

УДК 343.98+004.932

А. А. Коляда

доктор физико-математических наук

E-mail: razan@tut.by

В. В. Ревинский

доктор технических наук, доцент

E-mail: vvrevinski@mail.ru

Д. Е. Кузменков

E-mail: kuzmenkou-11@inbox.ru

А. Н. Хох

E-mail: lannlhoh@gmail.com

НПЦ Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь
г. Минск, Беларусь

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье представлена оригинальная версия предварительного компьютерного дендроанализа полутонковых изображений керна. Цель разработки состоит в оценке параметров развития древесины во времени. Для контрастирования и сглаживания исходного изображения применены адаптивные гауссовские фильтры. По критерию достоверности получаемых оценок наибольшей эффективностью обладает фильтр Гаусса с ориентированными двумерными апертурами. Решение задачи детектирования и анализа интервалов возрастания/убывания интенсивности роста древесины и других параметров в направлении, ортогональном к годичным слоям, осуществляется с помощью линейной апертуры соответствующей ориентации. Для определения требуемого набора характеристик синтезирован и программно реализован высокоэффективный алгоритм.

Ключевые слова: буровые керны, годичные слои, дендрохронологический анализ, интервалы монотонности, линейная апертура, полутонковые изображения, фильтр Гаусса.

Важнейшим актуальным направлением развития дендрохронологических экспертных исследований в настоящее время является внедрение современных методов и средств цифровой обработки информации [1; 2]. Это, в частности, относится к технологии дендроанализа изображений, снимаемых со специально подготовленных образцов – буровых кернов, которые в той или иной мере отражают структуру поперечных сечений древесных стволов. Применение компьютерных средств обработки изображений дает принципиально новые возможности для повышения эффективности осуществляемого анализа, прежде всего, по таким показателям, как точность и надежность конечных результатов, производительность и др.

Настоящая статья посвящена задаче детектирования расстояний между смежными зонами («линиями»), относящимися к годичным слоям, а также межгодовых участков убывания и возрастания интенсивности развития во времени деревьев в горизонтальной плоскости. Получаемые данные позволяют строить функциональные зависимости, которые адекватно описывают характер исследуемого развития деревьев, как по годам, так и сезонам года.

Исходной информационной базой осуществляемого дендроанализа служит сформированное по представленному ядру полутоновое изображение $F = \{f(x, y)\}_{(x, y) \in \Omega}$, которое определено на кадре $\Omega = \{0, 1, \dots, W - 1\} \times \{0, 1, \dots, H - 1\}$ с протяженностями W и H пикселей соответственно по абсциссе x и ординате y ($f(x, y)$ – яркость (интенсивность) в точке (x, y)). Размеры W и H кадра Ω , естественно, устанавливаются в соответствии с размерами ядра. Как правило, они являются величинами порядка $W = 10\ 000$, $H = 50 \div 100$ пикселей. Предполагается, что ось абсцисс используемой системы координат направлена от коры ствола к его сердцевине примерно вдоль нижней стороны ядра, а ось ординат вдоль его левой стороны (снизу вверх).

На начальном шаге выполняемого процесса предварительной обработки изображения F производится его контрастирование. Результирующее изображение $\tilde{F} = \{\tilde{f}(x, y)\}_{(x, y) \in \Omega}$ данной операции формируется по правилу

$$\tilde{f}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } f(x, y) + \alpha(f(x, y) - \bar{f}(x, y)) < 0, \\ 255, & \text{если } f(x, y) + \alpha(f(x, y) - \bar{f}(x, y)) > 255, \\ f(x, y) + \alpha(f(x, y) - \bar{f}(x, y)) & \text{– в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где α – подбираемый экспериментально положительный вещественный коэффициент усиления интенсивности $f(x, y)$ в точке (x, y) ; $\bar{f}(x, y)$ – элемент изображения $\bar{F} = \{\bar{f}(x, y)\}_{(x, y) \in \Omega}$, которое составлено из локальных средних $\bar{f}(x, y)$, полученных для $f(x, y)$ в некоторых прямоугольных окрестностях с размерами $L_x = 2W_x + 1$ и $L_y = 2W_y + 1$; W_x и W_y – натуральные числа.

Эффективный инструментарий для требуемого усреднения дает гауссовский фильтр [3], описываемый соотношением

$$\bar{f}(x, y) = \lfloor \frac{0,25}{N_x \cdot N_y} \sum_{k=-W_x}^{W_x} \sum_{l=-W_y}^{W_y} \exp(-D_x(x-k)^2 - D_y(y-l)^2) f(k, l) \rfloor, \quad (2)$$

где N_x и N_y – нормирующие коэффициенты, определяемые как

$$N_x = 0,5 + \sum_{u=1}^{W_x} \exp(-D_x \cdot u^2), \quad N_y = 0,5 + \sum_{v=1}^{W_y} \exp(-D_y \cdot v^2), \quad (3)$$

где D_x и D_y – характеристики рассеяния фильтра в направлениях осей абсцисс и ординат соответственно; через $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначается ближайшее к вещественной величине целое число.

Отметим, что при стремлении дисперсий D_x и D_y к 0 фильтр Гаусса, реализуемый согласно (2) с использованием (3) по своему действию приближается к фильтру со скользящим средним [4–6]. Параметры W_x , W_y , D_x , D_y применяемого фильтра подбираются экспериментальным путем.

Полученное контрастирование изображения \tilde{F} подлежит сглаживанию, нивелирующему шумовые составляющие, обусловленные, в частности, погрешностью геометрической ориентации ядра. В соответствии с этим осуществляемое сглаживание нацелено преимущественно на коррекцию \tilde{F} в направлении оси ординат. Требуемая операция может быть выполнена с помощью гауссовского фильтра, дисперсионная характеристика D_y которого выбирается довольно большой, а характеристика D_x – малой. Это, как правило, позволяет в значительной мере устранить искажения темных линий (образов фрагментов годовичных слоев), вызванные геометрическими погрешностями. Однако более эффективное решение задачи сглаживания изображения \tilde{F} дает гауссовская фильтрация, осуществляемая по ориентированным двумерным апертурам [5; 6]. Реализация данного подхода предполагает фор-

мирование для \tilde{F} поля направлений $\Delta = \{\delta(x, y)\}_{(x, y) \in \Omega}$, где $\delta(x, y)$ – угол наклона к оси x – в касательной, проведенной к линии в точке (x, y) ($\delta(x, y) \in [-\pi/2; \pi/2)$). Для расчета углов $\delta(x, y)$ обычно применяется формула

$$\delta(x, y) = \left| \pi/2 + \arctg(D_2(x, y) / D_1(x, y)) \right|_{\pi}, \quad (4)$$

в которой $D_1(x, y)$ и $D_2(x, y)$ – компоненты вектора градиента $grad \tilde{f}(x, y)$, вычисляемые с применением операторов Робертса или Собела [4; 5], через $|\delta|_{\pi}$ обозначается симметрический остаток от деления δ на π , определяемый равенством $\delta = |\delta|_{\pi} + \lfloor \delta / \pi \rfloor \cdot \pi$.

При известном поле направлений Δ требуемые двумерные апертуры для адаптивной гауссовской ориентированной фильтрации (ГОФ) изображения \tilde{F} определяются как множества вида

$$A_{\delta_{\perp}}^{-}(x, y; L_{\perp} x \times L_{\perp} y) = \bigcup_{i=-W_{\perp} x}^{W_{\perp} x} A_{\delta}^{-}(x_i, y_i; L_{\perp} y), \quad (5)$$

где (x_i, y_i) – точки поперечных линейных апертур (ЛА):

$$A_{\delta_{\perp}}^{-}(x, y; L_{\perp} x) = \{(x_i, y_i) \mid i = \overline{-W_{\perp} x, W_{\perp} x}\}, \quad (6)$$

определяемые согласно правилу

$$(x_i, y_i) = (x + \text{sign}(i) \cdot \lfloor |i| \rfloor \cdot \cos \delta_{\perp}, y + \text{sign}(i) \cdot \lfloor |i| \rfloor \cdot \sin \delta_{\perp}). \quad (7)$$

Гауссовский ориентированный фильтр, предназначенный для сглаживания изображения \tilde{F} с применением апертур, конструируемых согласно (4)–(7), описывается соотношением

$$\hat{f}(x, y) = \frac{0,25}{N_{\perp} x \cdot N_{\perp} y} \sum_{(k, l) \in A_{\delta_{\perp}}^{-}(x, y; L_{\perp} x \times L_{\perp} y)} \exp(-D_{\perp} x(x-k)^2 - D_{\perp} y(y-l)^2) \tilde{f}(k, l), \quad (8)$$

где $N_{\perp} x$ и $N_{\perp} y$ – нормирующие коэффициенты, рассчитываемые по формулам (3).

Ключевым этапом рассматриваемой обработки входного изображения F является анализ монотонности (убывания/возрастания) последовательности элементов полученного в результате ГОФ изображения \hat{F} , которая отвечает ЛА с начальной точкой $(X_0, Y_0) = (0, \lfloor H/2 \rfloor)$, направлением δ_{\perp} , перпендикулярным к направлению $\delta(X_0, Y_0)$ и имеющей длину $L \leq W$ пикселей. Согласно (6), (7) используемая ЛА представляет собой множество точек кадра:

$$A_{\delta_{\perp}}(X_0, Y_0; L) = \{(X_i, Y_i) \mid X_i = X_0 + \lfloor i \rfloor \cdot \cos \delta_{\perp}, Y_i = Y_0 + \lfloor i \rfloor \cdot \sin \delta_{\perp}; i = \overline{0, L}\}. \quad (9)$$

Детектирование и анализ интервалов монотонности контрастированного и сглаженного входного изображения F – изображения \hat{F} в ЛА (8) осуществляется по нижеследующему алгоритму.

Параметры алгоритма:

- ширина W и высота H кадра Ω изображений;
- полудлины $W_{\perp} x$ и $W_{\perp} y$ двумерных апертур соответственно в x - и y -направлениях для фильтров Гаусса, а также дисперсионные характеристики $D_{\perp} x$ и $D_{\perp} y$ для этих фильтров (см. (2)–(7));
- начальная точка (X_0, Y_0) и длина L ЛА (8) для детектирования интервалов монотонности последовательностей отсчетов изображения;
- радиус R окрестностей элементов ЛА при ее сканировании;
- верхний ограничительный порог $f_{K, \max}$ для интенсивности $\hat{f}(x, y)$ на годичных слоях;
- доверительная вероятность $P_{\text{дов}}$, используемая при выделении годичных слоев.

Входные данные: Изображение \hat{F} , сформированное с помощью адаптивного ГОФ.

Выходные данные:

- размеры B_R1 и B_R2 (по ширине) слоев последнего и предпоследнего годов;
- длина интервала прироста (LI_EW) ранней древесины;
- длина интервала прироста (LI_LW) поздней древесины;
- расстояние между слоями последнего и предпоследнего годов.

Тело алгоритма детектирования и анализа интервалов монотонности (ДАИМ) сглаженного изображения ядра в линейной апертуре

ДАИМ 1. С помощью формулы типа (4) для изображения \hat{F} в точке (X_0, Y_0) кадра Ω считать направление $\delta_{\perp} = \lfloor \delta + \pi / 2 \rfloor_{\pi}$.

ДАИМ 2. Активировать одномерные $(L + 1)$ -элементные массивы LA_X и LA_Y для точек ЛА $A_{\delta_{\perp}}(X_0, Y_0; L)$ с началом (X_0, Y_0) и направлением δ_{\perp} с последующим формированием по правилу (8) содержимых этих массивов:

$$LA_X[i] = X_i = X_0 + \lfloor i \cdot \cos \delta_{\perp} \rfloor, LA_Y[i] = Y_i = Y_0 + \lfloor i \cdot \sin \delta_{\perp} \rfloor, (i = \overline{0, L}).$$

ДАИМ 3. Во вспомогательный $(L + 1)$ -элементный массив I_LA поместить отсчеты изображения \hat{F} , охватываемые ЛА $A_{\delta_{\perp}}(X_0, Y_0; L)$:

$$I_LA[i] = f(LA_X[i], LA_Y[i]) (i = \overline{0, L}).$$

ДАИМ 4. Активировать и обнулить $(L + 1)$ -элементный массив ASP_E признаков точек экстремума в анализируемой последовательности отсчетов изображения \hat{F} .

ДАИМ 5. Признаку SM монотонности анализируемой последовательности на текущем интервале присвоить значение $SM = 0$.

Детектирование точек экстремума

ДАИМ 6. Переменной i цикла и дифференциалу D_M монотонности анализируемой последовательности в текущем элементе присвоить значения: $i = 1, D_M = -I_LA[1]$.

Коррекция дифференциала монотонности в i -м элементе последовательности

ДАИМ 7. $D_M = D_M + I_LA[i-1] + I_LA[i]$.

ДАИМ 8. Если $i < R$, то выполнить $D_M = D_M - I_LA[2i]$ и перейти к ДАИМ 11.

ДАИМ 9. При $i > L - R$ положить $D_M = D_M - I_LA[2i - L]$ и перейти к ДАИМ 11.

ДАИМ 10. $D_M = D_M - I_LA[i - R - 1] - I_LA[i + R]$.

Анализ дифференциала монотонности

ДАИМ 11. В случае, когда $SM \neq \text{sign}(D_M)$, выполнить операции присвоения: $SM = \text{sign}(D_M), ASP_E[i] = SM$.

ДАИМ 12. При $i \neq L - 1$ переменную i инкрементировать ($i = i + 1$) и перейти к ДАИМ 7.

Расчет требуемых характеристик роста древесины

Оценка ширины слоя последнего года

ДАИМ 13. Положить $j = 1, n = k = 0$.

ДАИМ 14. Если $I_LA[j] \leq f_{K, \max}$, то в качестве конечной точки внешнего слоя в рассматриваемой ЛА принять $END_R1 = j$, выполнить операции инкрементации: $n = n + 1, k = k + 1$ и перейти к ДАИМ 16.

ДАИМ 15. Переменную j увеличить на 1 ($j = j + 1$) и перейти к ДАИМ 14.

ДАИМ 16. Инкрементировать j ($j = j + 1$).

ДАИМ 17. Если $I_LA[j] \leq f_{K, \max}$, то выполнить операции инкрементации: $n = n + 1, k = k + 1$ и перейти к ДАИМ 16.

ДАИМ 18. Нарастить n ($n = n + 1$), после чего проверить неравенство $k \leq nP_{\text{дов}}$ и при его выполнении перейти к ДАИМ 16.

ДАИМ 19. Зафиксировать начальную точку внешнего слоя в рассматриваемой ЛА: $BEG_R1 = j$ и в качестве ширины слоя принять величину $B_R1 = BEG_R1 - END_R1$.

Определить расстояние между последним и предпоследним слоями, а также интервалы роста ранней древесины и поздней древесины

ДАИМ 20. В качестве последней точки поздней древесины принять $END_LW = j$ и положить $f = f_{K, \max}$.

ДАИМ 21. Если $ASP_E[j] = 1$, то выполнить действия:

ДАИМ 21А) при $I_LA[j] \geq f$ переменной f присвоить значение $f = I_LA[j]$, в качестве текущего значения начальной точки поздней древесины принять $BEG_LW = j$ и перейти к **ДАИМ 23**;

ДАИМ 21Б) в случае $f_{K, \max} < I_LA[j] < f$ перейти к **ДАИМ 23**;

ДАИМ 21В) начальной точке ранней древесины и конечной точке слоя предпоследнего года (согласно ЛА) присвоить значение j : $BEG_EW = END_R2 = j$, положить $n = k = 1$ и перейти к **ДАИМ 24**.

ДАИМ 22. Если $ASP_E[j] = -1$, то проверить неравенство $I_LA[j] \leq f_{K, \max}$ и при его выполнении положить $BEG_EW = j$, $END_R2 = j$, $n = k = 1$, после чего перейти к **ДАИМ 24**.

ДАИМ 23. Переменную j инкрементировать ($j = j + 1$) и перейти к **ДАИМ 21**.

Оценка ширины слоя предпоследнего года

ДАИМ 24. Переменную j увеличить на 1 ($j = j + 1$).

ДАИМ 25. Если $I_LA[j] \leq f_{K, \max}$, то выполнить операции инкрементации: $n = n + 1$, $k = k + 1$ и перейти к **ДАИМ 24**.

ДАИМ 26. Нарастить n ($n = n + 1$), после чего проверить неравенство $k \leq nP_{\text{дов}}$ и в случае его выполнения перейти к **ДАИМ 24**.

ДАИМ 27. Зафиксировать начальную точку слоя предпоследнего года в рассматриваемой ЛА: $BEG_R2 = j$ и в качестве ширины слоя принять оценку $B_R2 = BEG_R2 - END_R2$.

ДАИМ 28. Зафиксировать величины $B_R1 = BEG_R1 - END_R1$, $B_R2 = BEG_R2 - END_R2$, $LI_EW = BEG_EW - END_EW$, $LI_LW = BEG_LW - END_LW$, $LI_EW + LI_LW$ как искомые оценки соответственно ширины слоя последнего года, ширины слоя предпоследнего года, длины интервала прироста ранней древесины, длины интервала прироста поздней древесины, расстояния между слоями последних двух лет и завершить работу алгоритма.

Выходные данные синтезированного алгоритма **ДАИМ 1 – ДАИМ 28** с помощью некоторых масштабов должны быть согласованы с применяемыми на практике единицами измерения. На рисунке приведен пример результатов программной реализации представленного дендрохронологического исследования.

Год	Длина, мм	Поздняя, мм	Ранняя, мм
2017	2,24	0,89	1,35
2016	2,16	1,02	1,14
2015	1,73	0,93	0,80
2014	2,03	0,47	1,57
2013	2,41	1,02	1,40
2012	2,66	1,40	1,27
2011	3,68	2,62	1,06
2010	3,34	0,76	2,58
2009	3,13	1,99	1,14
2008	1,86	0,93	0,93
2007	1,58	0,63	0,96
2006	1,61	0,85	0,76
2005	1,26	0,63	0,63
2004	1,31	0,37	0,95
2003	1,00	0,50	0,50
2002	1,37	0,49	0,88
2001	0,85	0,42	0,42

Рисунок – Фрагмент формы с первичными замерами параметров радиального прироста

Результаты выполненной разработки по проблеме предварительного компьютерного дендроанализа изображений, снимаемых с керна, в целях получения оценок параметров развития древесины во времени кратко можно охарактеризовать следующим образом:

1. Для контрастирования и сглаживания полутоновых изображений, снимаемых с керна, применены адаптивные гауссовские фильтры. По критерию снижения негативного влияния на достоверность получаемых оценок погрешностей геометрической ориентации керна наибольшую эффективность обеспечивает фильтр Гаусса с адаптируемыми по направлению двумерными апертурами.

2. При решении задачи детектирования и анализа промежутков возрастания/убывания интенсивности роста древесины в направлении, ортогональном к годичным слоям, использована ориентированная линейная апертура. При этом расчет ее направления осуществляется по высокоточной процедуре, которая базируется на так называемой градиентно-дисбалансной технологии [4; 6].

3. Синтезирован эффективный алгоритм детектирования и анализа интервалов монотонности последовательности элементов исследуемого изображения, которая отвечает применяемой ЛА. Ключевыми отличительными признаками алгоритма являются аппарат дифференциала монотонности последовательности отсчетов изображений в базовой ЛА, метод выделения элементов ЛА, относящихся к слоям, основанным на пороговом ограничении элементов с обеспечением установленной доверительной вероятности и др. Перечень выходных данных алгоритма включает оценки размеров годичных слоев (по ширине), расстояния между слоями, а также длин интервалов роста ранней и поздней древесины.

Список использованных источников

1. Марченко, С. И. Особенности измерения радиальных приростов древесины с использованием компьютерных технологий / С. И. Марченко, Л. П. Балухта // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2016. – № 46. – С. 80–85.

2. Методы и алгоритмы восстановления климатоэкологической информации на основе дендрохроноиндикаторов: моногр. / И. А. Ботыгин [и др.]; Томск. политехн. ун-т. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2015. – 185 с.

3. Адаптивная фильтрация изображений в дактилоскопических идентификационных системах для судебных экспертиз / С. М. Завгороднев [и др.] // Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы : сб. науч. тр. / НПЦ Гос. ком. судеб. экспертиз Респ. Беларусь; редкол. : А. В. Дулов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2013. – Вып. 2/34. – С. 187–198.

4. Биометрические идентификационные технологии. Методы и алгоритмы : моногр. / С. М. Завгороднев [и др.]; под общ. ред. акад. А. Ф. Чернявского. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2011. – 204 с.

5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

6. Завгороднев, С. М. Методы и алгоритмы оптимизационной обработки изображений для судебно-дактилоскопической экспертной системы / С. М. Завгороднев, А. А. Коляда, В. В. Ревинский // Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы : сб. науч. тр. / ЦСЭиК М-ва юстиции Респ. Беларусь; редкол. : А. В. Дулов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2011. – Вып. 1/29. – С. 199–209.

Дата поступления: 18.08.2017

A. A. Kolyada

Doctor of Physical and Mathematical Sciences

V. V. Revinskiy

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

D. E. Kuzmenkou

A. N. Khokh

SPC of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus

Minsk, Belarus

PRELIMINARY IMAGE PROCESSING FOR DENDROCHRONOLOGICAL EXPERT RESEARCH

The article presents the original version of the preliminary computer dendroanalysis of halftone core images. The goal of the development is to assess the parameters of the growth of wood in time. Adaptive Gaussian filters are used in order to contrast and smooth the original image. Gaussian filter with oriented two-dimensional apertures is the most effective one judging by the criterion of reliability of the estimates obtained. The task of detection and analysis of the increase / decrease intervals of the intensity of growth of wood and other parameters in a direction orthogonal to the tree layers is carried out using a linear aperture of the appropriate orientation. A highly efficient algorithm was synthesized and programmed in order to determine the required set of characteristics.

Keywords: boring cores, tree layers, dendrochronological analysis, intervals of monotonicity, halftone images, linear aperture, Gauss filter.