные методы оценки качества изображения дают возможность численно оценить структурную сложность изображения и его потенциальную информационную емкость, произвести его информационную селекцию. Все это позволяет подойти к выбору оптимальных алгоритмов получения доминантных информационных составляющих исследуемых объектов.

При этом надо иметь в виду, что, определяя качество изображения или его потенциальную информационную емкость, нужно ориентироваться, в первую очередь, на возможность получения максимально точно и достоверно интересующих информационных параметров исследуемого объекта при воздействии мешающих факторов в широком диапазоне их варьирования (низкий контраст, шум). Однако подготовка изображения для применения тех или иных измерительных алгоритмов может потребовать использования дополнительных алгоритмов обработки изображений [1, 11], которые чаще всего носят деструктивный характер. Полученное ОЭС-изображение может иметь различное качество по полю зрения ОЭС. С помощью энтропии можно характеризовать гладкость локальных окрестностей. Существует метод адаптивного преобразования локальных контрастов, в котором за параметр, характеризующий скользкую окрестность, используется аналог энтропии. Поэтому на основании меры априорной неопределенности значений яркостей для элементов изображения в их окрестностях может формироваться функция преобразования локального контраста [12].

Самым важным вопросом разработки средств контроля является повышение точности и надежности полученных данных об исследуемых объектах, регистрируемых ОЭС. Данные измерения всегда получаются в результате анализа всей пиксельной структуры изображения. Обработка изображения изменяют его пиксельную структуру. Ряд измерительных алгоритмов строится на основе графического выделения структуры градиента яркости в изображении [13]. Высокую точность измерения геометрических параметров объектов в изображении обеспечивают интегральные методы анализа градиента контраста, например, с использованием базиса вейвлета [14], что снижает требования к локальной пиксельной структуре в изображении и степени локализации (размытию) градиента яркости на границах интересующих фрагментов изображения. В некоторых случаях для определения дефектов поверхности изделий [15], структуры и формы и их границ [16] достаточно эффективно могут быть использованы алгоритмы анализа выделенных по уровню яркости бинарных кластеров. Форма и координаты бинарных кластеров, обеспечивающих информационное отображение интересующих параметров объектов в более узкое информационное поле их численных параметров, что позволяет получать наглядные и устойчивые результаты контроля в широком диапазоне варьирования неконтролируемых параметров.

Свойства проектирующей оптической системы (ОС) и условия регистрации (абберации, расфокусировка, механическая нестабильность) вносят различного рода искажения в получаемые ОЭС изображения. На основе априорных знаний о системе контроля можно повысить качество такого изображения без потери его информативности.

Модель процесса формирования и искажения изображения в ОЭС можно определить следующим образом (рис.1):

$$\text{Im}_{dis}(x, y) = \Xi(x, y) \{h(x, y) \otimes \text{Im}(x, y)\} + n(x, y), \quad (1)$$

где $\text{Im}(x, y)$ — исходная яркостная структура объекта; $h(x, y)$ — функция, формирующая изображение ОЭС; $\Xi(x, y)$ — искажающая функция (нелинейная составляющая); $n(x, y)$ — аддитивный шум; $\text{Im}_{dis}(x, y)$ — результат искажения.

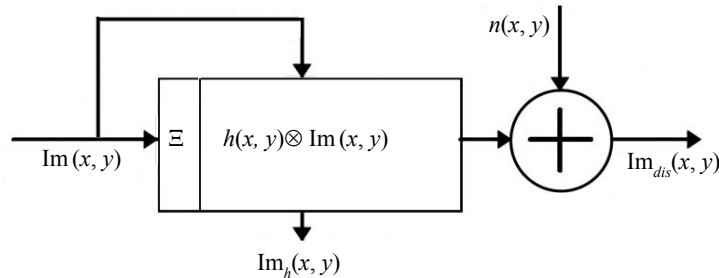


Рис. 1. Модель процесса формирования искаженного изображения ОЭС.

Когда область яркостной структуры объекта $\text{Im}(x, y)$ посредством передаточной функции ОС $h(x, y)$ сворачивается в пиксели изображения $\text{Im}_h(x, y)$, получаем свертку $h(x, y) \otimes \text{Im}(x, y)$, которая называется конволюцией линейного интеграла. Операция обратная свертке в пространственной области эквивалентна операции деления в частотной области:

$$h(x, y) \otimes \text{Im}(x, y) \Leftrightarrow H(u, v) \cdot \text{IM}(u, v), \quad \text{IM}(\hat{u}, v) = \text{IM}(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}, \quad (2)$$

где $H(u, v)$, $\text{IM}(u, v)$, $N(u, v)$ — фурье-образы функций $h(x, y)$, $\text{Im}(x, y)$, $n(x, y)$.

Вычисление $\text{IM}(u, v)$ исходного изображения (2) называется инверсной фильтрацией [17]. На практике она почти не применяется, так как когда $H(u, v)$ принимает близкие к нулю значения, ее вклад оказывается доминирующим.

Фильтрация Винера (Wiener) позволяет учитывать шум в изображении [17]. Минимум отклонения достигается в частотной области:

$$\text{IM}(\hat{u}, v) = \left(\frac{1}{H(u, v) |H(u, v)|^2 + S_n(u, v) / S_f(u, v)} \right) G(u, v), \quad (3)$$

где $G(u, v)$ — фурье-образ функций $\text{Im}_h(x, y)$.

В то же время известен метод сглаживающей фильтрации, называемой Тихоновской регуляризацией [18]:

$$IM(\hat{u}, v) = \left(\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \lambda |P(u, v)|^2} \right) G(u, v), \quad (4)$$

где λ — параметр регуляризации, а $P(u, v)$ — фурье-преобразование оператора Лапласа (матрицы 3×3).

Этот метод широко используется в программах для обработки астрономических фотографий (программа «Astra Image»). Недостаток метода — большое время обработка изображения.

Развивается также метод слепой деконволюции, предполагающий, что искажающая функция рассеяния точки (ФРТ) заранее точно неизвестна. Первоначально выбирается первое приближение ФРТ, далее по одному из методов делается деконволюция, после чего по некоторым критерием определяется степень качества, на основании которой уточняется функция ФРТ и итерация повторяется до достижения нужного результата.

Лучший результат может обеспечить нелинейный подход (Ричардсон и Люси) основан на максимальном правдоподобии [19]. Вычисления производятся в пространственной области. При этом предполагается, что изображение подчиняется распределению Пуассона [20]. Критерий качества изображения является сохранение резких краев и сглаживание артефактов деконволюции. Записывается это следующим образом:

$$J(\text{Im}) = \sum_r \|\nabla \text{Im}(r)\|. \quad (5)$$

Вычисление такого функционала требует сложной техники оптимизации. Поэтому альтернативно используется сглаженный функционал:

$$J(\text{Im}) = \sum_r \sqrt{\|\nabla \text{Im}(r)\|^2 + \varepsilon^2}. \quad (6)$$

Когда ε стремится к нулю, процесс оптимизации становится более сложным. При достаточно большом ε , результат оптимизации будет напоминать фильтр Винера с размытием краев [21]. Формула (6) имеет квадратичный вид, поэтому она не может быть просто вычислена в частотном пространстве (Фурье), как это получалось с фильтрами Винера и Тихонова. Поэтому необходим один из методов пошаговой оптимизации для нахождения приближенного решения, например классический метод градиентного спуска.

Градиент сглаженного функционала определяется как

$$\text{Grad } J(\text{Im}) = -\text{div} \left(\frac{\nabla \text{Im}(r)}{\sqrt{\|\nabla \text{Im}(r)\|^2 + \varepsilon^2}} \right). \quad (7)$$

Для достижения хорошего результата количество итераций должно быть достаточно большим.

Наиболее сложным случаем является контроль удаленных или малоразмерных объектов, дающих наибольшую вариацию пикселей в структуре изображения. Очевидно, используя имеющиеся средства однопунктной или многопозиционной ОЭС получения пространственно-временной информации ($R^3 - t$) при выбранных методах ее обработки, необходимо иметь возможность заранее оценить возможности получения необходимой измерительной информации, ее точность и достоверность, в итоге сформулировать требования к методике функционирования ОЭС.

Ввиду значительного числа существующих и перспективных конфигураций ОЭС, в настоящее время не существует системных подходов к их синтезу, нет рекомендации по оптимальному выбору средств получения, алгоритмов обработки изображений в рамках решаемой задачи. Нет общей методике построения оптимальных алгоритмов получения информационных параметров для различных объектов, научного прогнозирования точности и достоверности получаемых результатов.

Поэтому в работе ставилась цель провести ряд исследований влияния качества изображения на точность получаемых информационных параметров объектов, полученных в различных ОЭС. Рассмотрены вопросы выбора алгоритма оценки качества изображения, планирования оптимального качества для решаемой задачи контроля различных объектов с требуемой точностью. Исследованы

вопросы необходимости и пути повышения качества исходных изображений ОЭС, в том числе во временной последовательности, которые являются основой для измерений необходимых геометрических и координатных параметров объектов или их дефектоскопии.

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА В ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве ОЭС в работе использована смарт-камера фирмы National Instruments (NI) — NI 1742 [22], оснащенная процессором 533 МГц PowerPC. Сенсор смарт-камеры монохромная ПЗС матрица разрешением 640×480 Пикс (VGA) (Sony ICX424AL) размером 1/3 дюйма (эффективная площадь изображения 5,8×4,9 мм, размер пикселя 7,4 мкм²). Использована цифровая окулярная насадка Levenhuk T300 PLUS: матрица КМОП 1/2", аппаратное разрешение 2048×1536 Пикс, размер пикселя 3,2 мкм², чувствительность 1 В/люкс-с на длине волны 550 нм, время выдержки 0,244—2000 мс. Использована цифровая окулярная насадка ScoreTek MDCC560 [23]: матрица ПЗС 1/2" (6,4×4,8 мм), размер пикселя 2,2 мкм², аппаратное разрешение 2592×1944 Пикс, динамическая ширина 75дБ, длина волны 400—650 нм (с фильтром ИК). Для формирования изображений использованы ОС: объектив Computar M2514-MP2 (<https://computar.com>), телескоп Celestron NexStar 4 SE ($D = 102$ мм, $f' = 1325$ мм), Sky-Watcher BK MAK90SP ($D = 90$ мм, $f' = 1250$ мм), Celestron C70 Mini Mak ($D = 70$ мм, $f' = 750$ мм).

Альтернативно для получения изображений был использован регистратор светового поля (СП) на базе цифровой камеры (ЦК) Lytro ILLUM (версия B5-0036 ILLUM) [24] имеющая сенсор КМОП (Artina MT9F002 14,4 Мпикс, 1/2,3", эффективная площадь изображения: 6,14×4,6 мм, размер пикселя 1,4 мкм²). Количество микролинз в массиве 130000 (фокусное расстояние 25 мкм, шаг 13,89 мкм). ЦК СП имела встроенный объектив 9,5—77,8 мм с относительным отверстием 1:2. Для обработки файлов СП использовалось оригинальное приложение Lytro Desktop [25]. Максимальное разрешение ЦК: 2450×1634 пикс.

Для построения алгоритмов обработки и измерений в изображениях использованы алгоритмы и средства среды разработки приложений на базе графического языка программирования фирмы National Instruments (NI) — NI LabVIEW [26], использован дополнительный модуль NI Advanced Signal Proceedings Toolset, включающих функции обработки сигналов на основе объединенного частотно-временного [27] и вейвлет-анализа [28]. Применяли специализированные функции работы с изображениями драйвера модуля технического зрения — NI IMAQ Vision [29]. Для захвата кадров изображений в режиме реального времени использовано приложение NI Vision Builder for Automated Inspection (Vision Builder AI), для построения алгоритма обработки и измерений — приложение NI Vision Assistant.

Обработка одиночных кадров изображений проводилась в программе Astra Image PLUS (<https://www.astraimage.com/>), а обработка серии изображений — в программах: RegiStax (author Cor Berrevoets) [30], AutoStakkert (author Emil Kraaikamp), PIPP — Planetary Imaging PreProcessor, PhotoAcute Studio (<https://www.photoacute.com/>).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ

ОЭС со светочувствительными элементами на базе единичных, линейных, матричных фотодиодов могут обеспечить получение четырехмерной пространственно-временной информационной структуры ($R^3 - t$) ярких полей, которую можно с понижением ее размерности анализировать известными методами:

$$L \times M \times (R^1) \leftarrow L \times (R^2 - t) \leftarrow (R^3 - t) \rightarrow K \times (R^3) \rightarrow K \times L(R^2), \quad (8)$$

где M — количество линий профиля изображения ($1D$), L — количество выборок по глубине пространства, K — количество временных выборок.

ОЭС с массивом микролинз или иных систем регистрирующих координаты и направления хода лучей $L_i(x, y, \theta, \varphi)$ входящих в ОЭС в каждый момент времени t_i [31] система формирует файл СП ($4D$), который в каждой экспозиции ($t_i + \Delta t$) имеет четырехмерную информационную структуру $R^4 = LR^2$. Это обеспечивает получение некоторого количества L слоев плоских изображений $L(R^2)$ [32] по направлению визирования ОЭС (α, β):

$$(R^4 - t) \rightarrow L \times (R^2 - t)_{\Sigma(\theta, \varphi)} \rightarrow L \times K \times (R^2)_{\Sigma(\theta, \varphi)}. \quad (9)$$

Плоские изображения (R^2) из файла данных СП получаются алгоритмами суммирования сигналов с фотодиодов, расположенных под микролинзами [24]. Более полный алгоритм формирования плоского изображения из файла СП описывается на базе четырехмерного преобразования Фурье [33]. Ввиду этого накладываются существенные ограничения на быстродействие ОЭС, построенных на базе регистраторов СП. Для обработки информации с целью определения большинства интересующих параметров объекта чаще всего используется двумерный массив данных (R^2), который соответствует дискретной выборке яркостной структуры плоского кадра изображения, полученной однопунктной ОЭС регистрации наблюдаемой сцены. Дополнительная информация по координате вдоль оси визирования (OZ) может быть получена путем обработки серии изображений в многопунктных ОЭС [1], корреляцией кадров или слоев изображений, в том числе полученных от цифровых регистраторов СП (поле градиента яркости, для ЦК СП — вдоль оси визирования ЦК) [3].

В то же время информационная избыточность многопунктных ОЭС и ОЭС СП может быть использована для повышения качества кадра плоского изображения объекта контроля, необходимого для последующего точного выделения его информационных параметров. Основой физического разрешения и информативности получаемого изображения является размерность используемой матрицы фотодиодов регистратора ($n \times m$). Снижение исходного физического возможного качества изображения приводит к снижению измерительной точности определения параметров объекта.

Исследования точности и достоверности получения параметров интересующего объекта в изображении заданного качества проводились путем измерения геометрического контура объекта стандартными алгоритмами поиска границ градиента яркости функциями модуля NI IMAQ-Vision [29]. На первом этапе использованы алгоритмы поиска и определения параметров линий границ объекта $y_i = \text{tg}(\alpha)x_i + b$ в выбранных фрагментах их линейности алгоритмами: «Edge Detector», «Find Straight Edge», «Adv. Straight Edge». Измерительная точность этих функций определялась вариациями найденных точек вдоль линии границ (Straightness, Average SNR) и сравнением результата с истинными значениями формы границ исследуемого объекта в ОЭС с учетом калибровки оптической системы по полю и глубине пространства (определение линейного увеличения оптической системы) [25, 34]. Для более точного измерения координат точек градиента яркости в линиях профиля изображения был использован алгоритм на базе непрерывного вейвлет преобразования (НВП) для распределения освещенности, которые позволяют учитывать влияние размытия и пиксельной структуры вдоль границ в изображении [35]. Результаты нахождения прямых линий в границах контура для изображения спутника алгоритмом «Find Straight Edge» представлены на рис. 2 и в табл. 1.

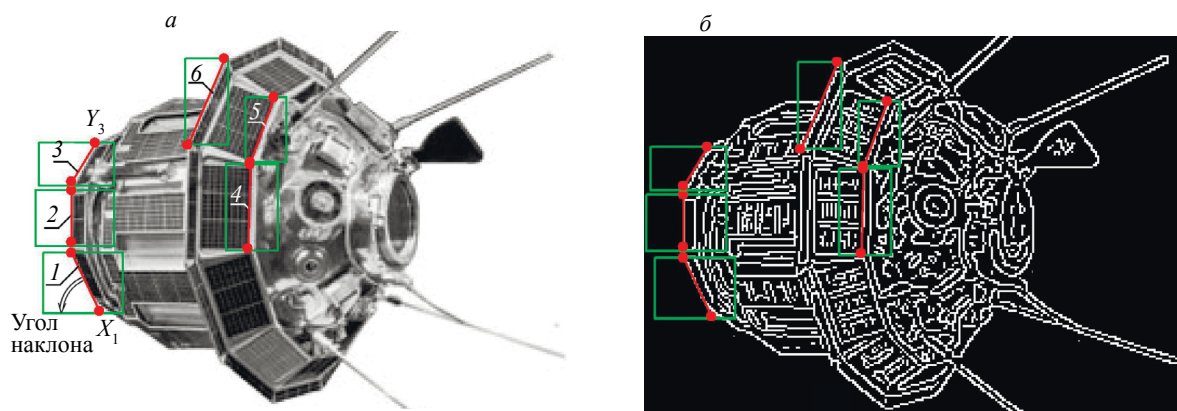


Рис. 2. Нахождение линий границ фрагментов контура в изображении спутника: изображение спутника 1000×700 пикс (*а*), фрактальность изображения (Фильтр Канни) (*б*).

При этом оценка качества изображения оценивалась по параметрам его фрактальности — раздельными линиями градиента контраста (Фильтр Канни) в изображении (рис. 2*б*). Выбор метода обработки изображения для последующих измерений должна обеспечивать максимальную фрактальность (детализацию).

Для дальнейшего исследования влияния качества изображения на измерительную точность использовались алгоритмы представленные в программе «Astra Image PLUS», которые реали-

Нахождения прямых линий в контурах границ объекта

№	X_1 , пикс	Y_1 , пикс	X_2 , пикс	Y_2 , пикс	Угол наклона, град	Прямолинейность, пикс	Средний SNR, дБ
1	27,44	153,00	40,03	180,00	25,00	0,49	70,13
2	27,42	124,00	27,03	148,00	-0,94	0,74	133,21
3	38,62	102,00	27,69	120,00	-31,26	0,30	196,29
4	110,36	112,00	109,09	151,00	-1,86	0,02	12,92
5	121,24	81,00	110,47	111,00	-19,74	0,04	69,00
6	98,89	63,00	81,87	103,00	-23,04	0,96	162,28

зуют основные методы повышения качества на базе известных методов: деконволюции, вейвлет-преобразования, кратно масштабного анализа [36] (рис. 3). Каждый представленный здесь алгоритм изменения качества изображения имеет свои индивидуальные настройки, которые обеспечивают получение требуемых результатов. Применение указанных алгоритмов может повысить не только видимое качество изображения, но и его фрактальность. Однако эти методы не позволяют принципиально повысить детализацию (информативность) в изображении. Это указывает на то, что в однопунктных ОЭС принципиально невозможно достичь более высокого качества одиночного изображения по сравнению с некоторым пороговым значением, обусловленным параметрами сенсора.

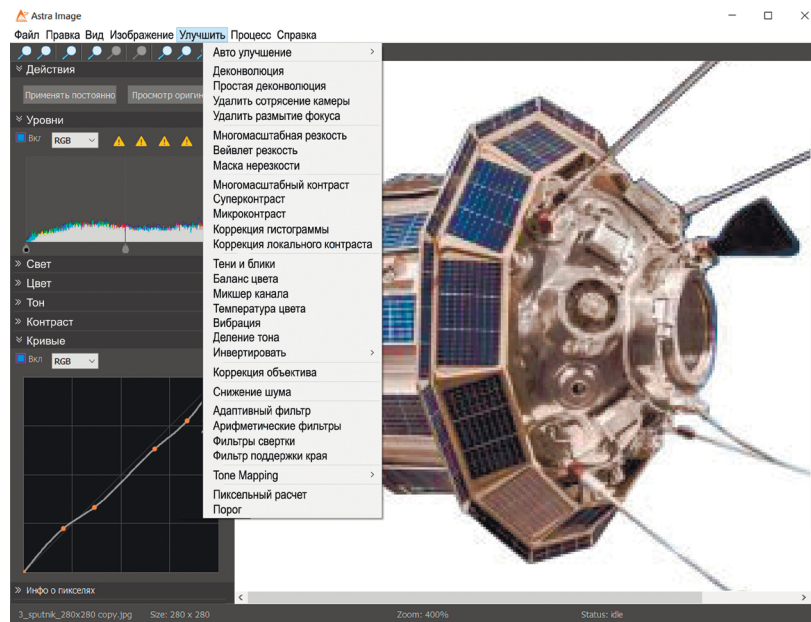


Рис. 3. Алгоритмы изменения качества изображений в программе Astra Image PLUS.

Поэтому для радикального повышения качества исходного изображения необходимо использовать дополнительную информационную составляющую, полученную из других зарегистрированных изображений данной или другой ОЭС. С целью исследования влияния от совмещения серии изображений на точность измерений использовались методы соответствующих точек и локального анализа Фурье. Такие алгоритмы реализованы в ряде программ, таких как «RegiStax», «AutoStakker», «PIPP», «PhotoAcute Studio», которые позволяют повысить разрешение и детализацию изображения, устранить влияние шума и случайных артефактов, например временной механической нестабильности ОЭС, влияние градиента показателя преломления среды в тракте формирования изображения ОЭС. При этом качество результирующего изображения нужно оценивать по

его фрактальности и энтропии с одной стороны, с другой — с измерительной точностью алгоритмов определения геометрических и координатных параметров исследуемых объектов. Необходимо иметь в виду, что в ряде случаев при обработке единичного изображения измерительная точность некоторых параметров объекта или его фрагментов может повыситься лишь за счет повышения локального контраста [12]. Однако после этого может снижаться эффект дальнейшего повышения качества получаемого в серии изображений.

Определение геометрических форм объектов предполагает знание функции кривых их границ. Точность получение дискретной функции линий границ в изображении определяется пиксельной структурой области градиента контраста изображения, которые зависят от формата файла, угла наклона линии границ по отношению к системе координат матрицы фотодиодов регистратора [35]. Характер пиксельной структуры в областях границ изображения определяется топологией сенсора регистратора и его схемными решениями, свойствами ОС (абберациями, фокусировкой) [37]. Один из способов повышения точности в определении координат точек границ является учет распределения пикселей в окрестности границ, например путем сканирования линии профиля изображения по углу ее наклона с последующим использованием высокоточных методов определения координат в слабо локализованных кривых яркости линий профиля [38].

Практическим аспектом применения ОЭС является получение некоторых комплексных информационных параметров объектов (размера, параметров формы, координат) или распознавание объектов в некотором классе [39]. Ввиду влияния многих параметров качества и пиксельной структуры изображения на алгоритмы получения таких параметров, точность и достоверность результатов контроля фактически будет не прогнозируема. Особенно это относится к объектам сложной формы и внутренней элементной структуры.

Рассмотрим пример определения характерного размера регистрируемого ОЭС ракурса спутника R как объекта сложной геометрической формы и его координатного положения (X, Y) в изображении $(\text{Im}_{N \times M})$ заданного качества K_f . Изменение качества изображения достигалось искусственным снижением разрешения исходного изображения $(\text{Im}_{(K \times N) \times (K \times M)}, K < 1)$ или повышением его разрешения $(N^{IR} \times M^{IR} = K \cdot N \times K \cdot M, K > 1)$, полученного алгоритмом синтеза изображения из серии изображений $\aleph\{\text{Im}\}$ с существенно варьируемыми параметрами пиксельной структуры $(\text{Im}_{N \times M}^i \neq \text{Im}_{N \times M}^j)$:

$$\text{Im}_{N^{IR} \times M^{IR}} = \aleph_{i=1}^Q \{ \text{Im}_{N \times M}^i \}. \quad (10)$$

Степень варьирования пиксельной структуры в каждом фрагменте изображения можно оценивать по пиксельной разности приведенных друг к другу изображений $\text{Im}_{N \times M}^i - \text{Im}_{N \times M}^j$. Значимой основой варьирования пикселей в изображении является изменением условий регистрации (смещение объекта или ОЭС, изменение ракурса), обеспечивающих бесшовность виртуальной расширенной матрицы фотодиодов $(N^{IR} \times M^{IR})$ или их дробное перекрытие.

В регистраторах СП физический размер матрицы фотодиодов $(n \times m)$ превышает размер формируемых на выходе плоских изображений $\text{Im}_{N \times M}$. Избыточность фотодиодов сенсора обеспечивает возможность получения в одной экспозиции набора плоских слоев изображений [32] или их смещение. Физически варьирование пикселей в точках изображений обеспечивается выбором направлений хода лучей их формирующих. При этом максимальное количество значимых вариаций пикселей в каждой точке изображений определяется количеством фотодиодов под микролинзами.

В работе проведено исследование изображений, полученных с регистратора СП с массивом микролинз (Lytro ILLUM) [2, 24]. Известно, что регистратор СП можно рассматривать как плоский массив ЦК малого разрешения. Глубина резкости отображаемого регистратором объема пространства и угол визирования регистратора в процессе получения плоского изображения обеспечивается выбором алгоритма суммирования сигналов с фотодиодов под микролинзами [24]. Эти алгоритмы обеспечивают такие параметры регистратора как виртуальную апертуру регистратора (D_f) , расстояние фокусировки и угол его визирования. Параметры преобразования объемных характеристик регистрируемого пространства из файла СП в яркостную структуру плоского изображения задается в приложении Lytro Desktop [25]. При этом как всегда необходимо учитывать особенности размерной пространственной калибровки регистратора СП [34].

С другой стороны, также известно, что формирование выходного плоского изображения в регистраторах СП описывается алгоритмом на базе четырех мерного преобразования Фурье лучей, представленными их координатами и направлениями их распространения $F^4 \{L_i(x, y, \theta, \phi)\}$ [33]. Можно отметить, что аналогичный принцип обработки может быть использован в серии изображений малоразмерных объектов низкого разрешения $F^4 \{\text{Im}_K(R^3 - t)\}$. Такие изображения могут

быть получены в достаточном количестве от одной ОЭС в различные моменты времени или сканированием изображения по сенсору ОЭС. Эффект алгоритма преобразования таких изображений может обеспечить повышение разрешения малоразмерных объектов (до 100 пикс) более чем в 5 раз. Использование системы формирования множества изображений на одном сенсоре эквивалентно принципу ЦК СП с массивом микролинз. Однако обработка временной последовательности изображений требует решения проблемы их координатного сопоставления по соответствующим точкам, дающим вариации значений пикселей в структуре изображений.

Если изображение объекта занимает малую площадь сенсора, то используется малая часть его информационной емкости. Если средствами ОЭС на поверхности одного сенсора формировать целый ряд точно смещенных изображений [40], то это может также являться основой для их совместной обработки. При этом не требуется поиск соответствующих точек для совмещения изображений, расширяется динамический диапазон, устраняет шовность пиксельной структуры матрицы фотодиодов. Один из способов реализации такого решения является построение много лучевой ОЭС [41].

Таким образом, для повышения информативности изображения в системах регистрации ОЭС необходимо иметь или создавать условия пиксельной вариации соответствующих точек, например сдвиг изображений в дробно пиксельном диапазоне, изменения время накопления освещенности (например, при наличии яркостного блеска). Эффект вариации часто достигается в условиях естественной или заданной механической нестабильности объекта контроля или самой ОЭС [42]. Контроль механической стабильности системы, расфокусировку ОЭС можно реализовать путем анализа характера размытия границ (градиента яркости) в изображении высокоточными методами вейвлет анализа [43]. В размытом (несфокусированном) изображении информация перераспределяется по некоторому закону и может быть восстановлена [36, 37]. Исключение составляет лишь край изображения шириной в радиус размытия — там полноценное восстановление в одном кадре в принципе невозможно.

Наибольшим влиянием ухудшения качества формируемого изображения подвержены ОЭС, регистрирующие удаленные объекты. Для исследования качества получаемых изображений удаленных объектов и результатов алгоритмов его повышения использовались два варианта экспериментальных установок регистрации, представленных на рис. 4. Оптическая система (рис. 4а) построена на базе телескопа 1 Celestron NexStar 4 SE ($D = 102$ мм, $f' = 1325$ мм). В качестве приемника изображения в первом канале использовалась цифровая окулярная насадка с адаптером 2 (Levenhuk T300 PLUS), во втором канале использован регистратор СП (Lytro ILLUM) с окуляром (25 мм) 3. Оптическая система второй экспериментальной установки (рис. 4б) построена на базе зрительной трубы 4 Celestron C70 Mini Mak ($D = 70$ мм, $f' = 750$ мм). Здесь был использован регистратор СП 5 (Lytro Light Field Camera). Расстояние до объекта определялось лазерной рулеткой 6. Таким образом, определялось расстояние до объекта — s . Для получения данных о механической

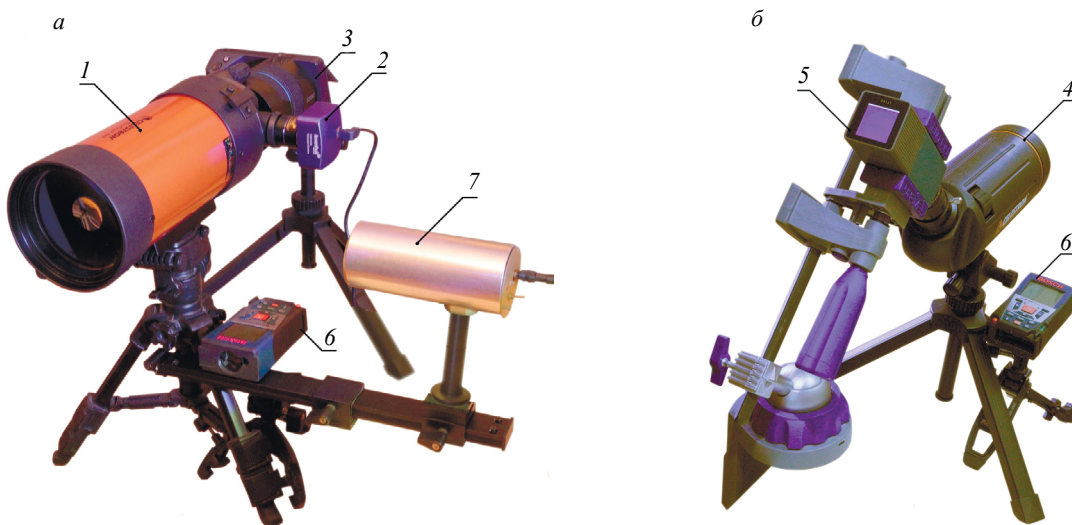


Рис. 4. Экспериментальные установки ОЭС:

1 — телескоп Celestron NexStar 4, 2 — ЦК Levenhuk T300 PLUS, 3 — ЦК Lytro ILLUM (версия B5-0036), 4 — зрительная труба Celestron C70 Mini Mak, 5 — ЦК Lytro, 6 — лазерный дальномер (Bosch GLM 100), 7 — доплеровский радиолокатор (13 мм).

нестабильности телескопа *l* использовался доплеровский локатор 7 (13 мм) с программным обеспечением анализа механической нестабильности, что позволяло при известных параметрах оптической схемы определить радиус размытия точек изображения.

Изображения, полученные с ЦК 2 и регистратора СП 3 (рис. 4а), имели примерно одинаковое разрешение (2048×1536, 2450×1634), что давало возможность проводить сравнение получаемых изображений. Линейное увеличение ОС телескопа (*V*) в режиме регистрации изображений фотоприемником телескопа (астрограф) определяется как $V = f'/(s-f')$. Глубина резко отображаемого пространства определяется параметрами ОС и приемника изображения, расстоянием до объекта [25]. Для рассмотренных конфигураций ОЭС имеем: $V_1 = 0,28$, $V_2 = 0,14$. Это соответствует дискретности отображаемой ОС предметной плоскости объекта $\Delta a = a'/V$ (a' — шаг матрицы фотодиодов).

Сравнение изображений, полученных ОС телескопа при помощи окулярной цифровой насадки, регистратором СП и цифровой камерой высокого разрешения (цифровой смарт-камеры для объекта в виде бумажной мишени с текстовой надписью), показано на рис. 5. Характеристики ОЭС и изображений представлены в табл. 2. Линейный размер фрагмента мишени C_{xy} отображается ОС в размер C'_{xy} плоскости МФП. Максимальное качество и детализация в изображении, как и следовало, предположить получается с ЦК высокого разрешения. Однако регистратор СП отображал микрорельеф поверхности самой мишени (рис. 5б). Таким образом, появляется информационная составляющая яркостной структуры изображения вдоль оси визирования регистратора СП, что позволяет повысить качество и информативность плоского изображения.

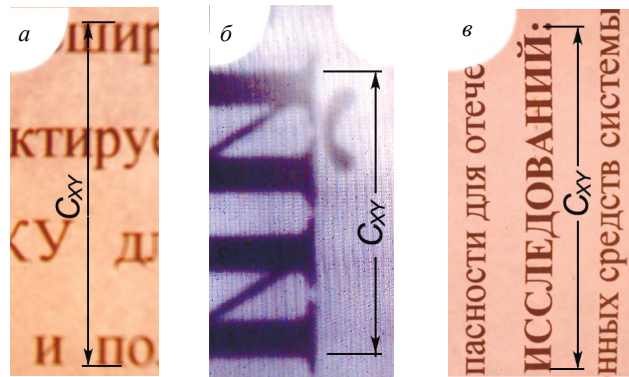


Рис. 5. Изображения с различных датчиков изображений:

a — с цифровой окулярной насадки Levenhuk T300 PLUS (100 %); *б* — с регистратора СП — Lytro ILLUM (33 %); *в* — с цифровой камерой — EOS 6D (33 %).

Таблица 2

Параметры изображений ОЭС с разными регистраторами

№	Поле зрения, мм	Размер ФП $a \times b$, мкм	$V_{расч}$	$V_{экс}$	Размер C_{xy} , мм	C'_{xy} , пикс	C'_{xy} , мм	Δa , мм
<i>a</i>	6,4×4,8	3,2×3,2	—	0,103	32,0	527	3,29	0,03
<i>б</i>	5,57×4,17	1,27×1,27	—	0,41	8,0	1294	3,25	
<i>в</i>	36×24	6,58×6,58	0,25	0,21	48,0	1502	9,88	0,03

Экспериментальные исследования показали что измерения, проведенные в изображениях, полученные из серии изображений с одноpunktных ОЭС с различными фотоприемниками, обеспечивают повышение измерительной точности в двух изображениях на треть и более чем в два раза в многопозиционных ОЭС. Это связано с тем, что для многопозиционных ОЭС повышение точности связано с гарантированным пиксельным смещением каждого изображения, увеличением числа фотодиодов, регистрирующих яркостную структуру объектов. Максимальный удельный эффект достигается в двух изображениях, после этого сильное влияние оказывают ошибки преобразований и совмещения изображений. Дальнейшее увеличение разрешения и измеритель-

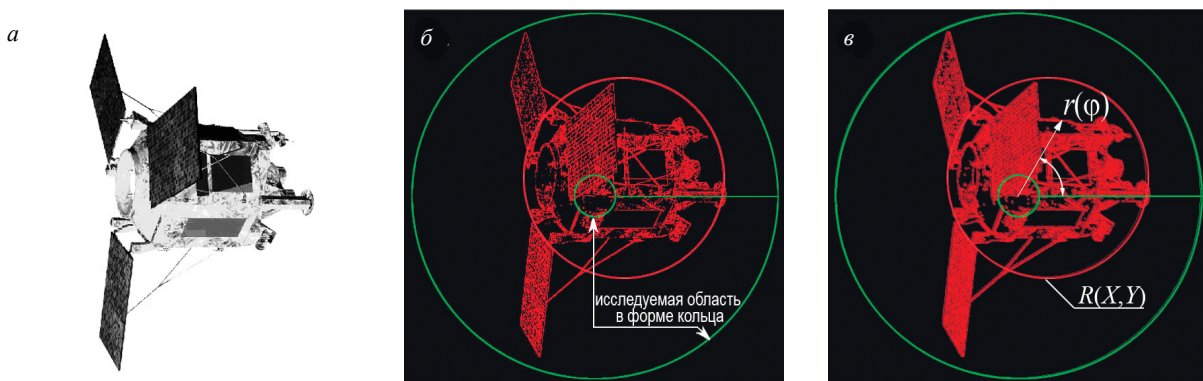


Рис. 6. Определение качества исходного изображения (а) через его фрактальность (б, в), определение эквивалентного радиуса R ракурса объекта и его координат X, Y (в).

ной точности в серии изображений происходит только при наличии значительного шума и ряда случайных неконтролируемых факторов.

Как было указано ранее, детализация изображения определяется его фрактальностью, которая определяется количеством (протяженностью) и распределением кривых градиента яркости в деталях изображения. Повышение разрешения и качества изображения дает возможность разрешать и анализировать близко расположенные линии градиента яркости (рис. 6), определять параметры более мелких элементов или дефектов в деталях изображения.

На практике важным вопросом контроля является получение некоторой информации по объекту — координатных и размерных характеристик объекта, отличительных параметров формы. Существует множество алгоритмов выделения таких информационных параметров объекта по их изображению [15, 44]. Так, например, функция поиска границ по радиальным линиям поиска градиента контраста освещенности (Find Circular Edge), имеющая параметры настройки алгоритма, определяет координаты границ контура $r(\varphi)$, найденные в полярной системы координат, статистическую вариацию радиуса и центр эквивалентной окружности $R(X, Y)$ (рис. 6в, рис. 7в). Варьирование параметров алгоритма (рис. 7б) позволяет добиться формирования устойчи-

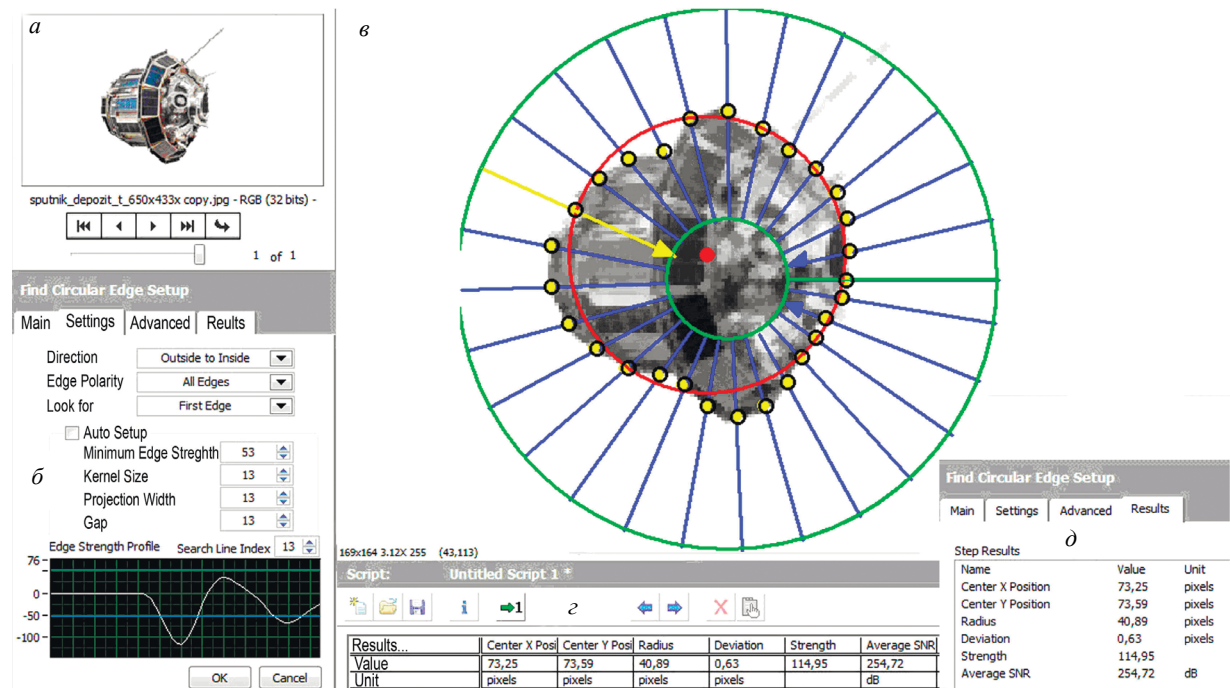


Рис. 7. Алгоритм определение эквивалентного размера и координат спутника алгоритмом поиска точек границ: а — просмотр изображения; б — параметры настройки алгоритма; в — процесс работы алгоритма; г — результат работы алгоритма; д — полученные результаты.

Зависимость геометрических измерений от качества изображения

Размер изобр.	Центр X, пикс		Центр Y, пикс		Радиус, пикс		Отклонение, пикс		S [45]		Ср. SNR, дБ	
	Gap 10	Gap 5	Gap 10	Gap 5	Gap 10	Gap 5	Gap 10	Gap 5	Gap 10	Gap 5	Gap 10	Gap 5
100%	102,66	108,93	133,85	135,09	88,69	81,65	2,56	1,72	138,99	130,75	220,06	165,66
90%	117,05	113,01	144,52	146,21	70,16	75,68	2,63	1,76	150,15	142,04	196,36	214,17
80%	109,95	112,53	133,62	132,30	71,37	68,86	1,96	1,27	140,65	129,97	225,44	217,64
70%	114,22	113,88	133,96	140,78	61,79	61,88	1,50	1,18	133,67	135,93	236,48	218,47
60%	117,71	117,76	133,30	140,64	52,86	52,26	1,33	0,97	128,55	130,68	198,73	209,79
50%	121,55	121,41	136,80	139,68	43,30	43,70	0,95	0,68	122,21	123,54	173,12	167,61

вых результатов определения формы объекта по его координатам и оценить достоверность полученных результатов. Количество установленных радиальных линий поиска границы объекта («Gap») определяет параметры детализации анализируемого контура объекта или устранение незначимых деталей формы границ. В результате получаем координаты местоположения (X , Y) и характерный размер спутника R . Степень отклонения формы от окружности определяет индивидуальные характерные объекта (облик). Нетрудно видеть, что изображения различного качества различным образом меняют все измеряемые параметры. Результаты исследования точности и достоверности измеряемых параметров от разрешения исходного изображения представлены в табл. 3. Подробное описание настроек алгоритма полученных результатов (рис. 7d) приведено в описании функции «Detect Circular Edges» [45].

Механическая нестабильность ОЭС или объекта контроля [42] снижает качество изображения в алгоритмах его оценки, так как приводит к размытию границ контраста в изображении. Расфокусировка ОЭС [43], смещение объекта контроля во время экспозиции также вносят деструктивный характер во все показатели качества изображения, в то же время они могут содержать полезную информацию о координатных динамических характеристиках самого объекта контроля. Такие искажения изображения может быть проанализировано или в ряде случаев исходное изображение может быть восстановлено. Однако при этом всегда требуется установить характер дестабилизирующих факторов. В ряде случаев представляет интерес определить величину перемещения объекта за время экспозиции или амплитуду его колебания. На практике зона размытия границ в изображении мала, поэтому метод непосредственного определения перемещения изображения на матрице фотодиодов имеет низкую чувствительность и узкий диапазон измерения. Поэтому для расширения диапазона измерений параметров механических нестабильности [43], повышения точности их измерения в других неблагоприятных условиях, в частности, в отсутствие возможности точной фокусировки ОЭС, следует использовать оптическую схему регистрации на базе одного [25] или нескольких регистраторов [46].

Ввиду больших возможностей многопунктных систем следует обратить внимание на регистраторы СП (как массив ЦК). Алгоритмы обработки файла СП формируют изображение ($2D$) с заданной плоскостью фокусировки, глубиной резко отображаемого пространства и углом визирования камеры. Изменение распределения освещенности в каждой линии профиля $2D$ -изображения выделяет зону градиента яркости в зоне границы в изображении объекта. При наличии колебаний контролируемого объекта происходит размытие зоны границы изображения Δ_{xT} за время экспозиции кадра изображения T (рис. 8).

На гистограммах распределения освещенности $I(x, z)$ в выбранных линиях профиля изображения объекта $L(z)$ наблюдаются характерные перегибы функции освещенности $I(x)$ в зоне размытия границ резкости, вызванные возвратно-поступательной механической перемещениями ОЭС или объекта за время формирования кадра изображения. При малых перемещениях — зона размытия Δx будет сопоставима с размером пикселя и не способна обеспечить достаточную чувствительность и точность определения амплитуды колебаний. При использовании регистратора СП предоставляется новая возможность алгоритмически изменять угол визирования, то есть получать из файла светового поля серию изображений со смещенным полем зрения $\text{Im}^{3D} \rightarrow \{\text{Im}^{2D}(x + \Delta x_i, z)\}_{i=1}^K$ и вариацией пиксельной структуры.

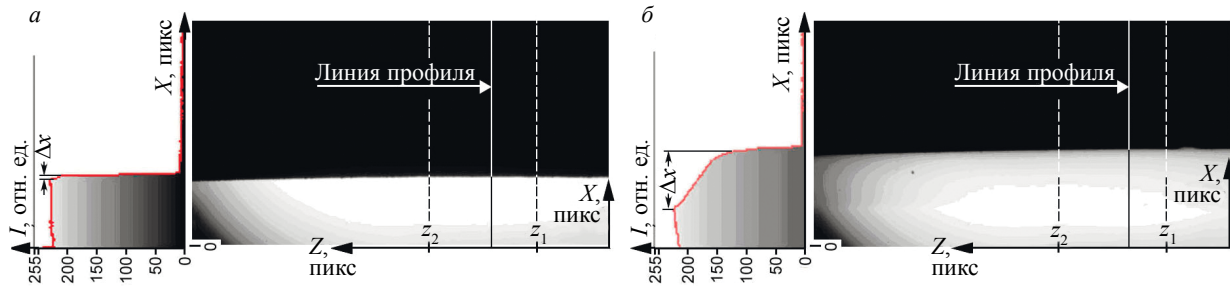


Рис. 8. Распределение освещенности в линии профиля изображения:
 а — статическое состояние объекта; б — колебательная механическая нестабильность объекта.

Суммарное изображение смещенных изображений по полю зрения в одном кадре одной экспозиции расширяет зону размытия узкой зоной границы, вызванное механической нестабильностью, увеличивает размер значимой выборки исследуемой функции градиента яркости:

$$\text{Im}_{sum}^{2D}(x, z) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \text{Im}(x + i \cdot \Delta x_i, z). \quad (10)$$

Далее, для точности определения параметров границ и величины механической нестабильности по изображению, полученному методом суммирования сканированных по углу визирования изображений, проведены простые вычислительные эксперименты. Проведено сравнение каждого изображения и изображения, полученного в серии сдвинутых алгоритмом визирования изображений (рис. 9). Видно, что зона функции распределение освещенности $I(x)$ в зоне размытия уширяется (рис. 9б), а ее первая производная $I(x)/dx$ становится более гладкой и информативной. Увеличение зоны размытия колебаний может быть достигнуто на число пикселей под микролинзами регистратора СП в каждом линейном измерении или корню квадратному из числа регистрируемых слоев в файле СП (указывается производителем), что соответствует примерно на 10 выборкам.

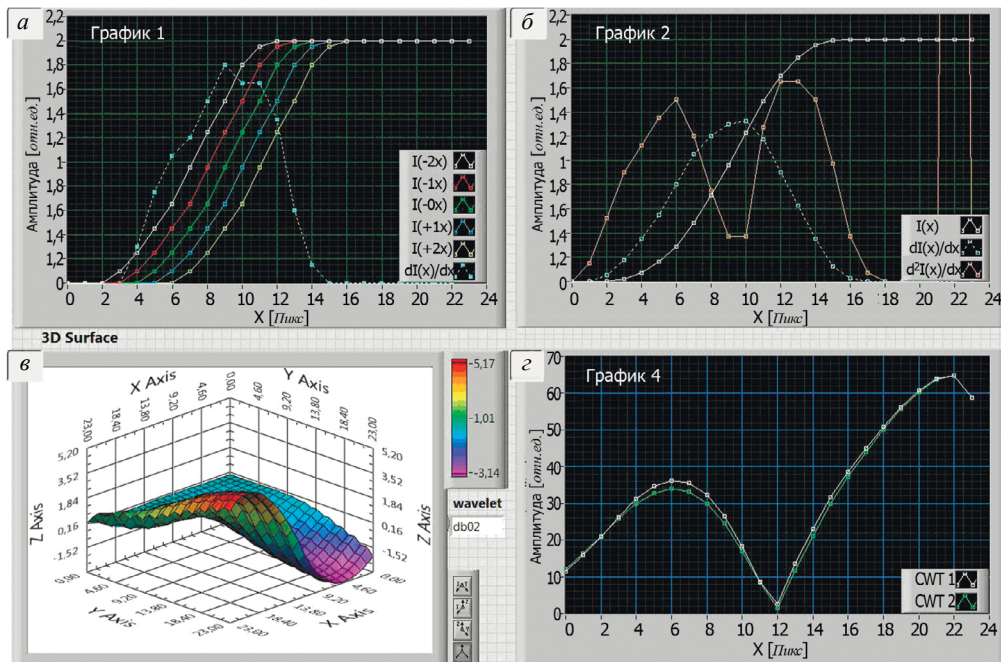


Рис. 9. Распределение освещенности и первая производная в линиях профиля изображения с изменением угла визирования (а); суммарная функция освещенности, первая и вторая производные (б); НВП освещенности в линии профиля (в); кривые коэффициентов НВП функции отдельной и суммарной линии профиля (г).

Параметры колебаний определяются анализом кривых коэффициентов $g(x)$ непрерывного вейвлет-преобразования (НВП—*CWT*) суммарной освещенности ($\text{Im}_{sum}(x, z)$) в линиях профиля по заданной длине объекта $z \subset (z_1, z_2)$ (рис. 9в):

$$g(x) = \sum_m CWT \left(\sum_{z=z_1}^{z_2} \text{Im}_{sum}^{2D}(x, z) \right).$$

Совершенно очевидно, что, конфигурируя оптическую систему (линейное увеличение и расстояние до зоны контроля), можно повысить точность определения параметров колебаний для заданного диапазона их амплитуд.

Изменение угла визирования также меняет суммарную фрактальность, что можно трактовать как повышение качества изображения. Измерения, выполненные в каждом изображении, можно статистически обработать, но такой же результат получается при измерениях, правильно выполненных с применением НВП к суммарно размытому изображению.

ВЫВОДЫ

Проведенные модельные и экспериментальные исследования показали, что измерения в полученных изображениях при условиях максимального повышения его качества дают повышение измерительной точности более чем в 5 раз при снижении порога обнаружения мелких дефектов.

Исследований измерительных алгоритмов на изображениях различного качества дают сделать вывод, что повышение разрешения путем обработки кадрового изображения в большинстве случаев позволяет повысить точность измерения в 2—5 раз. Для малоразмерных объектов с большим уровнем шумов точность измерения можно повысить более чем в два раза. Для изображений, полученных цифровыми камерами светового поля в одной экспозиции, повышение точности измерительных алгоритмов обеспечивается физическим размером сенсора, снижением влияния шумов фотодиодов сенсора и фактором взаимного их влияния. Обработка слоев изображений снижает уровень шумов, вызванных высоким уровнем яркости. Повышение качества много кадровой обработки имеет эффект при изменении угла визирования камеры. Многопозиционные системы обеспечивают больше возможности получения изображений более высокого качества, однако требуют знания точных параметров конфигурации ОЭС.

Предварительный анализ качества получаемого ОЭС изображения позволяет прогнозировать точность и достоверность измерения контролируемых параметров, проводить оценку технического состояния сложных геометрических объектов, таких как отечественные космические аппараты при воздействии космического мусора.

Результаты исследований были представлены на IV Открытой выставке научно-технического творчества (НТТА) ВКА им. А. Ф. Можайского в 2016 году (II место), а также на Международном военно-техническом форуме «Армия 2018» (грамота).

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грузман И.С., Киричук В.С. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах / Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. 168 с.
2. Kučera Jan. Computational photography of light-field camera and application to panoramic photography. Department of Software and Computer Science Education Supervisor of the master thesis / Ing. Filip Šroubek, Ph.D. Study programme: Computer Science, Software Systems Specialization: Computer Graphics. Prague 2014. 98 p.
3. Makhov V.E., Sytko I.I. Shape and Relief Evaluation Using the Light Field Camera / В сборнике: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 194. С. 022020.
4. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. Is. 3. July. P. 379—423.
5. Ермолова Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 297 с.
6. Чочиа П. А., Милюкова О. П. Сравнение двумерных вариаций в контексте оценки сложности дискретных изображений // Информационные процессы. 2015. Т. 15. № 2. С. 169—182.
7. Кронрод А. С. О функциях двух переменных // УМН. 1950. 5:1 (35). С. 24—134.
8. Feder J. Fractals. Springer Science + Business Media, LLC, 1988. 305 p.
9. Frucci Maria, Sanniti di Baja Gabriella. From Segmentation to Binarization of Gray-level Images // Journal of Pattern Recognition Research. 2008. V. 3 (1). P. 1—13.
10. Чуи Ч.К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
12. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/23.php>
13. Maksarov V.V., Makhov V.E. Studying parameters and quality of thread by optical light field recorder / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V.194. 062017. P. 1—6.
14. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование алгоритмов вейвлет-анализа для построения оптических измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2013. № 1. С. 12—21.
15. Махов В.Е., Палаев А.Г., Потапов А.И. Автоматизация контроля качества сварных швов с использованием ультразвуковых технологий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 5. С. 75—81.
16. Махов В., Лиференко В., Борисов Е. Общий подход к оцифровке графических зависимостей в изображении в среде LABView // Компоненты и технологии. 2016. № 9 (182). С. 141—146.
17. Компьютерная обработка изображений. Конспект лекций. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://aco.ifmo.ru/el_books/image_processing/
18. Василенко Г.И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
19. Панфилова К.В. Компенсация линейного смаза цифровых изображений с помощью метода Люси-Ричардсона / Юбилейная 25-а Международная конференция (GraphiCon 2015), Россия, Протвино (Парк Дракино), 22—25 сентября 2015 г. С. 163—167.
20. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
21. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана: Учебное пособие для вузов. 2-е издание, исправленное. 2014. 396 с.
22. Potapov A.I., Makhov V.E. et al. Smart-Camera — Based Linear Sizing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 524—532. [Потапов А.И., Махов В.Е., Смородинский Я.Г., Маневич Е.Я. Контроль линейных размеров на база смарт-камеры // Дефектоскопия. 2019. № 7. С. 37—45.]
23. Махов В.Е., Релин О.С. Исследование возможностей систем видеоконтроля на базе решений фирмы National Instruments на станках рулонной печати / Материалы 2-й Межд. научно-практ. конференции: Современное Машиностроение / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 500—510.
24. Махов В., Потапов А., Закутаев А. Принципы работы цифровых камер светового поля с массивом микролинз // Компоненты и технологии. 2018. № 1 (198). С. 14—20.
25. Махов В.Е., Потапов А.И., Шалдаев С.Е. Контроль геометрических параметров изделий методом светового поля // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 12—24.
26. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 880 с.
27. Махов В., Лиференко В., Закутаев А. Методы частотно-временного анализа сигналов и их компьютерная реализация в LabVIEW // Компоненты и технологии. 2016. № 7 (180). С. 137—142.
28. Лиференко В., Закутаев А., Махов В. Компьютерная реализация методов вейвлет-анализа в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW // Компоненты и технологии. 2015. № 9 (170). С. 132—139.
29. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А., Ходарев А. Н., Моржун А. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.
30. Mobberley Martin. Lunar and Planetary Webcam User's Guide. Springer. 2006. 89 p.
31. Шавкутенко Е. Н., Мильдер О. Б. Что такое «Мегалуч»? / Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 19—20 марта 2015 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 47—57.
32. 3D Light Field Camera Technology / Copyright © 2013 by Raytrix GmbH, Germany. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isolutions.com.sg/Raytrix.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ.
33. Ng R. Digital light field photography // A dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. @ Copyright by Ren Ng 2006. 187 p.
34. Bok Y., Jeon H.-G., Kweon I. S. Geometric Calibration of Micro-Lens-Based Light-Field Cameras using Line Features // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. V. 39. Iss. 2. P. 17—61.
35. Махов В.Е., Потапов А.И., Шалдаев С.Е. Исследование границ изображения методом выделения контраста с использованием оптико-электронной системы. Часть 1. Научно-методические принципы контроля границ изображения методом выделения контраста // Контроль. Диагностика. 2017. № 10. С. 44—51.
36. Astra Image Online Help [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://help.astraimage.com/index.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ.
37. Беззубик В.В., Белашенкова Н.Р., Вдовина Г.В., Кармановский Н.С., Соловьев О.А. Метод повышения резкости цифровых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 82—90.

38. Махов В.Е., Потапов А.И., Шалдаев С.Е. Исследование границ изображения методом выделения контраста с использованием оптико-электронной системы. Часть 2. Экспериментальные модельные исследования границ изображения на основе вейвлет преобразования // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 4—11.
39. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений / Учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.
40. Махов В. Е. Цифровая реализация фазово-растрового метода координатного определения мест лазерного целеуказателя / Труды Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН: Актуальные проблемы защиты и безопасности, (1 – 3 апреля 2009 г.). Т. 3. СПб.: НПО Специальных материалов, 2009. С. 289—294.
41. Makhov V.E., Potapov A.I. et al. Using Two-Beam Interferometry in Surface Deformation Monitoring Systems // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 8. P. 622—629. [Махов В.Е., Потапов А.И., Смородинский Я.Г., Маневич Е.Я. Использование двух лучевой интерферометрии в системах контроля деформации поверхностей // Дефектоскопия. № 8. 2019. С. 59—66.]
42. Махов В.Е., Потапов А.И. Исследование измерительной оптической системы в условиях механической нестабильности объекта контроля // Контроль. Диагностика. 2013. № 2. С. 12—23.
43. Мерзляков М.А., Махов В.Е., Авсюкевич Д.А. Методика построения диагностики состояния оптико-электронных систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2018. № 3. С. 65—73.
44. Махов В.Е., Борисов С.В., Ширококов В.В., Закутаев А.А. Макет для разработки программно-алгоритмического комплекса контроля объектов космического пространства // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. № 1. С. 75—87.
45. Klinger T. Image processing with Labview and Imaq Vision (National Instruments Virtual Instrumentation Series). Prentice Hall Professional, 2003. 319 p.
46. Maksarov V. V., Makhov V. E. Intelligent systems for monitoring and controlling chip formation when cutting difficult-to-machine materials / IOP Conference Series Materials Science and Engineering 560:012028. July 2019.
47. Maksarov V.V., Makhov V.E. Materials Science and Engineering Intelligent systems for monitoring and controlling chip formation when cutting difficult-to-machine materials / IOP Conference Series. 2019.