

Метрологическое обеспечение анализатора «ГРАН»

Для метрологического обеспечения анализатора «ГРАН» решены следующие задачи:

- определены и формализованы принципы измерений;
- определены критерии оценки качества работы ИИС;
- разработаны методы и средства оценки точности измерительных операций;
- проанализировано влияние параметров цифровой обработки данных на погрешность измерений в ИИС;
- для используемых методов цифровой обработки данных определены математические соотношения между параметрами обработки и погрешностями измерений;
- проведены экспериментальные исследования разработанных теоретических подходов, методов и средств;
- определен закон распределения погрешностей измерительных операций;
- проанализированы точность, сходимость и воспроизводимость измерений.

Проведённые исследования базируются на следующих теоретических материалах:

- основы метрологии, измерений и стандартизации;
- методы математической статистики и численные методы анализа;
- методы цифровой обработки изображений;
- методы цифровой обработки сигналов;
- геометрическое моделирование;
- методы имитационного моделирования.

Полученные результаты исследований позволяют:

- оптимизировать ИИС в части аппаратно-программной обработкой информации;
- распределить вычислительные задачи между программными модулями для обеспечения максимального быстродействия и точности;
- определить пути достижения требуемой точности в рамках заданной структуры ИИС на этапе разработки и обновления программного обеспечения.

Информационно-измерительные системы

Современное развитие вычислительной техники, которое в первую очередь связано с удешевлением быстродействующих микропроцессоров и развитием рынка персональных компьютеров (ПК), позволяет создавать информационно измерительные системы (ИИС) на базе ПК как для обработки информации в научных исследованиях, так и для контроля в производственных процессах, лабораторных и технологических испытаниях. При этом ИИС является аппаратно-программным комплексом (ПАК), в котором задачи сбора, анализа и вывода информации распределены между аппаратными и программными модулями.

Системы, проектируемые на базе ПК, включают в себя три блока: сбора, анализа и вывода информации. Параметры работы каждого из перечисленных блоков влияют на частоту дискретизации сигнала, точность его цифровой обработки, а значит и на точность измерительного средства в целом. При рассмотрении ИИС как ПАК необходимо решить вопрос оценки погрешностей каждого из перечисленных модулей. Модули анализа данных реализованы программно на ПК в виде алгоритмов цифровой обработки сигналов. Качество программы определяется в первую очередь заложенными в нее метрологическими методами [Базовый курс лекций ОМИТ [Электронный ресурс]. // LearningSpace, IBM Corp. –2002. – Режим доступа: http://second.udec.ntu-kpi.kiev.ua/lspace/omit_demo/schedule.nsf/pro_course, свободный.]. Каждый метод обработки данных характеризуется не только математическим обоснованием, определяющим функциональность данного метода, но и алгоритмом реализации, который в свою очередь определяет временные затраты на выполнение анализа. Производительность ИИС определяется быстродействием каждого модуля системы, а время обработки данных в общем виде определяется как сумма времён выполнения отдельных задач.

Оценка точности ИИС

Несмотря на то, что вопрос оценки производительности и точности вычислительных систем неоднократно поднимался в публикациях и работах многими авторами, на сегодняшний день не существует ни единого метода оценки, ни средств [Комшилова К.О. Погрешность измерения телеизмерительных систем / К.О. Кошмилова // Приборостроение и информационно-измерительные системы. – 2006. – Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С.51 – 58]. В настоящее время оценить быстродействие и потенциально реализуемую точность цифровой ИИС можно только в процессе разработки системы, что существенно увеличивает временные и экономические затраты.

Существует два подхода к оценке точности ИИС: аналитический и эмпирический. Применение аналитического подхода, т.е. построение математической модели вычислительной системы, не всегда возможно и часто не позволяет получить точных оценок. На практике широкое применение получили эмпирические методы: тесты на эталонах и создание модели рабочей нагрузки ИИС. Данные тесты должны соответствовать классу задач, выполняемых при измерении.

Источники погрешности измерений

Погрешность результата измерения имеет много составляющих, каждая из которых обусловлена различными факторами и источниками. Типичный подход к анализу и оцениванию погрешностей состоит в выделении этих составляющих, их изучении по отдельности и суммировании по принятым правилам. Определив количественные параметры всех составляющих погрешности и, зная способы их суммирования, можно правильно оценить погрешность результата измерений и при возможности скорректировать его с помощью введения поправок.

Ниже приводятся основные источники появления погрешностей измерений анализатора «ГРАН»:

- конечная разрешающая способность устройства ввода изображений и порог его чувствительности;
- неполное соответствие объекта измерений принятой его модели;
- влияния условий окружающей среды на измерение;
- аппроксимации и округления численных значений, реализуемые в методе измерений;
- субъективная погрешность оператора при проведении измерений;

Группируя перечисленные выше и другие причины появления погрешностей измерений, их можно разделить на:

- погрешности метода измерений;
- погрешности средств измерений (инструмента);
- погрешности оператора, проводящего измерения.

Несовершенство каждого этого компонента измерения вносит вклад в погрешность измерения. Поэтому в общем виде погрешность можно выразить следующей формулой:

$$D_x = \Delta M + \Delta T + \Delta S ,$$

где ΔM – методическая погрешность, ΔT – инструментальная погрешность (погрешность средств измерений); ΔS - личная (субъективная) погрешность оператора.

Методическая погрешность возникает из-за недостатков используемого метода измерений. Чаще всего это является следствием различных допущений при использовании эмпирических зависимостей между измеряемыми величинами.

Субъективная погрешность связана с индивидуальными особенностями операторов (внимательность, степень профессиональной подготовленности и т.д.). Такие погрешности чаще встречаются при большой доле ручного труда при проведении измерений и почти отсутствуют при использовании автоматизированных средств измерений.

Исследование метрологических характеристик анализатора

Общие принципы оценки погрешностей анализатора «ГРАН»

Для получения точных оценок точности ИИС, необходимо использовать экспериментальные методы оценки, основанные на моделировании рабочей нагрузки и эталонных тестах. В зависимости от алгоритма цифровой обработки данных и круга решаемых задач, модели рабочих нагрузок и тесты будут различными.

Структурная схема анализатора «ГРАН» как измерительной системы с аппаратно-программной обработкой информации представлена на рисунке 1:

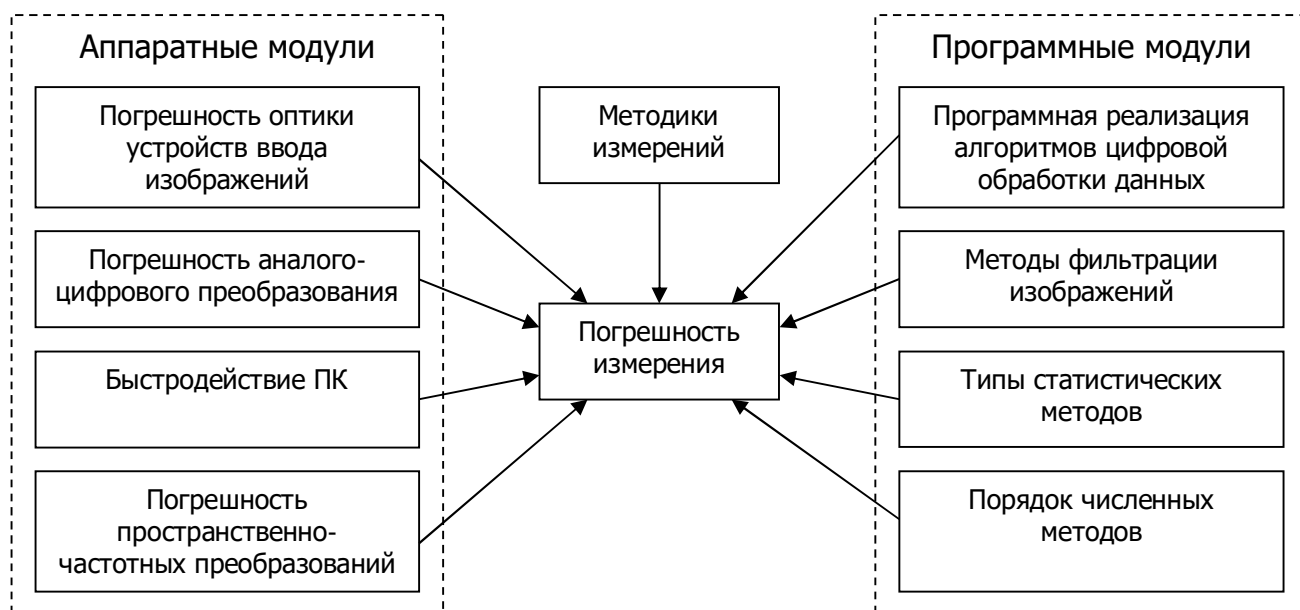


Рисунок 1 – Структурная схема анализатора как измерительной системы

Функции ПК в измерительной установке весьма многообразны. Одной из самых важных функций является накопление поступающей информации и, в случае анализа изображений, объем измерительной информации достаточно велик, чтобы стать критическим для быстродействия системы. С другой стороны ПК используется для реализации цифровой обработки данных и отображения информации на дисплее.

В данном случае возникает задача оценки точности и быстродействия ПК для решения задач обработки и анализа измерительной информации. Так как функции сохранения, обработки и отображения информации реализованы программно, то точность и время выполнения данных задач зависит не только от типа решаемых задач, но и, в большей мере, от способа создания программы, то есть конкретной реализации алгоритмов, в том числе и от языка программирования и системы разработки.

Получать оценки точности и быстродействия ПК при решении задач цифровой обработки данных можно с точностью:

$$e = \pm 0.5 \frac{1}{f_{\text{CLK}}},$$

где f_{CLK} – тактовая частота процессора ПК.

В качестве алгоритмов цифровой обработки изображений в анализаторе «ГРАН» используются цифровые фильтры для удаления помех и шумов. Суммарная погрешность фильтрации определяется отношением сигнал/шум, а степень подавления помех на выходе – параметрами выбранного фильтра.

Представление результатов измерений

В настоящее время руководство крупнейшей организации ИСО (ISO) по представлению результата измерения (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization*) [Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Электронный ресурс] // International Organization for Standardization, Switzerland. – 1995. – Режим доступа: <http://www.iso.org>, подписка.] является ключевым документом, которым пользуются Национальные институты метрологии и измерительной техники и калибровочные лаборатории почти всех стран мира. Поэтому представление результата измерений, в основном, производится в соответствии с этим документом (хотя в некоторых ГОСТ и метрологических документах РФ еще сохранился прежний подход). Это относится, в части, к представлению результатов измерений, обработке экспериментальных данных и представления погрешностей.

Особенностью является то, что погрешности измерения не делят на систематические и случайные. Результат представляют только с указанием итоговой неопределенности, которая может быть выражена или в виде стандартного отклонения, или в виде границ интервала, симметричного относительно результата измерения. Такое представление характеристик неточности результата диктует определенные правила обработки результатов измерения. Систематическую погрешность исключают и при этом учитывают только неисключённую систематическую погрешность (погрешность поправки), которую представляют так же, как и случайную погрешность и, в свою очередь, объединяют со случайной.

При подходе к измерению с точки зрения потребителя ИИС руководство ISO упрощает форму представления результата измерения по сравнению с действующими на территории РФ и СНГ нормами. Однако в некоторых случаях такой результат оказывается менее информативным (например, при представлении промежуточных результатов, которые подвергаются дальнейшей обработке) [Слаев В.А. Рекомендации по применению «Руководства по выражению неопределенности измерения» в России [Электронный ресурс] / В.А. Слаев // ВНИИМ. –2000. – Режим доступа: [http://mscsmq.vniim.ru/ Files/2000/slaev_ru.pdf](http://mscsmq.vniim.ru/Files/2000/slaev_ru.pdf), свободный].

При анализе составляющих погрешности ИИС (проектирование средств измерений и разработке ПО) необходимо иметь более подробную информацию о характеристиках погрешности. Это связано, например, с коррекцией погрешностей, с использованием алгоритмов, повышающих точность измерения за счет адаптации к моделям погрешности и объекта измерения. В этих случаях сохранен подход с разделением погрешности на систематическую и случайную.

Измерения на цифровых изображениях

Общие принципы измерения

В соответствии с Общероссийским классификатором продукции (ОК 005-93, утверждённый постановлением Госстандарта РФ от 30.12.93 №301) компьютерные анализаторы изображений относятся ИИС, являющимися программно-аппаратными комплексами. ПАК не являются измерительными приборами, и на них не распространяется принудительная сертификация по ГОСТ, однако оценка точности всё же требуется [Пантелеев В.Г. Компьютерная микроскопия / В.Г. Пантелеев, О.В.Егорова, Е.И.Клыкова – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.]

Полученное с ПЗС-матрицы сканера изображение передаётся в компьютер, где оно состоит из точек – пикселей. При проведении измерений ПО измеряет число пикселей, приходящихся на объект изображения.

Для того чтобы получить результаты измерений не в точках, а в метрических единицах (миллиметрах), требуется откалибровать систему, т.е. определить, сколько метрических единиц реального изображения приходится на пиксель изображения. В зависимости от оптического разрешения сканера (основного устройства ввода изображений в анализаторе «ГРАН») размер одного пикселя будет различаться. Кроме того, пиксели квадратные, и калибровка производится по двум координатам.

Соотношение метрических единиц в зависимости от оптического разрешения сканера представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношение метрических единиц при разных разрешениях сканеров

Соотношение единиц	Оптическое разрешение, dpi (точек на дюйм)				
	300	600	1200	2400	4800
Миллиметров в 1 пикселе	0,08467	0,04233	0,02117	0,01058	0,00529
Пикселей в 1 миллиметре	12	24	47	94	189

Таким образом, увеличение оптического разрешения приводит к повышению точности оценки размеров объектов.

Такая калибровка позволяет оценивать точность линейных размеров. Определить точность оценки площади и формы объектом возможно на более сложных эталонах формы, например круг и эллипс. Круг – фигура с наименьшим периметром на единицу площади – повсеместно используется для калибровки камер и прочих устройств с квадратными пикселями.

Этапы обработки изображения

Процесс цифровой обработки изображения можно условно разделить на следующие этапы [Sonka M. Image Processing, Analysis, and Machine Vision 2nd Edition [Электронный ресурс] / M. Sonka, V. Hlavac // Roger Boyle, PWS Publishing. – 1999. – Pacific Grove, CA, USA. – Режим доступа: <http://www.icaen.uiowa.edu/~dip/lecture>, свободный]:

1) **получение цифрового изображения** (*image acquisition*) при помощи устройств ввода изображений в компьютер (сканеры, цифровые фото- и видеокамеры и т.д.) или создание изображения в графических редакторах;

2) **предварительная обработка изображения** (*image pre-processing*), называемая фильтрацией (*image filtering*), заключающаяся в удалении шума и помех (*noise reduction*), а также линейных и нелинейных преобразованиях изображения с целью изменения его яркостных, контрастных и прочих характеристик (*image enhancement*);

3) **сегментация изображения** (*image segmentation*), заключающаяся в отделении объектов на изображении от фона или разделении изображения на участки по определённым критериям;

4) определение признаков, **измерение и классификация** объектов на изображении (*objects description and classification*).

Цифровые изображения и их свойства

Монохромное изображение может быть представлено как скалярная функция (скалярное поле). Для представления цветного трёхкомпонентного (RGB) изображения, можно использовать векторную функцию.

Функция изображения

Изображения, полученные как на сетчатке человеческого глаза, так и на видеосенсоре технических устройств, в сущности, двумерные и являются результатом прямой проекции трёхмерных (реальных) объектов на некоторую плоскость.

Такие изображения можно смоделировать с помощью функции от двух или трёх переменных. Аргументами функции являются координаты точки (x, y) , если изображение изменяется во времени, то добавляется третья переменная t . Значение функции соответствует яркости заданной точки изображения. Яркость точки может характеризовать различные физические величины реального объекта: температуру, распределение давления, дистанцию от наблюдателя и т.д.

Понятие «яркости» объединяет в себе несколько физических величин оптики. В методах обработки изображений, использование яркости как основной измерительной величины позволяет избежать описания сложного процесса формирования изображения и упростить математическое представление.

При отображении трёхмерного объекта на плоскость прямой проекцией, теряется часть информации о пространственной геометрии объекта. Восстановление формы трёхмерного объекта по его двумерному изображению – отдельное направление в методах машинного зрения. Методы обработки изображений не зависят от того, был ли реальный объект двумерным или трёхмерным.

Ещё одна задача – это интерпретация яркости. Яркость точки изображения зависит от нескольких независимых факторов:

- отражательной способности (*reflectance*) поверхности реального объекта, которая характеризует материал (или вещество), микроструктуру и окраску поверхности;
- освещённость поверхности источником света;
- положение объекта относительно источника и приёмника света.

Энергетический спектр источника света (*light source energy distribution*) $C(x,y,t,\lambda)$ находится в зависимости от координат точки изображения (x,y) , времени t и длины световой волны λ . Для глаза человека и большинства промышленных датчиков света, формирующих изображение, например, в видеокамерах и др. устройствах, яркость f зависит от энергетического спектра C и спектральной чувствительности датчика $S(\lambda)$, зависящей от длины волны:

$$f(x,y,t) = \int_0^{\infty} C(x,y,t,\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

Для монохромного изображения $f(x,y,t)$ представляет собой скалярную функцию распределения яркости. Цветные изображения представляется векторной функцией трёх (например, красный, зелёный и синий) или более компонентов:

$$f(x,y,t) = (f_1(x,y,t), f_2(x,y,t), \dots, f_n(x,y,t)).$$

Методы обработки применяются к неподвижным статическим изображениям, для которых время t является константой. Тогда, например, монохромное изображение можно представить как функцию $f(x,y)$ от двух переменных.

При обработке изображений на компьютере, используются цифровые изображения, поэтому координаты задаются целыми числами. Область возможных значений функции изображения (яркости) также ограничена. Так, для монохромного изображения наименьшее значение соответствует чёрному, а наибольшее – белому цвету. Значения яркости внутри этого диапазона называются **уровнями** (*levels*). Соответственно, качество цифрового изображения будет увеличиваться пропорционально следующим показателям:

- **пространственное разрешение**, заданное частотой дискретизации и квантования;
- **спектральное разрешение**, заданное чувствительностью сенсора (диапазоном частот световых волн, регистрируемых сенсором);
- **радиометрическое разрешение**, заданное количеством уровней яркости (частотой отсчётов аналогово-цифрового преобразователя).

Дискретизация и квантование изображений

Изображение, регистрируемое видеосенсорами, представляется в виде непрерывной функции $f(x,y)$ от двух переменных, соответствующих координатам точки. Аналогово-цифровое преобразование сигнала заключается в выполнении трех основных операций: дискретизации, квантования и кодирования.

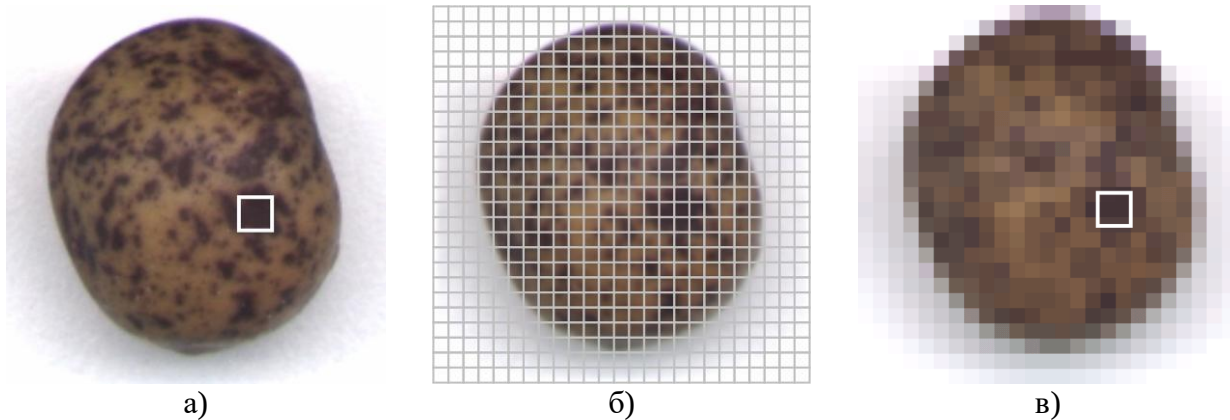
Дискретизация

Дискретизация – это представление непрерывного сигнала последовательностью его значений (отсчетов). Эти отсчеты берутся в моменты времени, отделенные друг от друга интервалом, который называется **интервалом дискретизации**. Величину, обратную интервалу между отсчетами, называют **частотой дискретизации**.

Дискретизация изображения (*image digitization*) – это процесс преобразования непрерывной функции $f(x,y)$ в матрицу из m строк и n столбцов, состоящий из следующих этапов (рисунок 2):

- 1) определение интервала дискретизации (*sampling period*) – дистанции между двумя соседними точками изображения;
- 2) составление схемы геометрического расположения полученных отсчетов с помощью дискретной решётки (*discrete grid*).

Согласно теореме Шеннона [Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике / К.Э. Шеннон – М.: Издательство иностранной литературы, 1963 г. – 830 с.], интервал дискретизации выбирается так, чтобы он был меньше либо равен половине от размера интересующей нас области изображения.



а – исходное аналоговое изображение, размером 5´5 мм, с выбранной для исследования областью, размером 0,5 мм; б – наложение дискретной решётки: интервал дискретизации - 0,2 мм; в – полученное цифровое изображение: $m=25$, $n=25$;

Рисунок 2 – Дискретизация изображения

Каждая ячейка дискретной решётки преобразуется в один элемент цифрового изображения – **пиксель** (*pixel*, сокращённо от *picture element*). Весь набор пикселей в виде матрицы и будет составлять цифровое изображение. Пиксель – это наименьшая неделимая единица цифрового изображения, поэтому иногда используется термин «точка».

На практике, для аналого-цифрового преобразования, интервал дискретизации выбирается в десятки раз больше значения, указанного в теореме Шеннона, т.к. в алгоритмах обратного цифро-аналогового преобразования (используемых, например, для вывода изображений на экран монитора) используются только ступенчатые функции.

Погрешность дискретизации

Соответственно, дискретизацией называется процесс перехода от непрерывной функции $f(x,y)$ в дискретную функцию $f(x_i, y_j)$, по отсчетам которой можно восстановить новую непрерывную функцию $f_{вос}(x,y)$, воспроизводящую исходную с заданной точностью. Степень приближения восстановленной функции к исходной оценивается максимальным значением погрешности:

$$e = \max [f_{\hat{A}\hat{N}}(x, y) - f(x_i, y_j)].$$

Погрешность восстановления непрерывной функции является основным критерием выбора шага дискретизации [Ананченко В.Н. Теория измерений: Учеб. пособие. / В.Н. Ананченко, Л.А. Гофман – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)].

Квантование

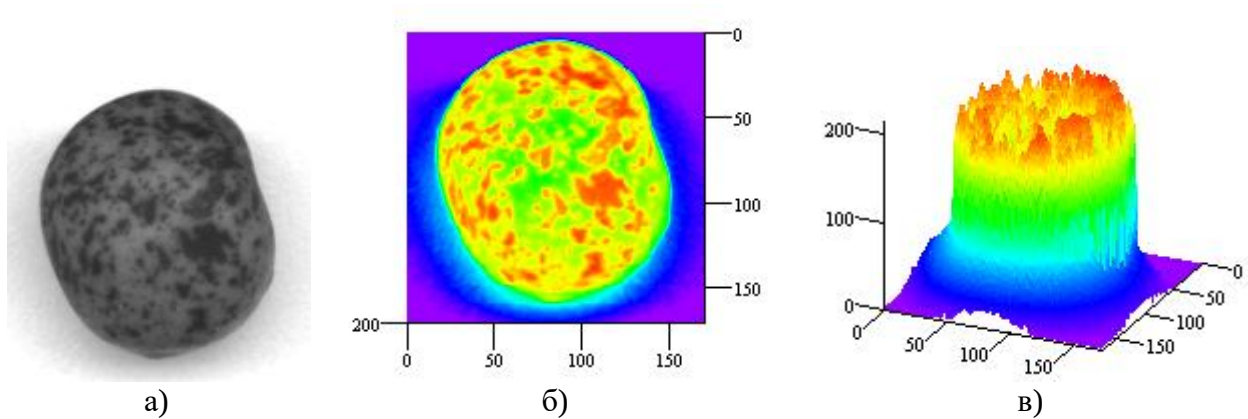
Квантование представляет собой замену величины отсчета сигнала ближайшим значением из набора фиксированных величин – **уровней квантования** [Маркюс Ж. Дискретизация и квантование [Текст] / Ж. Маркюс ; пер. с фр. – М.: Энергия, 1969. – 144 с.].

Другими словами, квантование – это округление величины отсчета. Уровни квантования делят весь диапазон возможного изменения значений сигнала на конечное число интервалов – **шагов квантования** q . Расположение уровней квантования обусловлено **шкалой квантования**. Длина каждого интервала квантования:

$$q_k = f_i - f_{i-1},$$

где $i=1,2,...k$.

Вся область значений функции изображения $f(x,y)$ разбивается на k интервалов. В процессе **квантования изображения** (*image quantitation*), каждому участку ставится в соответствие целочисленное значение. Квантование изображения, в общем случае, проводится по равномерной шкале (рисунок 3).



а – цифровое монохромное изображение $m=170$, $n=170$, $k=256$; б – график поверхности, построенный по матрице изображения, с наклоном 90° ; в – график поверхности, построенный по матрице изображения, с наклоном 35°

Рисунок 4.3 – Квантование изображения

Чем больше частота дискретизации (т.е. значения m и n) и уровень квантования (значение k), тем лучше результат аппроксимации (приближения) непрерывной функции $f(x,y)$. Если для записи одного значения уровня яркости пикселя цифрового изображения используется b бит, то количество уровней яркости $k=2^b$. Обычно для хранения значения уровня яркости отводится 8 бит (или 1 байт), тогда k равно 256.

Погрешность квантования

Характерной особенностью квантования является погрешность Δk , свойственная методу отражения непрерывной по размеру величины ограниченным по числу разрядов числом, т.е. методическая погрешность самого преобразования. При этом максимальное значение погрешности зависит от принятого способа отождествления сигнала с ближайшим уровнем квантования или с ближайшим меньшим (или большим) уровнем квантования [Ананченко В.Н. Теория измерений: Учеб. пособие. / В.Н. Ананченко, Л.А. Гофман – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)].

Погрешность квантования равна разности значения, соответствующего уровню квантования $f_{k\bar{v}}$ и истинного значения сигнала $f(x,y)$:

$$Df_{\hat{E}\hat{A}} = f_{\hat{E}\hat{A}} - f(x,y).$$

Для первого из способов отождествления максимальная погрешность:

$$|Df_{\hat{E}\hat{A}}|_{\max} = \max[f_{\hat{E}\hat{A}} - f(x,y)] = q_k,$$

при втором способе отождествления максимальная погрешность квантования не превышает $0,5 \times q_k$.

При $(x_{\max} - x_{\min}) \gg q_{kv}$ закон распределения погрешности квантования практически не зависит от закона распределения $f(x,y)$ и близок к равномерному.

Метрические свойства цифровых изображений

Габариты или **размеры** (*size*) цифрового изображения определяются величинами m и n . Величина m называется **высотой** (*height*), а n – длиной или **шириной** (*width*). **Площадь** – это количество пикселей, из которых состоит изображение, $S=m \cdot n$.

Необходимо отметить, что некоторые привычные характеристики изображений реальных предметов не имеют прямых аналогов в области цифровой обработки изображений. Одной из таких характеристик является расстояние.

Расстояние

Расстояние или дистанция (*distance*) между двумя пикселями – основная количественная характеристика цифровых изображений.

Расстояние между двумя пикселями с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) можно определить несколькими способами.

1) Как расстояние между двумя точками на плоскости (евклидово расстояние), если рассматривать изображение как плоскость с метрической системой координат:

$$D_E = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

2) Если рассматривать изображение (согласно теории множеств) как множество элементов («точек»), в котором установлены некоторые отношения, сходные с обычными пространственными отношениями, то расстояние определяется как максимум абсолютной величины их разности (метод «шахматной доски»), т.е. размер подмножества, ограниченного двумя элементами [Александров П.С. Введение в общую теорию множеств и функций / П.С. Александров – Москва-Ленинград: Гостехиздат, 1948. – С. 411.]:

$$D_M = \max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}.$$

3) Если рассматривать пространство изображения (согласно теории множеств) как систему из множества элементов, то отрезок между двумя точками изображения является фигурой [Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии, дополненные необходимыми сведениями из алгебры с приложением собрания задач, снабженных решениями, составленного А.С. Пархоменко / П.С. Александров – М.: Наука, 1968. – 912 с.]. Фигура – это произвольное множество точек в пространстве, связанные отношениями «соединения» (в проективной геометрии принято рассматривать точки, прямые и плоскости как равноправные исходные геометрические объекты) [Ефимов Н.В. Высшая геометрия. Изд. 4-е, испр. и доп. / Н.В. Ефимов – М.: Физматгиз, 1961. – 580 с.].

Тогда, длина отрезка находится как количество образующих его пикселей (рисунок 4):

$$D_F = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|.$$

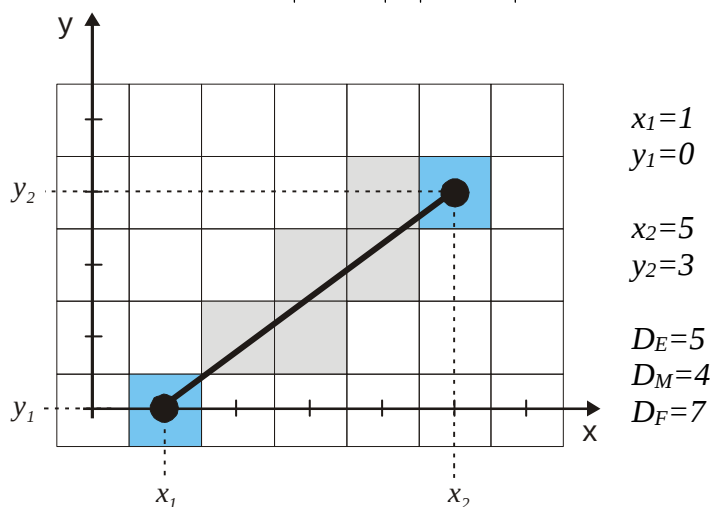


Рисунок 4 – Расстояние между двумя пикселями

Фигуры

Фигуры на цифровом изображении являются многоугольниками (рисунок 5-б), заданными N вершинами с координатами $((x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{N-1}, y_{N-1}))$ [Bourke P. POV-Ray: A Tool for Creating Engaging Visualisation of Geometry [Электронный ресурс] / P. Bourke. – 2004. – Режим доступа: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry>, свободный.].

Все измерительные операции, так или иначе, связаны с анализом контура объектов. Выделенный таким образом контур (рисунок 5-а) представляет собой замкнутую последовательность координат граничных точек объекта.

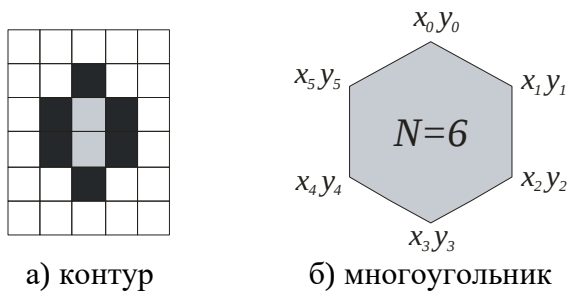


Рисунок 5 – Фигуры на цифровом изображении

Периметр объектов определяется следующими способами.

1) Периметр – это количество точек составляющих контур объекта. Так как отдельный пиксель изображения представляет собой единичный квадрат, то для каждой двух соседних пикселей, расположенных по диагонали (координаты $x_i - 1$ x_{i+1} и $y_i - 1$ y_{i+1}), добавляется $\sqrt{2}$.

2) Численное значение периметра определяется как сумма евклидовых расстояний между точками контура [Bourke P. POV-Ray: A Tool for Creating Engaging Visualisation of Geometry [Электронный ресурс] / P. Bourke. – 2004. – Режим доступа: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry>, свободный.]:

$$P_E = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}.$$

Данный метод имеет наименьшую погрешность.

Площадь объектов определяется следующими способами.

1) Площадь S определяется как:

$$S = \sum_i \sum_j h_{ij},$$

где $h_{ij} = 1$, если точка изображения с координатами (i,j) принадлежит объекту, или $h_{ij} = 0$ в противном случае, то есть площадь определяется как количество пикселей в объекте.

2) Площадь объекта (*area*) равна площади многоугольника, состоящего из точек контура [Bourke P. POV-Ray: A Tool for Creating Engaging Visualisation of Geometry [Электронный ресурс] / P. Bourke. – 2004. – Режим доступа: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry>, свободный.]:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i).$$

Данный метод имеет наименьшую погрешность.

Экспериментальное исследование погрешностей измерений

Для подтверждения метрологических характеристик анализатора нами были проведены измерения эталонных растровых изображений и получены экспериментальные зависимости погрешностей от параметров анализатора.

Эталоны

В качестве эталонных объектов для измерения, представленных на рисунке 6, выбраны правильный круг и эллипс.

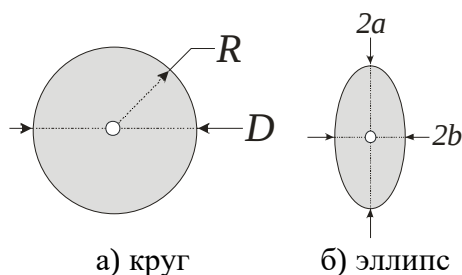


Рисунок 6 – Эталонные объекты

Геометрические характеристики эталонного круга (рисунок 6-а): радиус R , диаметр $D = 2 \times R$, периметр $P_o = 2 \times \pi \times R$ и площадь $S_o = \pi \times R^2$.

Геометрические характеристики эталонного эллипса (рисунок 6-б): большая полуось a , малая полуось b . Отношение длин малой и большой полуосей называется коэффициентом сжатия эллипса или эллиптичностью $k = \frac{a}{b}$. Коэффициент сжатия эталонных эллипсов $k = 2$. Площадь, ограниченная эллипсом, $S_{\text{э}} = \pi \times a \times b$. Периметр эллипса определяется приближённо $P_{\text{э}} = \pi \times \frac{a+b}{2}$, однако, данная формула имеет большую погрешность [Bourke P. POV-Ray: A Tool for Creating Engaging Visualisation of Geometry [Электронный ресурс] / P. Bourke. – 2004. – Режим доступа: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry>, свободный.]. Для определения периметра эллипса будем использовать формулу [46]:

$$P_{\text{э}} = 4 \times \left(a^x + b^x \right)^{\frac{1}{x}}, \text{ где } x = \frac{\ln(2)}{\ln \frac{a}{b}}.$$

Максимальная погрешность этой формулы $\approx 0,3619\%$ (погрешность всегда положительная) [Прохоров А.М. Физическая энциклопедия / А.М. Прохоров – М.: Советская энциклопедия, 1988. – т. 4–5, С. 531.].

Эталонные изображения

В векторном редакторе «Corel DRAW X3» были созданы наборы эталонных объектов (рисунок 7).

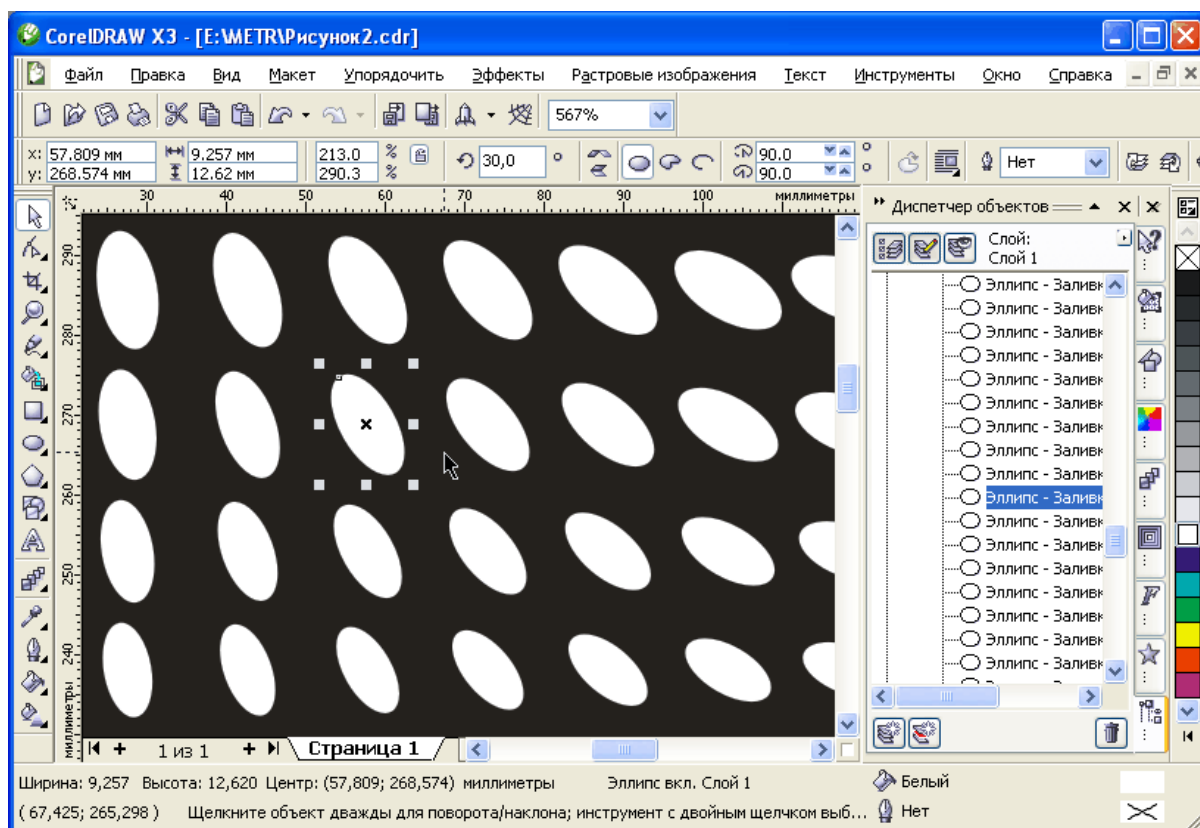


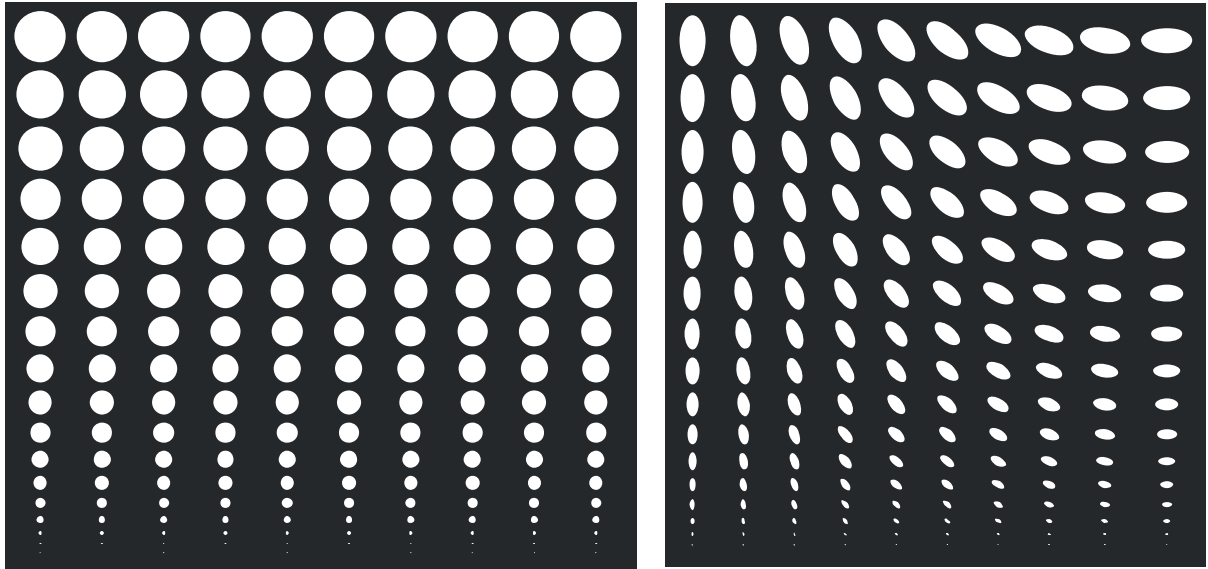
Рисунок 7

1) круги диаметром 0,2; 0,5 и от 1 до 15 мм (с шагом 1 мм);

2) эллипсы с размерами осей 0,2×0,1; 0,5×0,25 и от 1×0,5 до 15×7,5 мм (с шагом 1 мм).

Эллипсы созданы с поворотом относительно центра на угол от 0° до 90°.

Далее векторная графика была преобразована в растровые изображения (формат BMP, цветовой режим RGB, 24 бита) с разрешением 600, 1200 (рисунок 8).



а) круг

б) эллипс

Рисунок 8 – Эталонные изображения

Характеристики, измеряемые на эталонных изображениях

Для объектов, распознанных на эталонных изображениях, определялись следующие характеристики (рисунок 9):

- 1) высота L – как наибольшее расстояние между двумя точками контура объекта;
- 2) толщина H – наибольшее расстояние между точками объекта в направлении, перпендикулярном линии длины;
- 3) периметр P ;
- 4) площадь S ;

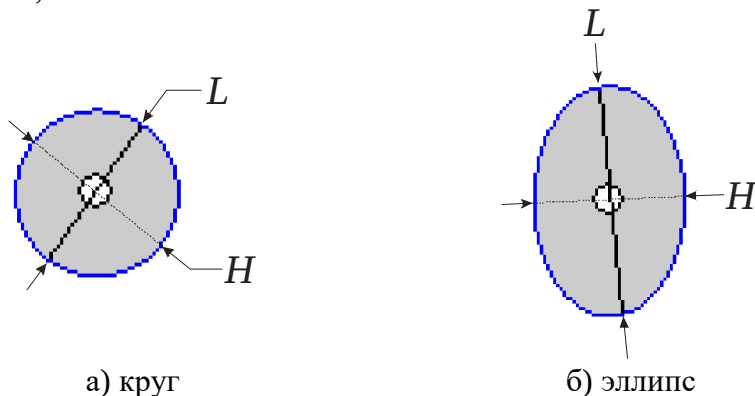


Рисунок 9 – Характеристики, измеряемые на эталонных изображениях

- 5) линии тренда;

Экспоненциальная линия тренда используется для аппроксимации данных по методу наименьших квадратов в соответствии с уравнениями:

$$y = c \times e^{bx} + k \text{ и } y = c \times \frac{1}{e^{bx}} + k ,$$

где k , c и b — константы, e — основание натурального логарифма.

Степенная линия тренда используется для аппроксимации данных по методу наименьших квадратов в соответствии с уравнениями:

$$y = c \times x^b + k \text{ и } y = c \times \frac{1}{x^b} + k ,$$

где k , c и b — константы.

Константа k соответствует поправке на систематическую ошибку.

Полученные результаты

В таблицах 2–5 и на рисунках 10–15 приведены результаты экспериментов по определению абсолютной и относительной погрешностей при измерении.

Таблица 2 - Измерение высоты кругов (разрешение 600 dpi)

Эталон	Результаты измерения		
	Высота L, мм	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
0,2	0,18738	-0,01262	-6,311%
0,5	0,48634	-0,01366	-2,732%
1	0,99379	-0,00621	-0,621%
2	1,99443	-0,00557	-0,278%
3	2,99877	-0,00123	-0,041%
4	3,99711	-0,00289	-0,072%
5	4,99854	-0,00146	-0,029%
6	5,99790	-0,00210	-0,035%
7	6,99847	-0,00153	-0,022%
8	7,99832	-0,00168	-0,021%
9	9,00013	0,00013	0,001%
10	10,00063	0,00063	0,006%
11	11,00053	0,00053	0,005%
12	12,00094	0,00094	0,008%
13	13,00147	0,00147	0,011%
14	13,99962	-0,00038	-0,003%
15	15,00182	0,00182	0,012%

Среднеквадратичное отклонение – не превышает 0,006 мм.

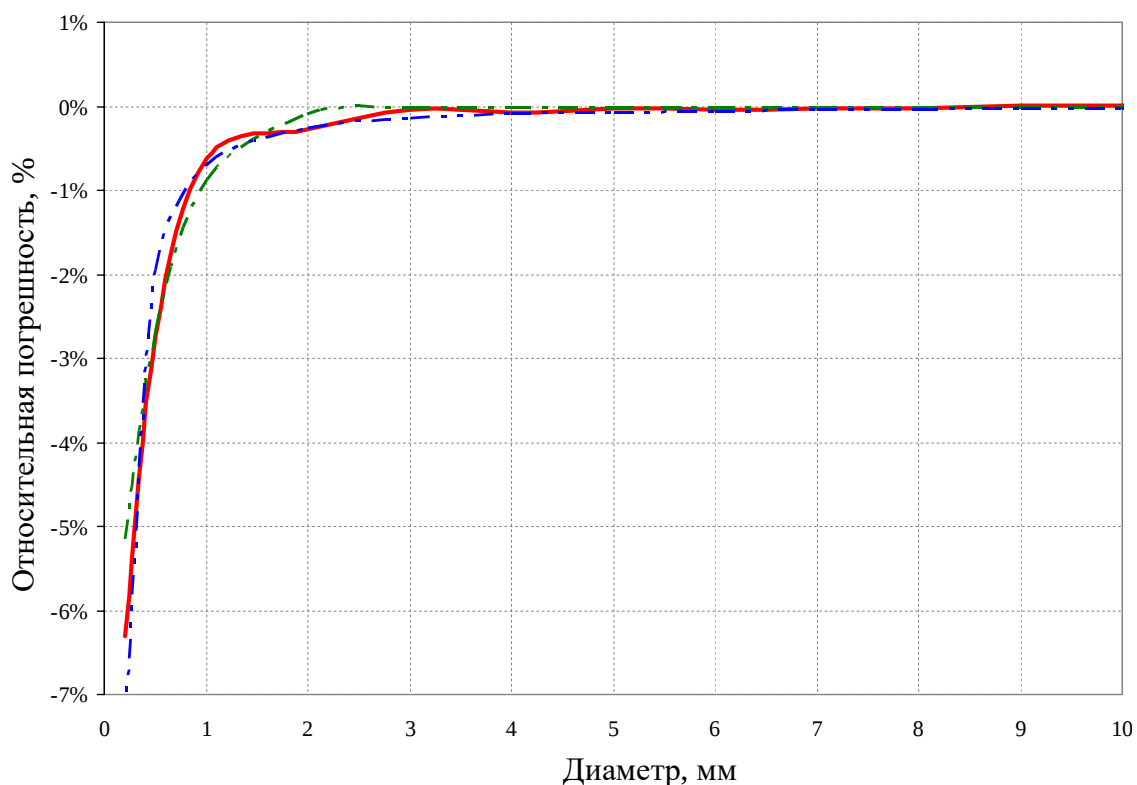


Рисунок 10 – Распределение относительной погрешности измерения высоты объектов

- Результат измерения
- - - - - Линия тренда экспоненциальная
- . - . - Линия тренда степенная

Таблица 3 – Измерение толщины кругов (разрешение 600 dpi)

Эталон	Результаты измерения		
Диаметр, мм	Толщина Н, мм	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
0,2	0,20446	0,00446	2,228%
0,5	0,52577	0,02577	5,154%
1	1,02989	0,02989	2,989%
2	2,04041	0,04041	2,020%
3	3,02320	0,02320	0,773%
4	4,03011	0,03011	0,753%
5	5,02500	0,02500	0,500%
6	6,02359	0,02359	0,393%
7	7,05003	0,05003	0,715%
8	8,01707	0,01707	0,213%
9	9,04247	0,04247	0,472%
10	10,04242	0,04242	0,424%
11	11,03483	0,03483	0,317%
12	12,03030	0,03030	0,253%
13	13,05221	0,05221	0,402%
14	14,03838	0,03838	0,274%
15	15,03467	0,03467	0,231%

Среднеквадратичное отклонение – не превышает 0,022 мм.

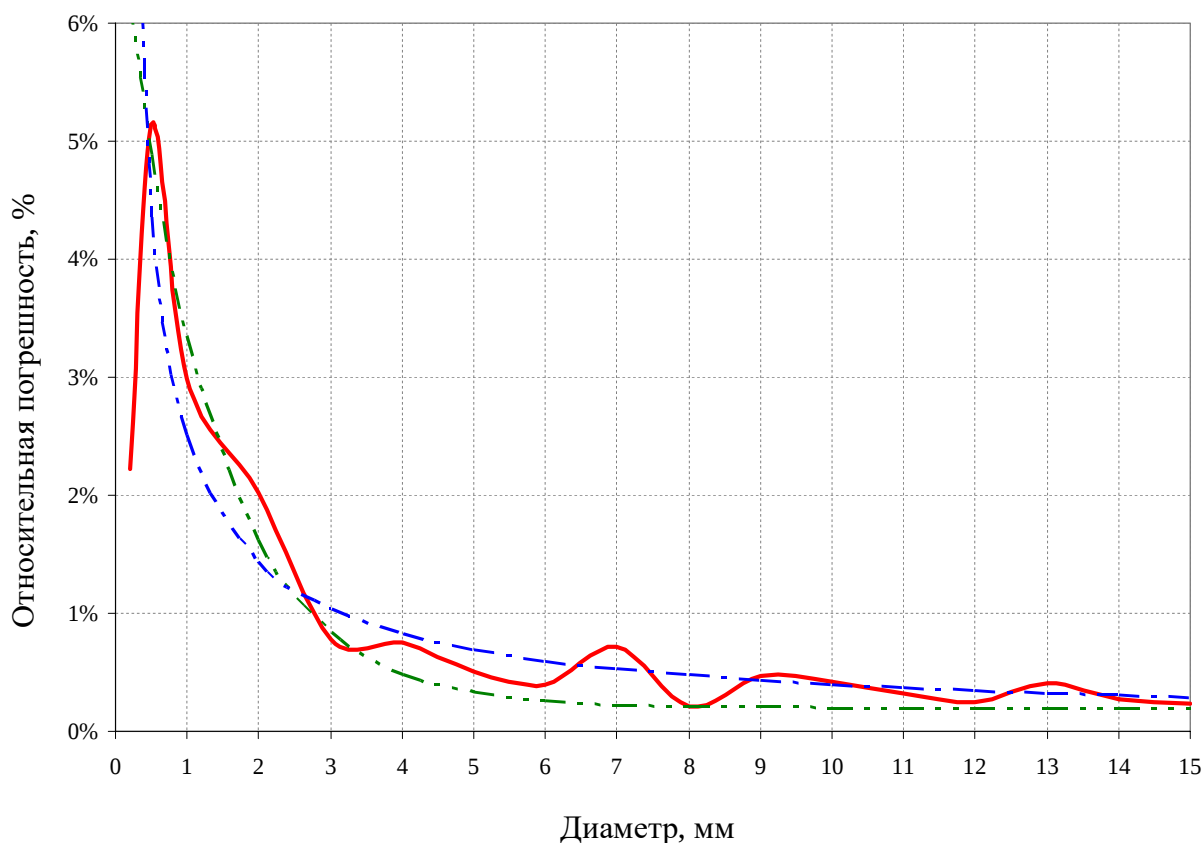


Рисунок 11 – Распределение относительной погрешности измерения толщины объектов

- Результат измерения
- - - Линия тренда экспоненциальная
- . - Линия тренда степенная

Таблица 4 – Измерение периметра кругов (разрешение 600 dpi)

Эталон		Результаты измерения		
Диаметр, мм	Периметр, мм	Периметр Р, мм	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
0,2	0,62832	0,35432	-0,27399	-43,608%
0,5	1,57079	1,36086	-0,20994	-13,365%
1	3,14159	3,00317	-0,13842	-4,406%
2	6,28318	6,33502	0,05184	0,825%
3	9,42477	9,65387	0,22909	2,431%
4	12,56637	12,96014	0,39377	3,134%
5	15,70796	16,27361	0,56564	3,601%
6	18,84955	19,58339	0,73383	3,893%
7	21,99114	22,89479	0,90365	4,109%
8	25,13274	26,21757	1,08483	4,316%
9	28,27433	29,51435	1,24002	4,386%
10	31,41592	32,85219	1,43626	4,572%
11	34,55751	36,16009	1,60257	4,637%
12	37,69911	39,49399	1,79488	4,761%
13	40,8407	42,78872	1,94801	4,770%
14	43,98229	46,09619	2,11390	4,806%
15	47,12389	49,40246	2,27858	4,835%

Среднеквадратичное отклонение – не превышает 0,045 мм.

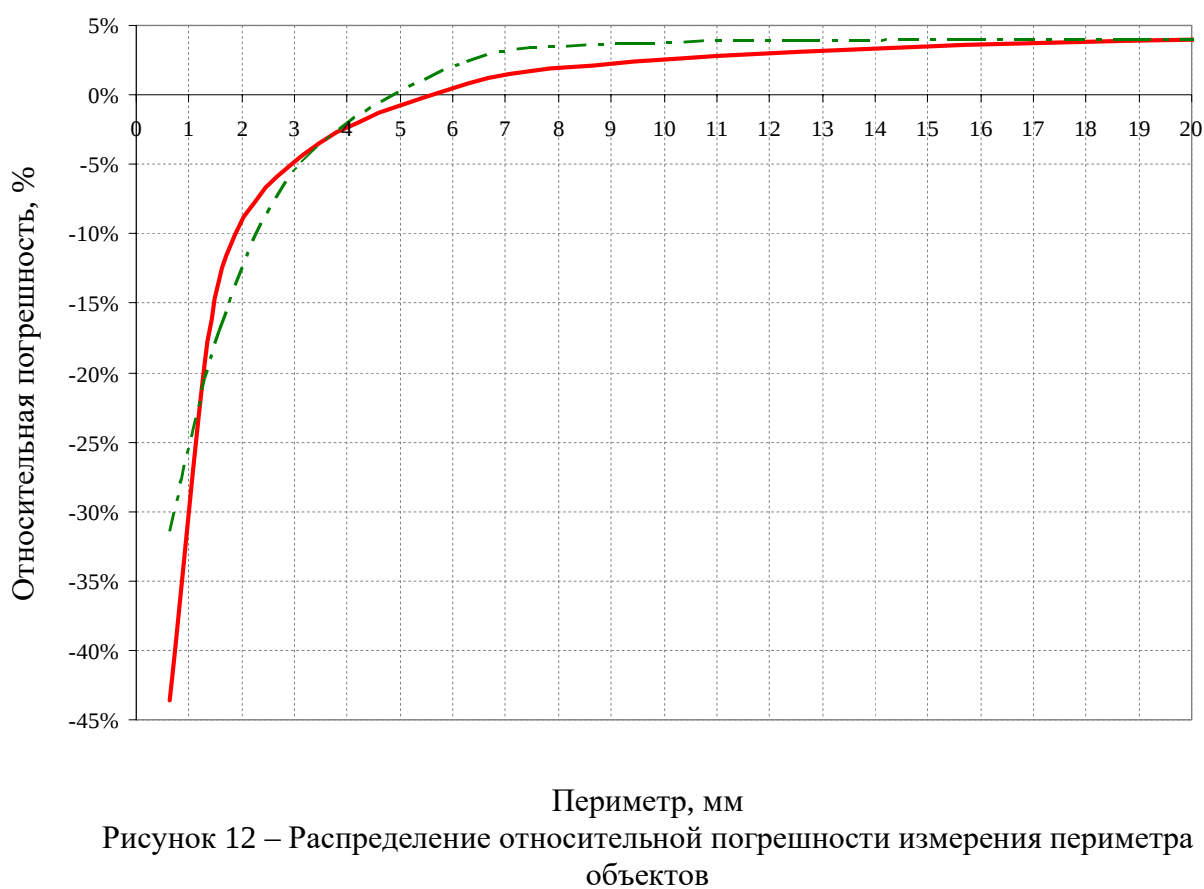


Таблица 5 – измерение площади кругов (разрешение 600 dpi)

Эталон		Результаты измерения		
Диаметр, мм	Площадь, мм ²	Площадь S, мм ²	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
0,2	0,031415927	0,00815	-0,02326	-74,045%
0,5	0,19635	0,12823	-0,06812	-34,695%
1	0,785398	0,64749	-0,13791	-17,559%
2	3,141593	2,84865	-0,29294	-9,325%
3	7,06858347	6,64667	-0,42191	-5,969%
4	12,566371	11,99111	-0,57527	-4,578%
5	19,634954	18,91054	-0,72442	-3,689%
6	28,274334	27,39098	-0,88335	-3,124%
7	38,48451	37,44751	-1,03700	-2,695%
8	50,26548	49,08037	-1,18511	-2,358%
9	63,617251	62,30695	-1,31030	-2,060%
10	78,539816	77,11732	-1,42250	-1,811%
11	95,0331778	93,44928	-1,58390	-1,667%
12	113,097336	111,38893	-1,70840	-1,511%
13	132,73229	130,84759	-1,88470	-1,420%
14	153,93804	151,93088	-2,00716	-1,304%
15	176,7146	174,54893	-2,16565	-1,226%

Среднеквадратичное отклонение – не превышает 0,025 мм.

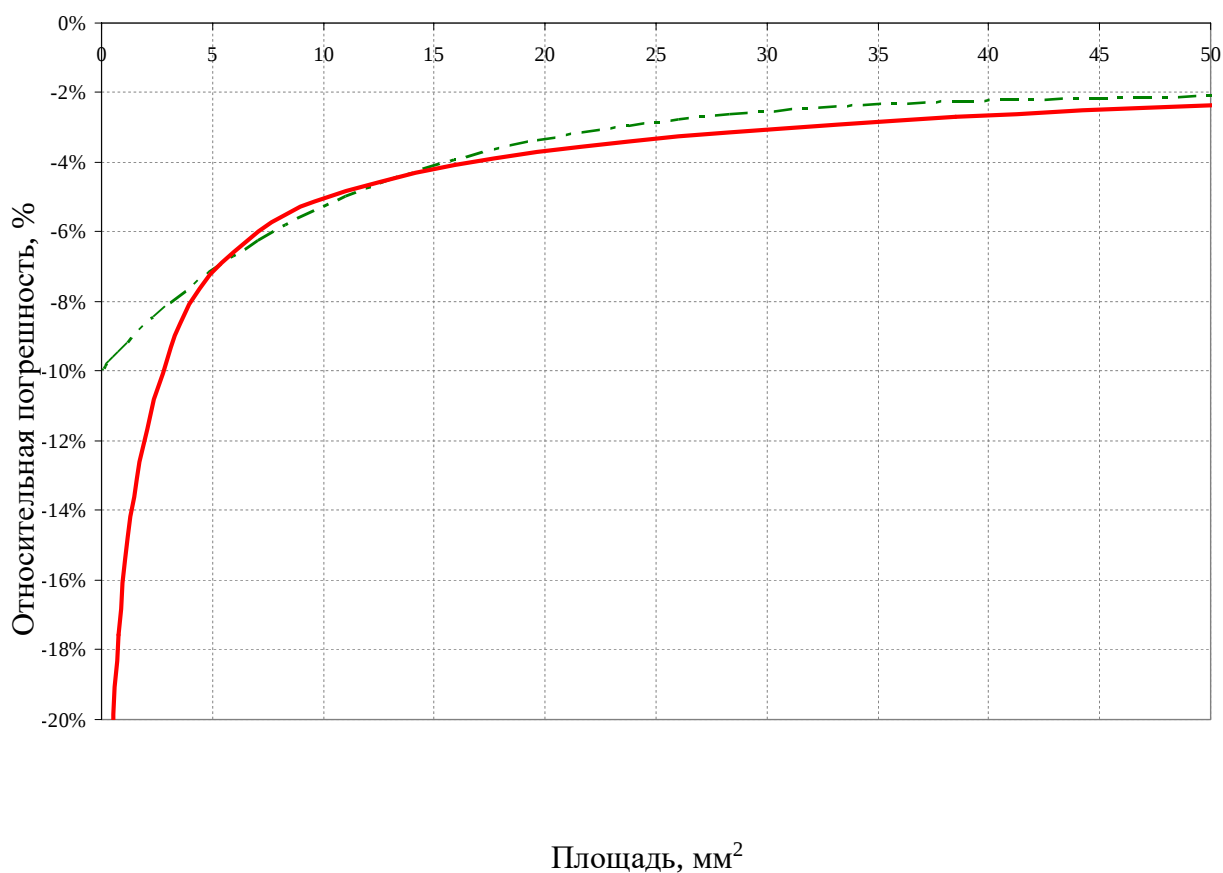


Рисунок 13 – Распределение относительной погрешности измерения площади объектов

— Результат измерения
 - - - - - Линия тренда экспоненциальная

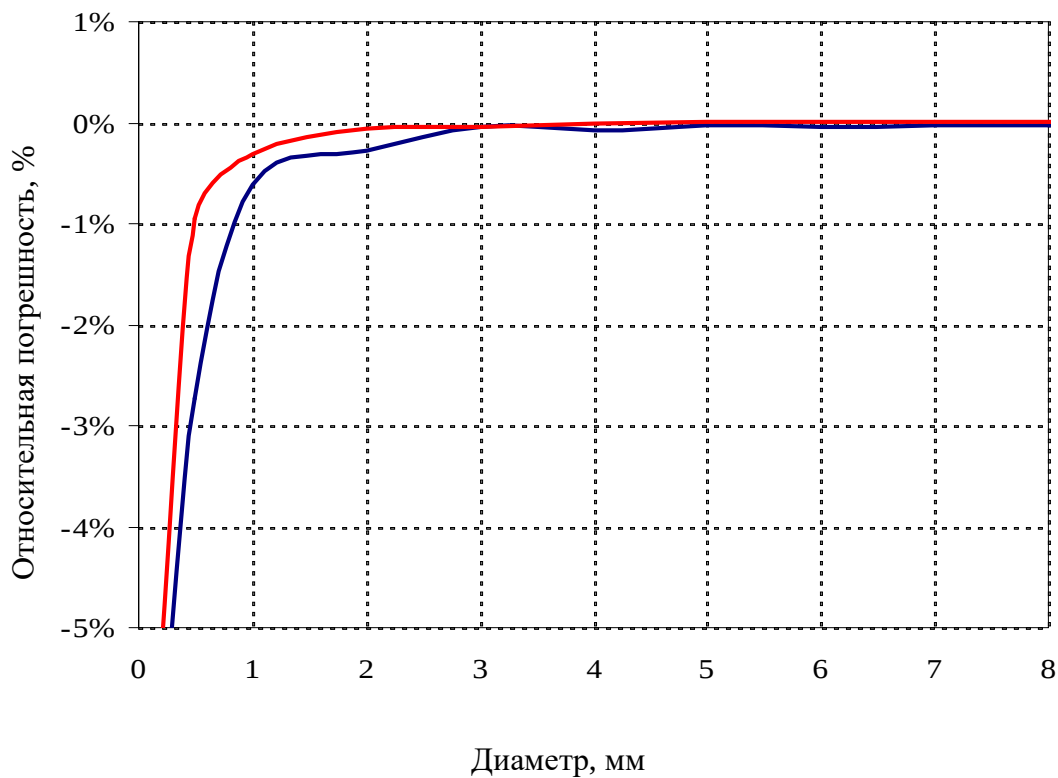


Рисунок 14 – Относительная погрешность измерения высоты объектов

— Результаты измерения с разрешением 1200 dpi
 — Результаты измерения с разрешением 600 dpi

Распределение относительной погрешности измерения ширины объектов

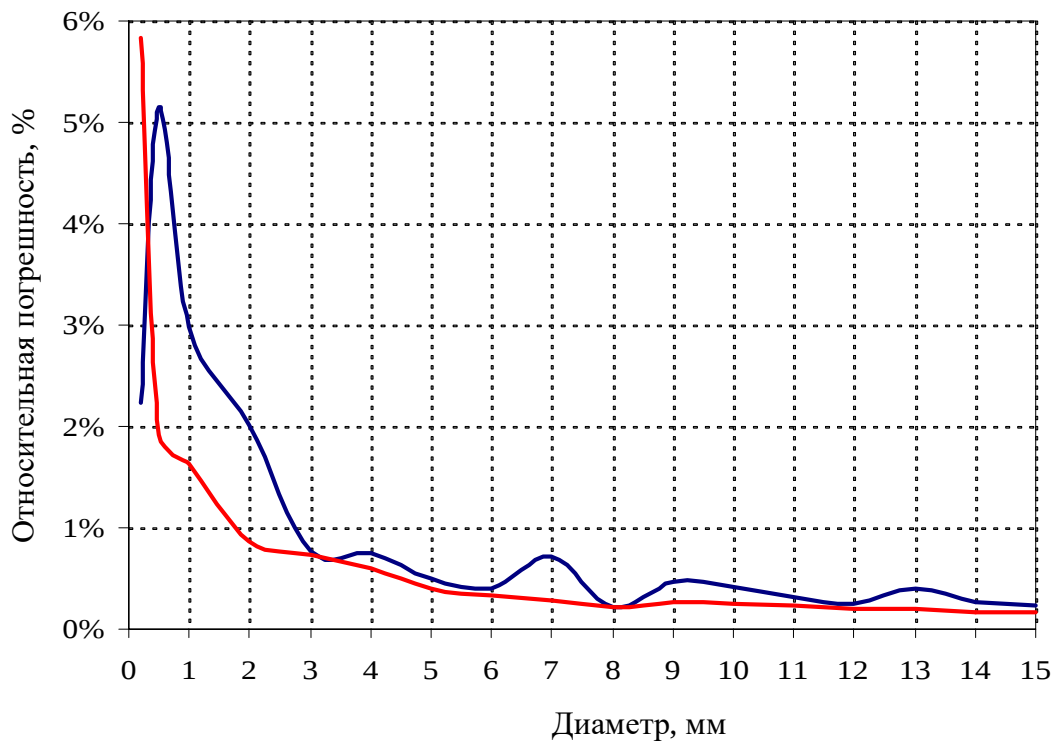


Рисунок 15 – Распределение относительной погрешности измерения ширины объектов

— Результаты измерения с разрешением 1200 dpi
 — Результаты измерения с разрешением 600 dpi

Выводы по экспериментальным исследованиям погрешностей измерений

В таблице 6 сведены максимальные погрешности измерений, полученные экспериментально при использовании эталонов в виде круга и эллипса.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что увеличение оптического разрешения до 1200 dpi позволяет добиться максимальной допустимой погрешности 1% при измерении объектов размером более 4 миллиметров. Эти размеры соответствуют размерам семян продовольственных культур.

Таблица 6 – Максимальные погрешности при измерении

Оптическое разрешение	Габариты объектов	Измеряемый параметр			
		Высота	Толщина	Периметр	Площадь
600 dpi	1–2 мм	3%	10%	5%	10%
	2–4 мм	1,5%	5%	3%	5%
	4–5 мм	1%	3%	1%	4%
	более 5 мм	1%	1%	1%	1%
1200 dpi	0,2–1 мм	5%	6%	14%	11%
	1–2 мм	1,5%	2%	3%	4%
	2–4 мм	1%	1%	2%	2%
	4–5 мм	1%	1%	1%	1%
	более 5 мм	1%	1%	1%	1%