

§ В КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

Ю.А. Ипатов, А.В. Кревецкий

ОБНАРУЖЕНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРЕПАРАТОВ КЛЕТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСИНЫ

***Аннотация.** Создание автоматизированных систем в области биотехнологий является важной областью научно-технических исследований и разработок. Решение проблемы объективности измерений, точности и временных ограничений при проведении анализа цифровых изображений препаратов древесины, является целью работы. Разработан алгоритм обнаружения границ перехода ранней и поздней древесины на цифровых изображениях, оптимальный по критерию максимального правдоподобия. Создана аппаратно-программная система, выполняющая синтезированный алгоритм на базе методов распознавания и анализа цифровых изображений клеточной структуры древесины, позволяет минимизировать трудоемкие операции выполняемых, оператором и повышает качество проводимых работ. Получены и проанализированы характеристики работы созданного комплекса для реальных цифровых изображений. Результаты созданной работы могут быть использованы при проведении инженерных и научных исследований в области лесного хозяйства для повышения их достоверности и производительности.*

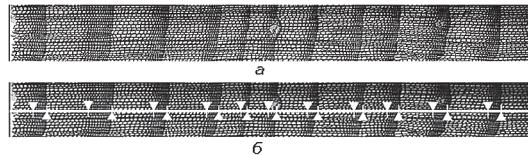
***Ключевые слова:** программное обеспечение, анализ изображений, текстурные границы, согласованная фильтрация, обнаружение границ, программный комплекс, биотехнологии, распознавание образов, синтез алгоритмов, цифровая обработка*

1. Введение и общая постановка задачи

Современные подходы по оценке динамики плодородности почв в лесотаксационных измерительных работах основаны на измерении и обнаружении параметров границ поздней и ранней древесины на изображениях поперечных срезов древесных стволов [1,2]. К настоящему времени в лесном комплексе эти задачи решаются ручными методами, полученные срезы анализируются экспертами с помощью калибровочных линеек и микроскопа. Становится необходимым набор статистических данных для обоснования результатов тиках исследований и возможности их широкого использования. В такой ситуации актуальным является решение проблем объективности проводимых измерений, а

также обеспечение заданного уровня точности при снижении общей трудоемкости проводимых измерений и повышению экономической эффективности исследований.

В настоящей работе предлагается один из путей решения данной проблемы путем автоматизации анализа изображений поперечных древесных спилов, сформированных монохромными телевизионными датчиками (рис.1, *a*). Регистрация, такого класса изображений для последующей автоматизации их обработки может быть осуществлена на базе аппаратно-программного комплекса, включающего сопрягаемые микроскоп, телевизионную передающую камеру и вычислительное устройство. Результатами исследований данных изображений, должны стать пространственные характеристики областей ранней и поздней древесины — координаты границ между разнотекстурными областями, их ширина, динамика ширины. На рис.1, *a* видно, что изображения разнотекстурных областей отличаются средним уровнем яркости, геометрическими размерами и масштабом клетчатой текстуры. Рассматривая отдельные текстурные области, можно наблюдать неоднородности древесины в виде смоляных каналов. Внутренняя структура однородных областей является клетчатой со значительными яркостными перепадами на границе отдельных клеток. Пространственное положение и геометрические размеры границ между текстурами не строго регулярное, все изображение содержит аддитивные яркостные шумы, уровень освещенности различных участков изображения может отличаться.



*Рис. 1. Пример цифрового изображения древесного спила:
a – исходное изображение б – результат обнаружения текстурных границ*

Таким образом, задача обработки микроскопических изображений поперечных древесных спилов может быть поставлена как задача обнаружения границ областей ранней и поздней древесины на неоднородном статистическом фоне при действии указанных мешающих факторов.

2. Статистические характеристики исследуемых изображений

Для синтеза алгоритма обнаружения границ областей ранней и поздней древесины необходимо знать геометрические и статистические характеристики изображений указанных областей. Из гистограмм яркости оцифрованного черно-белого изображения древесного спила следует, что в них нет ярко выраженных мод, соответствующих ярким областям ранней и темным областям поздней древесины. Таким образом, прямое использование известных методов сегментации разнотекстурных областей с глобальным порогом [3,4] для выделения границ не представляется возможным.

Парциальные гистограммы яркости (рис. 2) выбранных вручную соответствующих областей позволяют сделать вывод о том, что основная дисперсия яркости вдоль границ обусловлена клеточной структурой препарата. Зернистость может быть с высокой вероятностью аппроксимирована моделью аддитивного шума. Минимальная ширина текстурных полос считается известной и равна τ .

Проверка гипотезы о нормальном законе распределения шума по критерию Пирсона не подтвердилась, поэтому для нахождения закона распределения этой случайной величины был использован метод кривых Пирсона [5]. В общем виде дифференциальное уравнение Пирсона имеет вид:

$$\frac{1}{w} \frac{dw}{dz} = \frac{z - M}{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}, \quad (1)$$

где коэффициенты

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{2\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2 - 6\mu_2^3}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}; \\ b_1 &= -M = \frac{(\mu_4 + 3\mu_2^2)\mu_3}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}; \\ b_2 &= \frac{(4\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2)\mu_2}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}. \end{aligned} \quad (2)$$

определяются с учетом выборочных значений центральных моментов $\mu_1 = 0$, $\mu_2 = 133$, $\mu_3 = -43$, $\mu_4 = 55677$ [6].

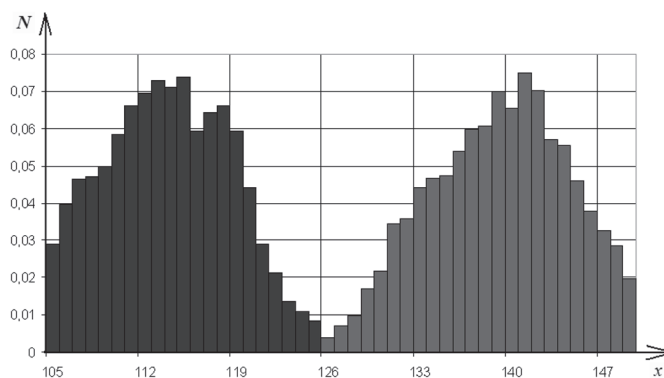


Рис. 2. Гистограмма яркости отдельных участков ранней и поздней древесины

Для случая комплексных корней уравнения

$b_0 z^2 + b_1 z + b_2 = 0$: $z_1 = \alpha + ai$, $z_2 = \alpha - ai$ закон распределения случайной величины x описывается выражением:

$$w(z) = w_0 \left(1 + \frac{(z - \alpha)^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-v \cdot \arctg \frac{z - \alpha}{a}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{\mu_3(r+2)}{4\mu_2}, \quad a = \frac{\sqrt{\mu_2}}{4} \sqrt{16(-r-1) - \beta_1(-r-2)^2}, \quad m = -\frac{1}{2}(r-2),$$

$$v = \frac{\mu_3 r(2-r)}{4\mu_2 a}, \quad w_0 = \frac{n}{aF(-r, v)}, \quad r = 2 - \frac{1}{b_0}, \quad \text{а } F(\bullet, \bullet) - \text{ функция Пирсона}$$

$$F(-r, v) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-v \cdot \arctg \frac{t}{a}} dt, \quad (4)$$

где интеграл определяет значение функции Пирсона при заданных параметрах $-r, v$.

Анализ полученных гистограмм наблюдаемых изображений позволяет сделать следующие выводы. Средняя яркость исследуемых областей отличается. Неравномерность освещенности изображения вдоль границ участков областей ранней и поздней древесины мала по сравнению с неравномерностью по площади всего кадра и их можно считать статистически однородными по яркости. Так как отклонение границ от среднего вектора их наклона более чем на два порядка меньше их длины, то границы областей рассматриваются как параллельные, а их криволинейностью в дальнейшем пренебрегаем.

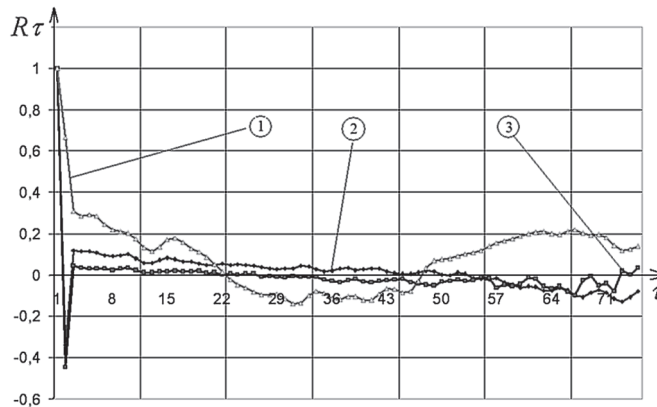


Рис. 3. АКФ для полученных срезов яркости для (1) смешанной, (2) ранней и (3) поздней древесины

Интервалы корреляции яркостных отсчетов внутри данных областей приблизительно равны одному элементу изображения (рис. 3), как вдоль горизонтальной, так и вдоль вертикальной осей, т.е. статистически независимы и могут быть аппроксимированы моделью белого шума.

3. Синтез алгоритма обнаружения текстурного перехода

Основываясь на полученных характеристиках изображений, принимаем следующую статистическую модель наблюдения: $\mathbf{z} = \mathbf{s} + \mathbf{n}$, где $\mathbf{z} = \{z_{yx}\}_{x=0, X-1, y=0, Y-1} = \{z_{yx}\}_{YX}$ – матрица яркостных отсчетов наблюдаемого изображения, $\mathbf{s} = \{s_{yx}\}_{YX}$, $S_{yx} = S_x \forall y$ – эталонное изображение, $\mathbf{n} = \{n_{yx}\}_{YX}$ – шумовая составляющая изображения, $x = 0, 1, \dots, X-1$ и $y = 0, 1, \dots, Y-1$ – пространственные координаты, X, Y – ширина и высота изображения соответственно.

С учетом независимости яркостных отчетов совместная условная плотность распределения вероятности для наблюдаемого изображения на участке из двух смежных текстур имеет вид:

$$w(\mathbf{z} | x_0) = \prod_{x=0}^{X-1} \prod_{y=0}^{Y-1} w\{z_{yx} | x_0\}, \quad (5)$$

где условная плотность яркостного отсчета $w\{z_{yx} | x_0\} = w\{z_{yx} - s_{x-x_0}\}$ соответствует распределению Пирсона (3), x_0 – горизонтальное смещение границы раздела двух текстурных участков.

Для зарегистрированного изображения \mathbf{z} условную плотность (5) можно рассматривать как функцию правдоподобия неизвестного параметра x_0 :

$$w(\mathbf{z}, x_0) = \prod_{x=0}^{X-1} \prod_{y=0}^{Y-1} \left\{ w_0 \left(1 + \frac{(z_{yx} - \alpha)^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-\nu * \arctg \frac{z_{yx} - \alpha}{a}} \right\} | x_0, \quad (6)$$

значение, которого и требуется оценить.

Как известно для приема детерминированного сигнала на фоне белого шума оптимальным в байесовском смысле является устройство на основе согласованного фильтра, формирующего монотонное преобразование от функции правдоподобия, и устройства выбора максимума [7].

Отклик такого фильтра вычисляется согласно выражению

$$g_{x_0} = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} z_{yx} s_{y(x-x_0)} = \sum_{x=0}^{X-1} s_{x-x_0} \sum_{y=0}^{Y-1} z_{yx}. \quad (7)$$

Из структуры формулы (7) следует, что оптимальный алгоритм обнаружения осуществляет накопление яркостных отчетов вдоль линии границ и осуществляет согласованную фильтрацию накопленной строки (рис. 4).

При вертикальной ориентации обнаруживаемых границ текстурных переходов и эталонном их изображении, соответствующему идеальному ступенчатому перепаду, алгоритм (7) упрощается и сводится к накоплению яркостных отсчетов по вертикали:

$$\bar{g} = \left\{ \frac{1}{Y} \sum_{y=0}^{Y-1} z_{xy} \right\}_{x=0, \overline{X-1}}. \quad (8)$$

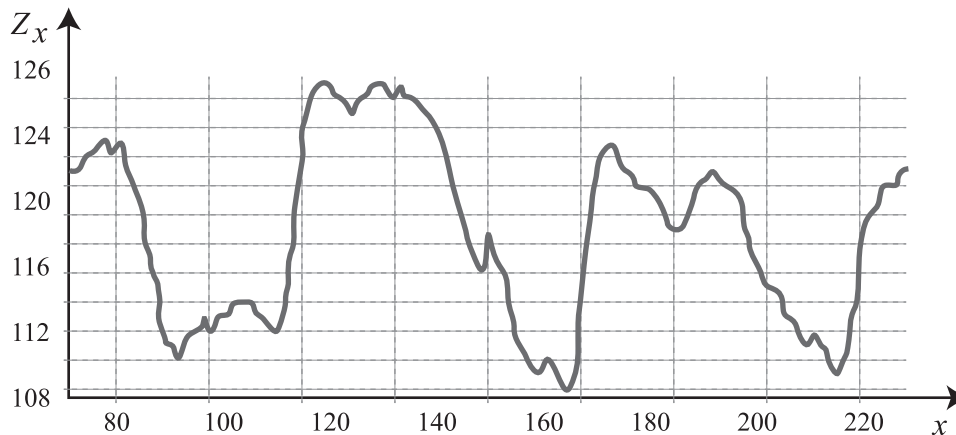


Рис. 4. Распределение усредненной по вертикали яркости изображения поперечного спила ствола дерева

Устройство выбора максимума находит оценку

$$\hat{x}_0 = \arg \max_{x_0} (g_{x_0}). \quad (9)$$

Так максимумов может быть несколько, то их поиск осуществляется по равенству нулю первой производной (первой разности) и отрицательному значению второй производной (второй разности) g_x .

4. Адаптация алгоритма при неизвестной угловой ориентации границ текстурных переходов

Технология подготовки препаратов часто не обеспечивает строгую вертикальную ориентацию обнаруживаемых границ в изображении. Исследования отклика фильтра показали (рис.5), что с увеличением угла рассогласования эталонного изображения

и наблюдаемого дисперсия $\sigma^2_g = \sum_{x=0}^{X-1} \frac{[g_x - \bar{g}]^2}{X}$ его отсчетов $\mathbf{g} = \{g_x\}_{x=0, \overline{X-1}}$

увеличивается. Таким образом, величина дисперсии может служить критерием для оценки угловой ориентации изображения.

В этом случае алгоритм оценки угловой ориентации состоит из нескольких шагов. На каждом i -м шаге изображение \mathbf{Z} поворачивается на угол φ_i , где $\varphi_i = \Delta\varphi \cdot i$, $i = 0, 1, 2, \dots$ с шагом $\Delta\varphi$. Здесь же находится отклик фильтра $\mathbf{g}(\varphi_i)$ соответствующий текущему повороту и дисперсия его отсчетов $\sigma_g^2(\varphi_i)$.

В качестве выходного значения фильтра после выполнения всех шагов принимается:

$$\mathbf{g} = \arg \max_{\varphi_i} (\sigma_g(\varphi_i)). \quad (10)$$

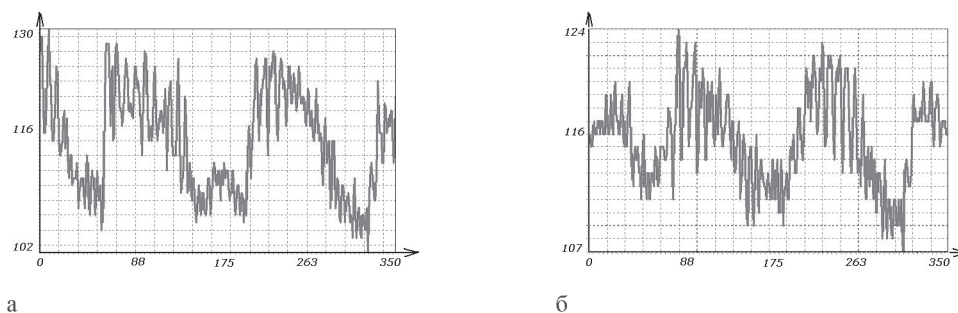


Рис.5.

Графики усредненной яркости по вертикали кадра:
 а – для изображения с вертикально ориентированными текстурами;
 б – для изображения, повернутого на некоторый угол φ_i

Проведенные практические эксперименты доказывают эффективность использования данного подхода в процессе автоматической компенсации углового рассогласования эталонного и наблюдаемого изображения.

5. Аппаратно-программный комплекс для анализа микроскопических изображений древесных спилов

Для автоматизации анализа параметров областей ранней и поздней древесины в процессе исследований был разработан аппаратно-программный комплекс BioImage. С помощью него и были получены приведенные в работе характеристики. Для исключения ошибок, связанных с выбросами случайных процессов и других аномалий, в комплексе предусмотрена возможность ручной коррекции результатов обнаружения и измерения координат границ рассматриваемых областей. Разработанная программа имеет модульную архитектуру, это позволяет легко освоить пользователю все виды работ, проводимые в данной системе, а также дорабатывать и развивать имеющиеся функциональные возможности.

Результаты работы описываемого аппаратно-программного комплекса представляются в виде маркеров обнаруженных характерных точек на изображении исследуемого образца

(см. рис. 1, б) для возможности ручной коррекции аномальных ошибок, а также в виде текстового отчета с числовыми сведениями о ширине каждого вида древесины за соответствующий год.

Для привязки размеров на цифровом изображении с размерами на образце, в комплексе предусмотрен режим калибровки телевизионной регистрирующей системы.

Для снижения вычислительной сложности в программной реализации рассмотренного алгоритма функция s_x заменена на идеальный перепад яркости

$$s_x = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [0; \tau] \\ -1, & \text{при } x \in [\tau; 2 \cdot \tau] \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}, \quad (11)$$

Это позволяет за один проход вычислить как фронт (по максимуму g_{x_0}), так и срез (по минимуму g_{x_0}) яркостного перепада, а операции произведения при согласованной фильтрации, заменить операцией смены знака.

6. Анализ характеристик алгоритма обнаружения

В качестве характеристик качества работы предложенного алгоритма примем зависимость средней статистической погрешности σ_{x_0} определения положения границ от уровня яркостных шумов σ .

Дисперсия ошибки определения положения x_0 максимального отсчета для практически значимого диапазона отношений сигнал-шум $q^2 = \|\mathbf{s}\|^2 \sigma^{-2} > 1$ определяется второй производной автокорреляционной функции $d(x_0) = \sum s_x s_{x-x_0}$ в области максимума: $\sigma_{x_0}^2 = -[q^2 d''(x_0)]^{-1}$ [7]. Для приведенного в примере класса изображений это соответствует погрешности, приведенной на рис. 8.

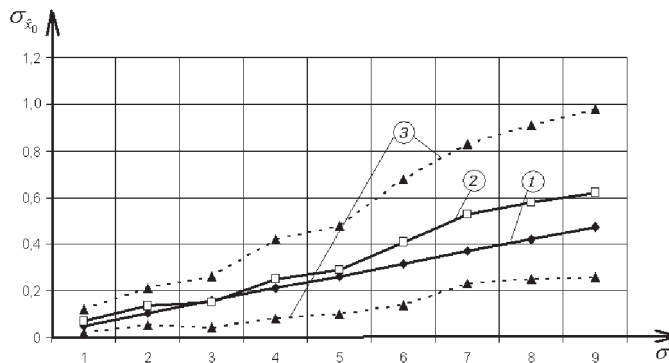


Рис. 6. Зависимость точности обнаружения границ областей ранней и поздней древесины от степени зашумленности изображения: 1 — теоретическая, 2 — эмпирическая зависимости, 3 — доверительные интервалы

Для получения данных характеристик был проведен статистический эксперимент, результаты которого приведены на рис. 6. Из графика видно, что теоретические и эмпирические погрешности измерения величины x_0 находятся в пределах доверительного интервала для уровня значимости 0,05. По оси абсцисс откладывается СКО яркостного шума σ , а по оси ординат — СКО измерения положения границ, выраженная в пикселях исследуемого цифрового изображения.

Заключение

Созданные алгоритмы и разработанный аппаратно-программный комплекс позволяют автоматизировать анализ изображений поперечных древесных спилов с высокой точностью обнаружения текстурных границ, что в несколько раз выше существующих ручных методов.

Использование квазиоптимального алгоритма позволяет более чем в два раза выиграть в трудоемкости, по сравнению с оптимальным алгоритмом при несущественной плате в точности.

Время работы алгоритма для одного телевизионного кадра изображения на современном процессоре Intel Core i5 составляет менее одной секунды, что на несколько порядков меньше длительности ручных методов. В разработанной системе предусмотрено документирование результатов анализа изображений, что позволяет формировать текстовый отчет в общедоступных форматах и сохранять параметры в базе данных.

Аппаратно-программный комплекс обеспечивает анализ изображений границ текстурных участков с высокой точностью и поэтому предлагается для использования в лесотаксационной отрасли. Комплекс апробирован на образцах, полученных учеными Поволжского государственного технологического университета, и внедрен в научно-исследовательский и учебный процесс.

Разработанные алгоритмы имеют свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ №2007610624 «BioImage Tree v.1.0» от 8.03.2007 года.

Список литературы:

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн.1,2. — М.: Мир, 1982.
2. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. — М.: МГУЛ, 2001. — 340 с.
3. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений. Методы пороговой обработки// Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — №10. — С.6—24.

4. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов/ Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, и др.; Под ред. Я.А.Фурмана. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 592 с.
5. Митропольский А.К. Техника статистических распределений. – М.: НАУКА, 1971.
6. Романовский В. И. Математическая статистика. Издательство Академии Наук УзССР, 1961
7. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

Библиография:

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн.1,2. — М.: Мир, 1982.
2. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. — М.: МГУЛ, 2001. — 340 с.
3. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений. Методы пороговой обработки// Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — №10. — С.6—24.
4. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов/ Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, и др.; Под ред. Я.А.Фурмана. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 592 с.
5. Митропольский А.К. Техника статистических распределений. – М.: НАУКА, 1971.
6. Романовский В. И. Математическая статистика. Издательство Академии Наук УзССР, 1961
7. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

References (transliteration):

1. Prett U. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Kn.1,2. — M.: Mir, 1982.
2. Ugolev B.N. Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya. — M.: MGUL, 2001. — 340 s.
3. Bakut P.A., Kolmogorov G.S., Vornovitskiy I.E. Segmentatsiya izobrazheniy. Metody porogovoy obrabotki// Zarubezhnaya radioelektronika. — 1987. — №10. — S.6—24.
4. Vvedenie v konturnyy analiz; prilozheniya k obrabotke izobrazheniy i signalov/ Ya.A. Furman, A.V. Krevetskiy, A.K. Peredreev, i dr.; Pod red. Ya.A.Furmana. – 2-e izd. – M.: FIZMATLIT, 2003. — 592 s.
5. Mitropol'skiy A.K. Tekhnika statisticheskikh raspredeleniy. – M.: NAUKA, 1971.
6. Romanovskiy V. I. Matematicheskaya statistika. Izdatel'stvo Akademii Nauk UzSSR, 1961
7. Kazarinov Yu.M. Radiotekhnicheskie sistemy. – M.: Vysshaya shkola, 1990. – 496 s.