

Информатика и её применения

Том 4 Выпуск 1 Год 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Оперативное построение информационных моделей движения полюса Земли методами линейных и линеаризованных фильтров И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын, Э. Р. Корепанов, В. В. Белоусов, Н. Н. Семендяев	2
Приближения для статистик, описывающих геометрические свойства данных большой размерности, с оценками ошибок Ю. Кавагучи, В. В. Ульянов, Я. Фуджикоши	12
Асимптотическое разложение для мощности критерия, основанного на выборочной медиане, в случае распределения Лапласа В. Е. Бенинг, А. В. Сипина	18
Организация управляемого доступа пользователей к разнородным ведомственным информационным ресурсам Г. Я. Илюшин, И. А. Соколов	24
Нефть как носитель информации о своем происхождении, структуре и эволюции Р. Б. Сейфуль-Муллюков	41
Тематический раздел: Труды секции «Биометрия» 19-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2009» (г. Москва, Россия, 5–9 октября 2009 г.)	50
Моделирование влияния деформаций отпечатков пальцев на точность дактилоскопической идентификации А. Р. Арутюнян	51
Математические модели изображения отпечатка пальца на основе описания линий В. Ю. Гудков	58
Автоматизированный контроль качества цифровых изображений для персональных документов С. Л. Каратеев, И. В. Бекетова, М. В. Ососков, В. А. Князь, Ю. В. Визильтер, А. В. Бондаренко, С. Ю. Желтов	65
Алгоритм распознавания людей в видеопоследовательности по одежде В. С. Конушин, Г. Р. Кривовязь, А. С. Конушин	74
Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита Е. А. Павельева, А. С. Крылов	79
Составление субъективного портрета с использованием эволюционного морфинга и квалиметрия метода В. И. Протасов	83
Abstracts	89
Об авторах	93
About Authors	94

ОПЕРАТИВНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНЫХ И ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ФИЛЬТРОВ*

И. Н. Сеницын¹, В. И. Сеницын², Э. Р. Корепанов³, В. В. Белоусов⁴, Н. Н. Семендяев⁵

Аннотация: Рассмотрены практические вопросы оперативной непрерывной и дискретной фильтрации (оценивания состояния и параметров) движения полюса Земли на основе линейных и линеаризованных фильтров. Описано инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение. Приведены тестовые примеры, а также результаты вычислительных экспериментов по оперативной обработке данных астрометрических измерений.

Ключевые слова: астрометрические измерения; инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение; информационная модель; линейные и линеаризованные фильтры; обобщенные фильтры Калмана; оперативная фильтрация; фильтры Калмана; фильтры Калмана–Бьюси; фильтры Пугачёва; флуктуации полюса Земли

1 Введение

В современной статистической информатике важное место занимают статистические методы оперативной обработки информации в стохастических системах (СтС) на основе неточных текущих астрометрических наблюдений путем использования оптимальных (по среднеквадратическому критерию) линейных фильтров (ЛФ) и линеаризованных нелинейных фильтров (ЛНФ) [1–5]. Наиболее широкое распространение получили фильтры Калмана и Пугачёва [2–4].

Непрерывный ЛФ Пугачёва (ЛФП) для линейных СтС обладает следующими достоинствами по сравнению с непрерывным ЛФ Калмана (ЛФК):

- ЛФП в отличие от ЛФК справедлив для линейных СтС, содержащих как переменные состояния, так и наблюдения;
- при одинаковой точности (а для «окрашенных» шумов более простых в реализации) порядок ЛФП может быть существенно меньше ЛФК.

Дискретный ЛФК для дискретных линейных СтС в отличие от дискретного ЛФП требует, чтобы наблюдения и оценивание проводились в один

и тот же момент времени, что на практике трудно реализуемо.

В 2001–2009 гг. в рамках фундаментальных исследований по проблеме «Статистическая динамика вращения Земли» созданы информационные ресурсы (специализированные инструментальные базы данных, стохастические дифференциальные и разностные уравнения флуктуаций полюса Земли, инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение в среде MATLAB для аналитического и статистического моделирования, фильтрации, прогноза и др.). Соответствующая библиография работ приведена в [6–9].

Как обобщение результатов [4, 5] дается изложение опыта создания ЛФ и ЛНФ для оперативной фильтрации (оценивания состояния и параметров) результатов наблюдений движения полюса Земли на интервале времени 1995–2010 гг.

2 Уравнения флуктуаций полюса Земли и наблюдений

Как известно [6–9], на интервалах времени 3–5 лет уравнения флуктуаций полюса Земли пред-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-07-00021) и программы ОНИТ РАН «Информационные технологии и анализ сложных систем» (проект 1.5).

¹Институт проблем информатики Российской академии наук, sinitsin@iiran.ru

²Институт проблем информатики Российской академии наук, vsinitsin@ipiran.ru

³Институт проблем информатики Российской академии наук, ekorepanov@ipiran.ru

⁴Институт проблем информатики Российской академии наук, vbelousov@ipiran.ru

⁵Институт проблем информатики Российской академии наук, nsemendyaev@ipiran.ru

ставляют собой квазилинейную дифференциальную СтС следующего вида:

$$\dot{p} + N_1 q + D_1 p = M_1^*(t) + M_1^0(t) + \Delta M_1; \quad (1)$$

$$\dot{q} - N_2 p + D_2 q = M_2^*(t) + M_2^0(t) + \Delta M_2. \quad (2)$$

Здесь p и q — проекции мгновенной угловой скорости вращения Земли на связанные с Землей оси ($p, q \ll r_*$, где r_* — осевая угловая скорость вращения Земли, принимаемая постоянной); N_i и D_i ($i = 1, 2$) — коэффициенты удельных моментов гироскопических и диссипативных сил; $M_i^*(t)$ и $M_i^0(t)$ ($i = 1, 2$) — удельные регулярные и нерегулярные (флуктуирующие) возмущающие моменты; $\Delta M_i = \Delta M_i(p, q, t; \pi)$ ($i = 1, 2$) — квазилинейные возмущения, зависящие от p, q, t и вектора параметров π . Переменные $X_1 = p$ и $X_2 = q$ называются *информационными переменными*.

Флуктуационные составляющие моментов $M_i^0(t)$ ($i = 1, 2$) примем в виде случайных широкополосных и «окрашенных» составляющих

$$M_i^0(t) = M_{i0}^0(t) + \sum_{h_1=1}^H M_{ih_1}^0(t); \quad (3)$$

$$\dot{M}_{i0}^0 + \alpha_{i0}^M M_{i0}^0 = \beta_{i0}^M V_i \quad (i = 1, 2); \quad (4)$$

$$\ddot{M}_{ih}^0 + 2\varepsilon_{ih}^M \omega_{ih}^M \dot{M}_{ih}^0 + (\omega_{ih}^M)^2 M_{ih}^0 = \beta_{ih}^M V_i \quad (i = 1, 2). \quad (5)$$

Здесь α_{i0}^M , β_{i0}^M и ε_{ih}^M , ω_{ih}^M , β_{ih}^M ($i = 1, 2$), $h = 1, 2$ — параметры соответственно широкополосных и «окрашивающих» формирующих фильтров (ФФ); $V' = [V_1 \ V_2]^T$ — вектор независимых белых шумов с нулевыми математическими ожиданиями и интенсивностями:

$$G'_t = \text{diag} (G'_{1t} \ G'_{2t}); \quad G'_{1t} = G_{11}(t), \quad G'_{2t} = G_{22}(t).$$

Замечание 1. Во многих задачах статистической динамики Земли случайные широкополосные моменты $M_{i0}^0(t)$ принимают в виде независимых белых шумов, что существенно снижает размерность исходных уравнений статистической динамики. Случайные возмущающие моменты (3)–(5) выражены через два скалярных независимых белых шума V_1 и V_2 . Аналогично рассматривается более общий случай, когда можно выделить несколько независимых белых шумов, например H_1 в (4) и H_2 в (5).

Перейдем к рассмотрению уравнений наблюдения, при этом ограничимся только линейными относительно переменных наблюдениями. Обозначим через Y_1 и Y_2 переменные, описывающие наблюдение информационных переменных X_1 и X_2 . Для непрерывных наблюдений общая

линейная модель может быть представлена в виде [4]

$$\dot{Y}_1 = b_{11} Y_1 + b_{12} Y_2 + b_{1,11} X_1 + b_{1,12} X_2 + U_1; \quad (6)$$

$$\dot{Y}_2 = b_{21} Y_1 + b_{22} Y_2 + b_{1,21} X_1 + b_{1,22} X_2 + U_2, \quad (7)$$

где b_{ij} и $b_{1,ij}$ ($i, j = 1, 2$) — функции времени, удовлетворяющие известным условиям наблюдемости [4]; U_1 и U_2 — шумы в наблюдениях, в общем случае отличные от белого шума. Шумы U_1 и U_2 определяются уравнениями соответствующего ФФ для измерительного устройства. В случае одноканального линейного наблюдения уравнения (6) и (7) при $U_1 \equiv V_3$, $U_2 \equiv V_4$ имеют вид:

$$\dot{Y}_1 = b_{11} Y_1 + b_{1,11} X_1 + V_3; \quad (8)$$

$$\dot{Y}_2 = b_{22} Y_2 + b_{1,22} X_2 + V_4. \quad (9)$$

Здесь $V'' = [V_3 \ V_4]^T$, где шумы V_3 и V_4 независимы между собой и $V' = [V_1 \ V_2]^T$ — белые шумы с интенсивностями

$$G''_t = \text{diag} (G''_{13t}, G''_{4t}); \\ G''_{3t} = G_{33}(t); \quad G''_{4t} = G_{44}(t).$$

Замечание 2. Если наблюдаются не только проекции угловой скорости p и q , но и соответствующие квазиугловые переменные, то следует, во-первых, к уравнениям (1), (2) добавить соответствующие инструментальные кинематические соотношения и рассматривать расширенный 4-мерный вектор информационных переменных $\bar{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T$ и, во-вторых, выписать уравнения ФФ для всех составляющих расширенного вектора наблюдения \bar{Y} .

Непрерывные ЛФ для оптимальной (по критерию минимума средней квадратической ошибки) оперативной обработки информации основаны на следующей общей записи уравнений состояния (1), (2) и наблюдения (6), (7) [4]:

$$\dot{X}_t = a Y_t + a_1 X_t + a_0 + \psi V + \Delta \varphi + \Delta \psi V; \quad (10)$$

$$Z_t = \dot{Y}_t = b Y_t + b_1 X_t + b_0 + \psi_1 V. \quad (11)$$

Здесь X_t — расширенный (посредством добавления к X_{1t}, X_{2t} инструментальных переменных ФФ) вектор состояния; Y_t — расширенный (за счет инструментальных переменных ФФ) вектор наблюдения; $V = [V'^T V''^T]^T$ — расширенный вектор независимых белых шумов с матрицей интенсивностей $G_t^V = \text{diag} (G_{1t} G_{2t}, G_{3t} G_{4t})$; $a, a_1, b, b_1, \psi, \psi_1$ — постоянные матрицы соответствующей размерности; a_0, b_0 — известные функции времени; $\Delta \varphi = \Delta \varphi(X_t, Y_t; \pi)$, $\Delta \psi = \Delta \psi(X_t, Y_t, t; \pi)$ — квазилинейные составляющие.

Уравнения (10) и (11) для независимых белых шумов в уравнениях состояния и наблюдения имеют вид:

$$\dot{X}_t = aY_t + a_1X_t + a_0 + \psi'V_1 + \Delta\varphi + \Delta\psi'V_1; \quad (12)$$

$$Z_t = \dot{Y}_t = bY_t + b_1X_t + b_0 + V_2, \quad (13)$$

где $\Delta\varphi = \Delta\varphi(X_t, t; \pi)$ и $\Delta\psi' = \Delta\psi'(X_t, t; \pi)$ — квазинелинейные составляющие, отвечающие $\Delta M_i(p, q, t; \pi)$ ($i = 1, 2$).

Для дискретных линейных наблюдений искомые дискретные уравнения состояния и наблюдений, соответствующие (10), (11) и (12), (13), имеют следующий вид [4]:

$$X_{k+1} = a_kX_k + a_{0,k} + \psi_kV_k + \Delta\varphi_k + \Delta\psi_kV_k; \quad (14)$$

$$Y_k = b_kX_k + b_{0,k} + \psi_{1,k}V_k; \quad (15)$$

$$X_{k+1} = a_kX_k + a_{0,k} + \psi'_kV_{1,k} + \Delta\varphi_k + \Delta\psi'_kV_{1,k}; \quad (16)$$

$$Y_k = b_kX_k + b_{0,k} + V_{2,k}. \quad (17)$$

Здесь через $X_k, Y_k, V_k, V_{1,k}, V_{2,k}, a_{0,k}$ и $b_{0,k}$ обозначены значения переменных и параметров в моменты времени $k = 1, 2, \dots$; $G_k^d, G_{1,k}^d, G_{2,k}^d$ — ковариационные матрицы дискретных белых шумов $V_k, V_{1,k}$ и $V_{2,k}$. При этом дискретные уравнения ФФ (4) и (5) будут иметь вид:

$$M_{i0,k+1}^0 = (1 - \alpha_{i0}^{Md}) M_{i0,k}^0 + \beta_{i0}^{Md} V_{i,k}, \quad (18)$$

$$M_{ih,k+2}^0 = -2\varepsilon_{ih}^{Md} M_{ih,k+1}^0 - (\omega_{ih}^{Md})^2 M_{ih,k}^0 + \beta_{i0}^{Md} V_{i,k}, \quad (19)$$

где верхним индексом d отмечается дискретный вариант соответствующего параметра ФФ.

Замечание 3. Следуя [4], подчеркнем, что уравнения (10)–(13) и (14)–(19) справедливы в общем случае как для гауссовых, так и для негауссовых белых шумов.

Наконец, отметим, что вопросы оперативной экстраполяции (прогноза) и интерполяции требуют специального инструментального программного обеспечения на основе алгоритмов [4, 5] и будут рассмотрены в отдельной статье.

3 Инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение непрерывной линейной и квазилинейной фильтрации

В основе непрерывной линейной и квазилинейной фильтрации лежат следующие утверждения [3, 4]:

Утверждение 1. Пусть векторный случайный процесс $[X_t^T Y_t^T]^T$ удовлетворяет линейным стохастическим дифференциальным уравнениям (10) и (11) ($\Delta\varphi = \Delta\psi = 0$), а диффузионная матрица $\sigma_1 = \psi_1 G_t \psi_1^T$ невырождена. Тогда фильтрационные уравнения имеют следующий вид:

$$\dot{\hat{X}}_t = aY_t + a_1\hat{X}_t + a_0 + \beta \left[\dot{Y}_t - (bY_t + b_1\hat{X}_t + b_0) \right]; \quad (20)$$

$$\beta = \frac{(R_t b_1^T + \psi G_t \psi_1^T)}{(\psi_1 G_t \psi_1^T)};$$

$$\dot{R}_t = a_1 R_t + R_t a_1^T + \psi G_t \psi^T - \frac{(R_t b_1^T + \psi G_t \psi_1^T) (b_1 R_t + \psi_1 G_t \psi^T)}{(\psi_1 G_t \psi_1^T)} \quad (21)$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} \hat{X}(t_0) &= \hat{X}_0; \\ R(t_0) &= R_0 = M[X_0|Y_0] = \\ &= M \left[(X_0 - \hat{X}_0)(X_0^T - \hat{X}_0^T) | Y_0 \right]. \end{aligned}$$

Здесь \hat{X}_t — оптимальная средняя квадратическая оценка ошибки фильтрации переменной X_t ; β — матричный коэффициент усиления; R_t — ковариационная матрица ошибки фильтрации; G_t — матрица интенсивностей составляющих векторного белого шума V .

Порядок ЛФ равен $Q_{ЛФ} = n_x(n_x + 3)/2$. Уравнение (21) не содержит результатов наблюдений. Это дает возможность определять R_t и β заранее, до получения результатов. Нелинейное уравнение Риккати (21) явно не содержит матричных параметров a и b . Таким образом, определение X_t сводится к интегрированию (20) оперативно в темпе получения результатов наблюдений.

Утверждение 2. Пусть в линейных стохастических дифференциальных уравнениях (12) и (13) ($\Delta\varphi = \Delta\psi = 0$) матрица G_{2t} интенсивностей шумов в наблюдениях невырождена. Тогда непрерывный линейный фильтр Калмана–Бьюси (ЛФКБ) определяется следующими уравнениями [4]:

$$\dot{\hat{X}}_t = a_1\hat{X}_t + a_0 + \beta(Z_t - b_1\hat{X}_t - b_0); \quad (22)$$

$$\beta = \frac{R_t b_1^T}{G_{2t}}; \quad (23)$$

$$\dot{R}_t = a_1 R_t + R_t a_1^T + \psi' G_{1t} \psi'^T - \beta G_{2t} \beta^T, \quad (24)$$

$$\beta G_{2t} \beta^T = \frac{R_t b_1^T}{G_{2t}} b_1 R_t = \beta b_1 R_t. \quad (25)$$

Замечание 4. Из (22)–(25) следуют три важных вывода. Во-первых, если R_t «велико» (в смысле больших собственных значений), то обновляющая разность $Z_t - b_1 \hat{X}_t$ «сильно» взвешена (т.е. текущая оценка \hat{X}_t известна с большой погрешностью). Тогда новая информация, получаемая из наблюдений, становится очень значимой. Во-вторых, если R_t «мало» (т.е. наблюдения проводятся очень точно), тогда измерительная информация «сильно» взвешивается. Коэффициент β может рассматриваться как отношение сигнал/шум. В третьих, в (24) первые два члена определяют стабилизирующие свойства системы, третий член характеризует воздействие собственного шума в системе, а четвертый член выражает оставшуюся ковариационную погрешность вследствие использования данных измерения. Практически надо стремиться снижать эту погрешность.

Замечание 5. Порядок уравнений ЛФКБ равен $Q_{КБ} = 5$. Для широкополосных возмущений $M_{i0}^0(t)$ в (3) и (4), удовлетворяющих ФФ (5), $n_x = 4$ и порядок будет равен $Q_{КБ} = 14$. Для «окрашенных» возмущений $M_{1h_1}^0(t)$ и $M_{2h_2}^0(t)$, удовлетворяющих (6), $n_x = 6$ и $Q_{КБ} = 54$. В этих случаях с целью снижения порядка уравнений ЛФКБ можно заменить случайные процессы $M_{i0}^0(t)$ и $M_{ih}^0(t)$ в (3) эквивалентным белым шумом с интенсивностью $G^\ominus(t)$ и интервалом корреляции $\tau_{кор}$ [4]

$$G^\ominus(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t, t + \tau) d\tau;$$

$$\tau_{кор} = \frac{1}{2} \max_t \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K(t, t + \tau)}{K(t, t)} d\tau \right\}.$$

Здесь $K(t, t + \tau)$ — ковариационная функция процесса. Правомерность такого приема требуется проверять статистическим моделированием.

Утверждение 3. Пусть нелинейная функция $\Delta\varphi$ в (12) статистически линеаризуема, т.е.

$$\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_{00} + \Delta\varphi_{01} X_t^0.$$

Здесь $\Delta\varphi_{00} = \Delta\varphi_{00}(m_t^x, K_t^x, t)$ и $\Delta\varphi_{01} = \Delta\varphi_{01}(m_t^x, K_t^x, t)$ — коэффициенты статистической линеаризации нелинейной функции $\Delta\varphi$ (m_t^x и K_t^x — соответственно математическое ожидание и ковариационная матрица X_t); функция $\Delta\psi$ в (13) от X_t не зависит, $\Delta\varphi = \Delta\psi(t)$. Тогда линеаризованный ЛФКБ определяется следующими уравнениями [4]:

$$\dot{\hat{X}}_t = \varphi_{00} - \varphi_{01} m_t^x + \varphi_{01} \hat{X}_t + \beta(Z_t - b_1 \hat{X}_t - b_0 + b_1 m_t^x);$$

$$\dot{R}_t = \varphi_{01} R_t + R_t \varphi_{01}^T - \beta G_{2t} \beta^T + \bar{\psi}' G_{1t} \bar{\psi}'^T;$$

$$\beta = \frac{R_t b_1^T}{G_{2t}},$$

причем m_t^x, K_t^x находятся из уравнений

$$\dot{m}_t^x = \varphi_{00};$$

$$\dot{K}_t^x = \varphi_{01} K_t^x + K_t^x \varphi_{01}^T + \bar{\psi}' G_{1t} \bar{\psi}'^T.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\varphi_{00} = \varphi_{00}(m_t^x, K_t^x, t) = a_0 + \Delta\varphi_{00}(m_t^x, K_t^x, t);$$

$$\varphi_{01} = \varphi_{01}(m_t^x, K_t^x, t) = a_1 + \Delta\varphi_{01}(m_t^x, K_t^x, t);$$

$$\bar{\psi}' = \psi' + \Delta\psi(t).$$

Замечание 6. Наряду со статистической линеаризацией $\Delta\varphi$ в (12) может быть использована другая эквивалентная линеаризация [4], определяемая спецификой задачи [6, 8, 9].

Утверждение 4. В условиях утверждения 3, когда $\Delta\psi$ в (13) зависит от X_t и π , используются различные методы нелинейной приближенной (субоптимальной) фильтрации [4]. Первая группа методов основана на параметризации апостериорного распределения методами моментов, квазимоментов, семиинвариантов, коэффициентов ортогонального разложения апостериорной плотности и др. Простейшим методом служит метод нормальной (гауссовой) аппроксимации. Ко второй группе методов относятся обобщенный ФКБ, фильтры второго порядка, гауссов фильтр и др., использующие теилоровское разложение различного порядка X_t в окрестности оценки \hat{X}_t . Порядок таких фильтров существенно растет с ростом порядка аппроксимации. При этом для оперативной обработки информации требуются специализированные высокопроизводительные вычислительные средства [3–5].

Утверждение 5. Пусть векторный случайных процесс $[X_t^T Y_t^T]^T$ удовлетворяет стохастическим дифференциальным уравнениям (10) и (11). Тогда фильтр Пугачёва (ФП) определяется следующими уравнениями [3, 4]:

$$\dot{\hat{X}}_t = \alpha \xi(\hat{X}_t, Y_t, t) + \beta \eta(\hat{X}_t, Y_t, t) \dot{Y}_t + \gamma.$$

Здесь $\xi = \xi(\hat{X}_t, Y_t, t)$ и $\eta = \eta(\hat{X}_t, Y_t, t)$ — известные структурные функции ФП; α, β и γ — коэффициенты ФП, удовлетворяющие уравнениям

$$\alpha m_1 + \beta m_2 + \gamma = m_0,$$

где

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= M\varphi(X_t, Y_t, t), \\ m_1 &= M\xi(Y_t, \hat{X}_t, t), \\ m_2 &= M\eta(Y_t, \hat{X}_t, t), \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

M — символ математического ожидания;

$$\beta = \frac{\kappa_{02}}{\kappa_{22}},$$

где

$$\begin{aligned} \kappa_{02} &= M(X_t - \hat{X}_t)\varphi_1(X_t, Y_t, t)^T \eta(Y_t, \hat{X}_t, t) + \\ &+ M\bar{\psi}(X_t, Y_t, t)G_t(X_t, Y_t, t)\eta(Y_t, \hat{X}_t, t), \\ \kappa_{22} &= M\eta(Y_t, \hat{X}_t, t)\psi_1(X_t, Y_t, t)G_t\psi_1(X_t, Y_t, t)^T \times \\ &\times \eta(Y_t, \hat{X}_t, t); \quad (27) \\ \alpha &= \frac{(\kappa_{01} - \beta\kappa_{21})}{\kappa_{11}}, \end{aligned}$$

где

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{11} &= M[\xi(Y_t, \hat{X}_t, t) - m_1] \xi(Y_t, \hat{X}_t, t), \\ \kappa_{21} &= M[\varphi_1(X_t, Y_t, t) - m_2] \xi(Y_t, \hat{X}_t, t), \\ \kappa_{01} &= M[\varphi(X_t, Y_t, t) - m_0] \xi(Y_t, \hat{X}_t, t), \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_t &= M[(X_t - \hat{X}_t)\varphi(X_t, Y_t, t)^T + \\ &+ \varphi(X_t, Y_t, t, \pi)(X_t - \hat{X}_t)^T - \\ &- \beta\eta(Y_t, \hat{X}_t, t)\psi_1(X_t, Y_t, t)G_t\psi_1(X_t, Y_t, t)^T \times \\ &\times \eta(Y_t, \hat{X}_t, t)\beta^T + \bar{\psi}(X_t, Y_t, t)G_t\bar{\psi}(X_t, Y_t, t)^T]. \end{aligned}$$

В (24)–(26) приняты обозначения:

$$\begin{aligned} \varphi(X_t, Y_t, t) &= aY_t + a_1X_t + a_0 + \Delta\varphi(X_t, Y_t, t); \\ \varphi_1(X_t, Y_t, t) &= bY_t + b_1X_t + b_0; \\ \bar{\psi}(X_t, Y_t, t) &= \psi(t) + \Delta\psi(X_t, Y_t, t); \\ \psi_1(X_t, Y_t, t) &= \psi_1(t). \end{aligned}$$

Для вычисления математических ожиданий m_0 , m_1 , m_2 , κ_{02} , κ_{22} , κ_{11} , κ_{21} и κ_{01} необходимо вычисление совместного распределения вектора $[Y_t^T X_t^T \hat{X}_t^T]^T$ путем решения соответствующей задачи статистического анализа [4].

Замечание 7. Для случая линейной СтС (10) и (11) ($\Delta\varphi = 0$, $\Delta\psi = 0$) уравнения ЛФП совпадают с уравнениями утверждения 1.

Замечание 8. Если входящий в уравнения (10) и (11) векторный параметр π подлежит идентификации, то следует расширить вектор состояния X_t , $\bar{X}_t = [X_t^T \pi^T]^T$ и использовать уравнения $\dot{\pi} = 0$.

4 Инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение дискретной линейной и квазилинейной фильтрации

Следуя [3, 4], приведем утверждения, лежащие в основе дискретной линейной и квазилинейной фильтрации.

Утверждение 6. Пусть векторный дискретный случайный процесс $[X_k^T Y_k^T]^T$ удовлетворяет дискретным уравнениям (16) и (17), причем матрица интенсивностей шумов в наблюдениях $G_{2,k}^d$ невырождена. Тогда дискретный ЛФК определяется рекуррентными уравнениями [4]:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= \hat{X}_{k+1|k} + \beta_{k+1}(Y_{k+1} - b_{1,k+1}\hat{X}_{k+1|k}); \\ \hat{X}_{k+1|k} &= a_{1,k}\hat{X}_k + a_{0,k}; \\ \beta_{k+1} &= \frac{R_{k+1|k}b_{1,k+1}^T}{(b_{1,k+1}R_{k+1|k}b_{1,k+1}^T + G_{2,k+1})}; \\ R_{k+1|k} &= a_{1,k}R_k a_{1,k}^T + \psi_k' G_{1,k} \psi_k'^T; \\ R_{k+1} &= R_{k+1|k} - \beta_{k+1}b_{1,k+1}R_{k+1|k} = R_{k+1|k} - \\ &- \frac{R_{k+1|k}b_{1,k+1}^T b_{1,k+1}R_{k+1|k}}{(b_{1,k+1}R_{k+1|k}b_{1,k+1}^T + G_{2,k+1})}. \end{aligned}$$

Утверждение 7. Пусть векторный дискретный случайный процесс $[X_k^T Y_k^T]^T$ определяется линейными стохастическими дискретными уравнениями (14) и (15) ($\Delta\varphi_k = 0$, $\Delta\psi_k = 0$). Тогда в основе алгоритмов дискретного ЛФП лежат следующие рекуррентные уравнения [4]:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= a_k\hat{X}_k + a_{0,k} + \beta_k(Y_k - b_k\hat{X}_k - b_{0,k}); \\ \beta_k &= \frac{(a_k R_k b_k^T + \psi_k G_k \psi_{1,k}^T)}{(b_k R_k b_k^T + \psi_k G_k \psi_{1,k}^T)}; \\ R_{k+1} &= (a_k - \beta_k b_k)R_k a_k^T + (\psi_k - \beta_k \psi_{1,k})G_k \psi_k^T. \end{aligned}$$

Утверждение 8. Пусть дискретный случайный процесс $[X_t^T Y_t^T]^T$ удовлетворяет стохастическим разностным уравнениям (16) и (17). Тогда уравнения дискретного ФП определяются следующими уравнениями [3, 4]:

$$\hat{X}_{k+1} = \alpha_k \xi_k(\hat{X}_k) + \beta_k \eta_k(\hat{X}_k) Y_k + \gamma_k. \quad (29)$$

Здесь $\xi_k = \xi(k, \hat{X}_k)$ и $\eta_k = \eta(k, \hat{X}_k)$ — известные структурные функции ФП; α_k, β_k и γ_k определяются из следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned}\alpha_k \kappa_{11} + \beta_k \kappa_{21} &= \kappa_{01}; \\ \alpha_k \kappa_{12} + \beta_k \kappa_{22} &= \kappa_{02}; \\ \gamma_k &= m_{0,k} - \alpha_k m_{1,k} - \beta_k m_{2,k},\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}\kappa_{01} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\varphi_k(X_k) - m_{0,k}] \xi_k(\hat{X}_k)^T; \\ \kappa_{02} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\varphi_k(X_k) - m_{0,k}] \varphi_{1,k}(\hat{X}_k)^T \eta_k(\hat{X}_k)^T + \\ &+ \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\bar{\psi}'_k(X_k) G_{1,k} \bar{\psi}'_k(X_k)^T \eta_k(\hat{X}_k)]; \\ \kappa_{11} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\xi_k(\hat{X}_k) - m_{1,k}] \xi_k(\hat{X}_k)^T; \\ \kappa_{12} &= \kappa_{21}^T = \\ &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\xi_k(\hat{X}_k) - m_{1,k}] \varphi_{1,k}(X_k)^T \eta_k(\hat{X}_k)^T; \\ \kappa_{22} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\eta_k(\hat{X}_k) \varphi_{1,k}(X_k) - m_{2,k}] \times \\ &\times \varphi_{1,k}(X_k)^T \eta_k(\hat{X}_k)^T + \\ &+ \mathbf{M}_{\mathcal{N}} [\eta_k(\hat{X}_k) \psi_{1,k}(X_k) G_{2,k} \psi_{1,k}(X_k)^T \eta_k(\hat{X}_k)^T]; \\ m_{0,k} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} \varphi_k(X_k); \\ m_{1,k} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} \xi_k(\hat{X}_k); \\ m_{2,k} &= \mathbf{M}_{\mathcal{N}} \eta_k(\hat{X}_k); \\ \varphi_k &= a_k X_k + a_{0,k} + \Delta \varphi_k(X_k); \\ \varphi_{1,k} &= b_k X_k + b_{0,k}; \\ \bar{\psi}'_k &= \psi'_k + \Delta \psi(X_k); \quad \psi_{1,k} = I_{n_y}.\end{aligned}$$

Символ $\mathbf{M}_{\mathcal{N}}$ означает, что соответствующие математические ожидания вычисляются по методу нормальной аппроксимации [3, 4]. Линейный ФП (утверждение 7) при нормальном распределении является частным случаем (29).

5 Тестовые примеры

Тестовый пример 1. Для системы

$$\left. \begin{aligned}\dot{X}_{1t} &= M_{1t}^* - D^* X_{1t} - N^* X_{2t} + V_1; \\ \dot{X}_{2t} &= M_{2t}^* + N^* X_{1t} - D^* X_{2t} + V_2; \\ Z_{1t} &= \dot{Y}_{1t} = X_{1t} + V_3; \\ Z_{2t} &= \dot{Y}_{2t} = X_{2t} + V_4\end{aligned}\right\} \quad (30)$$

в силу уравнений разд. 3 ЛФКБ имеет вид [4]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}_{1t} &= -D^* \hat{X}_{1t} - N^* \hat{X}_{2t} + \\ &+ \frac{R_{11}}{G_{3t}} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t} - M_1^*) +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&+ \frac{R_{12}}{G_{4t}} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t} + M_2^*) = D^* \hat{X}_{1t} - N^* \hat{X}_{2t} + \\ &+ \beta_{11} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t} - M_1^*) + \beta_{12} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t} + M_2^*); \\ \dot{\hat{X}}_{2t} &= N^* \hat{X}_{1t} - D^* \hat{X}_{2t} + \\ &+ \frac{R_{12}}{G_{3t}} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t} - M_1^*) + \\ &+ \frac{R_{22}}{G_{4t}} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t} + M_2^*) = N^* \hat{X}_{1t} - D^* \hat{X}_{2t} + \\ &+ \beta_{21} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t} - M_1^*) + \beta_{22} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t} + M_2^*),\end{aligned}$$

где $\beta_{11} = R_{11}/G_{3t}$; $\beta_{12} = R_{12}/G_{4t}$; $\beta_{21} = R_{12}/G_{3t}$; $\beta_{22} = R_{22}/G_{4t}$;

$$\beta_t = \begin{bmatrix} \frac{R_{11}}{G_{3t}} & \frac{R_{12}}{G_{4t}} \\ \frac{R_{12}}{G_{3t}} & \frac{R_{22}}{G_{4t}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix};$$

$$\dot{R}_{11} = -2(D^* R_{11} + N^* R_{12}) + G_{1t} - \frac{R_{11}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{12}^2}{G_{4t}};$$

$$\dot{R}_{12} =$$

$$= -2D^* R_{12} - N^* (R_{22} - R_{11}) - \frac{R_{11} R_{12}}{G_{3t}} - \frac{R_{12} R_{22}}{G_{4t}};$$

$$\dot{R}_{22} = 2(N^* R_{11} - D^* R_{22}) + G_{2t} - \frac{R_{12}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{22}^2}{G_{4t}}.$$

Тестовый пример 2. Пусть M_{it}^* ($i = 1, 2$) являются неизвестными параметрами. Положим $M_{1t}^* = X_3$, $M_{2t}^* = X_4$, тогда уравнения $\dot{X}_{3t} = 0$, $\dot{X}_{4t} = 0$ будут совместно с уравнениями (30) определять расширенный вектор состояния $\bar{X}_t = [X_{1t} X_{2t} X_{3t} X_{4t}]^T$.

Для системы

$$\dot{X}_{1t} = -D^* X_{1t} - N^* X_{2t} + X_{3t} + V_1;$$

$$\dot{X}_{2t} = N^* X_{1t} - D^* X_{2t} + X_{4t} + V_2;$$

$$Z_{1t} = \dot{Y}_{1t} = X_{1t} + V_3;$$

$$Z_{2t} = \dot{Y}_{2t} = X_{2t} + V_4;$$

$$Z_{3t} = X_{3t} + V_5;$$

$$Z_{4t} = X_{4t} + V_6$$

ЛФКБ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}_{1t} &= -D^* \hat{X}_{1t} - N^* \hat{X}_{2t} + \hat{X}_{3t} + \\ &+ \frac{R_{11}}{G_{3t}} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \frac{R_{12}}{G_{4t}} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t}) + \\ &+ \frac{R_{13}}{G_{5t}} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t}) + \frac{R_{14}}{G_{6t}} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t}) =\end{aligned}$$

$$-D^* \hat{X}_{1t} - N^* \hat{X}_{2t} + \hat{X}_{3t} + \beta_{11} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \beta_{12} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t}) + \beta_{13} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t}) + \beta_{14} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t});$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_{2t} &= N^* \hat{X}_{1t} - D^* \hat{X}_{2t} + \hat{X}_{4t} + \\ &+ \frac{R_{12}}{G_{3t}} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \frac{R_{22} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t})}{G_{4t}} + \\ &+ \frac{R_{23} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t})}{G_{5t}} + \frac{R_{24} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t})}{G_{6t}} = \\ &= -D^* \hat{X}_{1t} - N^* \hat{X}_{2t} + \hat{X}_{3t} + \beta_{21} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \\ &+ \beta_{22} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t}) + \beta_{23} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t}) + \\ &+ \beta_{24} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_{3t} &= \frac{R_{13} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t})}{G_{3t}} + \frac{R_{23} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t})}{G_{4t}} + \\ &+ \frac{R_{33} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t})}{G_{5t}} + \frac{R_{34} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t})}{G_{6t}} = \\ &= \beta_{31} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \beta_{32} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t}) + \\ &+ \beta_{33} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t}) + \beta_{34} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_{4t} &= \frac{R_{14} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t})}{G_{3t}} + \frac{R_{24} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t})}{G_{4t}} + \\ &+ \frac{R_{34} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t})}{G_{5t}} + \frac{R_{44} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t})}{G_{6t}} = \\ &= \beta_{41} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}) + \beta_{42} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t}) + \\ &+ \beta_{43} (Z_{3t} - \hat{X}_{3t}) + \beta_{44} (Z_{4t} - \hat{X}_{4t}), \end{aligned}$$

где

$$\beta_{11} = \frac{R_{11}}{G_{3t}}; \quad \beta_{12} = \frac{R_{12}}{G_{4t}}; \quad \beta_{13} = \frac{R_{13}}{G_{5t}};$$

$$\beta_{14} = \frac{R_{14}}{G_{6t}}; \quad \beta_{21} = \frac{R_{12}}{G_{3t}}; \quad \beta_{22} = \frac{R_{22}}{G_{4t}};$$

$$\beta_{23} = \frac{R_{23}}{G_{5t}}; \quad \beta_{24} = \frac{R_{24}}{G_{6t}}; \quad \beta_{31} = \frac{R_{13}}{G_{3t}};$$

$$\beta_{32} = \frac{R_{23}}{G_{4t}}; \quad \beta_{33} = \frac{R_{33}}{G_{5t}}; \quad \beta_{34} = \frac{R_{34}}{G_{6t}};$$

$$\beta_{41} = \frac{R_{14}}{G_{3t}}; \quad \beta_{42} = \frac{R_{24}}{G_{4t}};$$

$$\beta_{43} = \frac{R_{34}}{G_{5t}}; \quad \beta_{44} = \frac{R_{44}}{G_{6t}};$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{11} &= -2(D^* R_{11} + N^* R_{12}) + R_{13} + R_{14} + \\ &+ G_{1t} - \frac{R_{11}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{12}^2}{G_{4t}} - \frac{R_{13}^2}{G_{5t}} - \frac{R_{14}^2}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{22} &= 2(N^* R_{12} - D^* R_{22} + R_{24}) + G_{2t} - \\ &- \frac{R_{12}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{22}^2}{G_{4t}} - \frac{R_{23}^2}{G_{5t}} - \frac{R_{24}^2}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\dot{R}_{33} = -\frac{R_{13}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{23}^2}{G_{4t}} - \frac{R_{33}^2}{G_{5t}} - \frac{R_{34}^2}{G_{6t}};$$

$$\dot{R}_{44} = -\frac{R_{14}^2}{G_{3t}} - \frac{R_{24}^2}{G_{4t}} - \frac{R_{34}^2}{G_{5t}} - \frac{R_{44}^2}{G_{6t}};$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{12} &= N^* (R_{11} - R_{22}) - 2D^* R_{12} + R_{14} + R_{23} - \\ &- \frac{R_{11} R_{12}}{G_{3t}} - \frac{R_{12} R_{22}}{G_{4t}} - \frac{R_{13} R_{23}}{G_{5t}} - \frac{R_{14} R_{24}}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{13} &= -D^* R_{13} - N^* R_{23} + R_{33} - \frac{R_{11} R_{13}}{G_{3t}} - \\ &- \frac{R_{12} R_{23}}{G_{4t}} - \frac{R_{13} R_{33}}{G_{5t}} - \frac{R_{14} R_{44}}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{14} &= -D^* R_{14} - N^* R_{24} + R_{34} - \frac{R_{11} R_{14}}{G_{3t}} - \\ &- \frac{R_{12} R_{24}}{G_{4t}} - \frac{R_{13} R_{34}}{G_{5t}} - \frac{R_{14} R_{44}}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_{24} &= N^* R_{14} - D^* R_{24} + R_{44} - \frac{R_{11} R_{12}}{G_{3t}} - \\ &- \frac{R_{22} R_{24}}{G_{4t}} - \frac{R_{23} R_{34}}{G_{5t}} - \frac{R_{24} R_{44}}{G_{6t}}; \end{aligned}$$

$$\dot{R}_{34} = -\frac{R_{13} R_{14}}{G_{3t}} - \frac{R_{23} R_{24}}{G_{4t}} - \frac{R_{33} R_{34}}{G_{5t}} - \frac{R_{34} R_{44}}{G_{6t}}.$$

Тестовый пример 3. Рассмотрим случай СтС (30) при условиях, когда случайные функции $X_3 = V_1$ и $X_4 = V_2$ представляют собой широкополосные случайные процессы, описываемые ФФ вида (4).

Тестовый пример 4. Рассмотрим случай СтС (30) при условиях, когда случайные функции $X_3 = V_1$ и $X_4 = V_2$ представляют собой «окрашенные» случайные процессы, описываемые уравнениями вида (5).

Тестовый пример 5. В условиях примера 1 провести идентификацию следующих параметров: $\pi_1 = N^*$, $\pi_2 = D^*$, $\pi_3 = M_1^*$, $\pi_4 = M_2^*$.

Тестовые примеры 6–10. В [4] для квазилинейных уравнений (1) и (2) приведены тестовые примеры линейризованных ФКБ и ФК обобщенных фильтров Калмана, гауссовых фильтров, фильтров второго порядка.

6 Вычислительные эксперименты.

Анализ результатов

На рис. 1 приведены результаты наблюдений проекций угловой скорости вращения Земли $X_1 = p = p(t)$ и $X_2 = q = q(t)$ на интервале времени 1995–2010 гг. [10]. Дискретность наблюдений составляет одно наблюдение в сутки. Первичный анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

- (1) регулярные составляющие колебаний полюса Земли содержат наряду с вековым медленно меняющимся трендом и гармонические составляющие на чандлеровской частоте, удвоенной чандлеровской частоте и комбинированные (годовые и чандлеровские). Как показано в [11], точность оценки методом наименьших квадратов составляет величину около 0,01 угл. с/год и требует значительных временных затрат квалифицированных специалистов;
- (2) наряду с регулярными колебаниями полюса Земли имеют место случайные широкополосные и «окрашенные» упомянутыми частотами колебания со средней квадратической ошибкой порядка 0,01 угл. с/год.

В рамках работ по фундаментальной проблеме «Статистическая динамика вращения Земли» в 2009 г. разработано инструментальное программное обеспечение «СДВЗ-2009» в среде MATLAB. Оно включает в свой состав три модуля:

- (1) СДВЗ-2009-1 — непрерывные ЛФ для оперативной обработки информации и иденти-

фикации параметров методами непрерывных ЛФКБ и ЛФП;

- (2) СДВЗ-2009-2 — дискретные ЛФ для оперативной обработки информации и идентификации параметров методами дискретных ЛФК и ЛФП;
- (3) СДВЗ-2009-3 — дискретный полиномиальный ФП для оперативной обработки информации и идентификации параметров методом ФП.

Приведем некоторые результаты вычислительных экспериментов с инструментальным программным обеспечением «СДВЗ-2009».

На рис. 2 показаны результаты вычислительных экспериментов по оперативной оценке информационных переменных $\hat{X}_1 = \hat{p}_t$, $\hat{X}_2 = \hat{q}_t$ методом ЛФКБ (тестовый пример 1) при:

- кривые 1 — экспериментальные данные (рис. 1);
- кривые 2 — $M_1 = M_2 = 0$, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 0,001$, $N^* = 0,01$, $D^* = 0,01$;
- кривые 3 — $M_1 = M_2 = 0$, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 0,001$, $N^* = 0,01$, $D^* = 0,1$;
- кривые 4 — $M_1 = M_2 = 0$, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 0,001$, $N^* = 0,01$, $D^* = 1$.

Точность расчетов ($\sqrt{R_{ii}}$) соответственно для кривых 2, 3 и 4 составляет 0,001, 0,01 и 0,02. Дискретный (линейный и полиномиальный) ФП был применен для оперативной обработки информации и оценки параметров из тестовых примеров 3–5. Результаты оценки информационных переменных $\hat{X}_1 = \hat{p}_t$, $\hat{X}_2 = \hat{q}_t$ методом дискретного ЛФП на

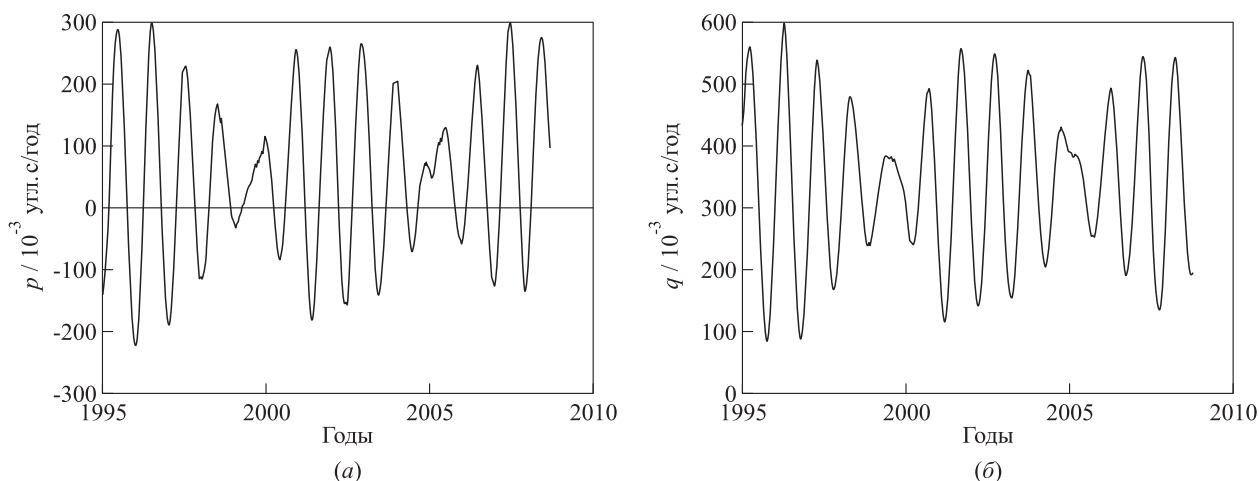


Рис. 1 Результаты наблюдения проекции угловой скорости $p = p(t)$ (а) и $q = q(t)$ (б) на интервале времени 1995–2010 гг. [10]

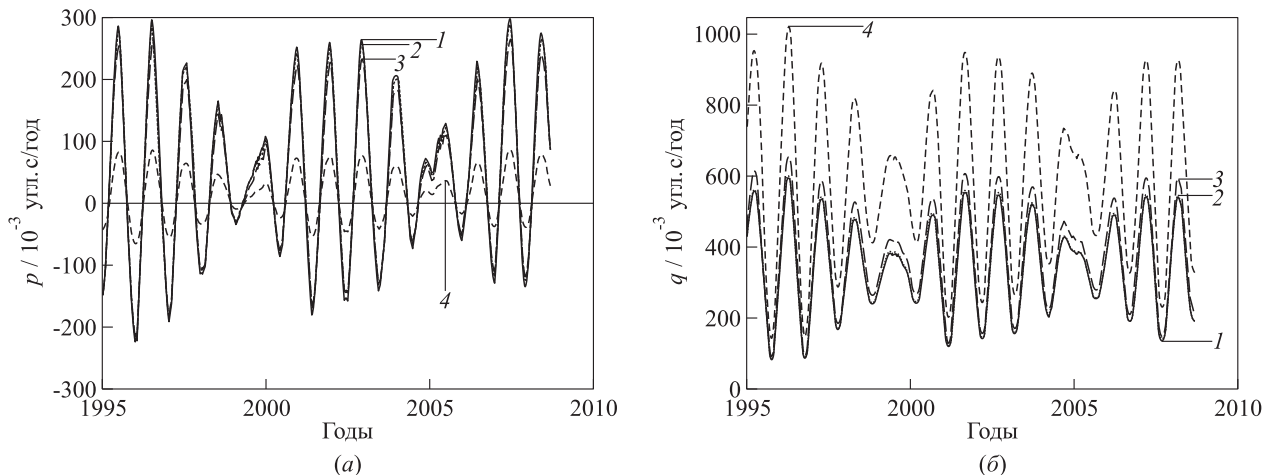


Рис. 2 Оперативная оценка методом ЛФКБ проекции угловой скорости $p = p(t)$ (а) и $q = q(t)$ (б) на интервале времени 1995–2010 гг.

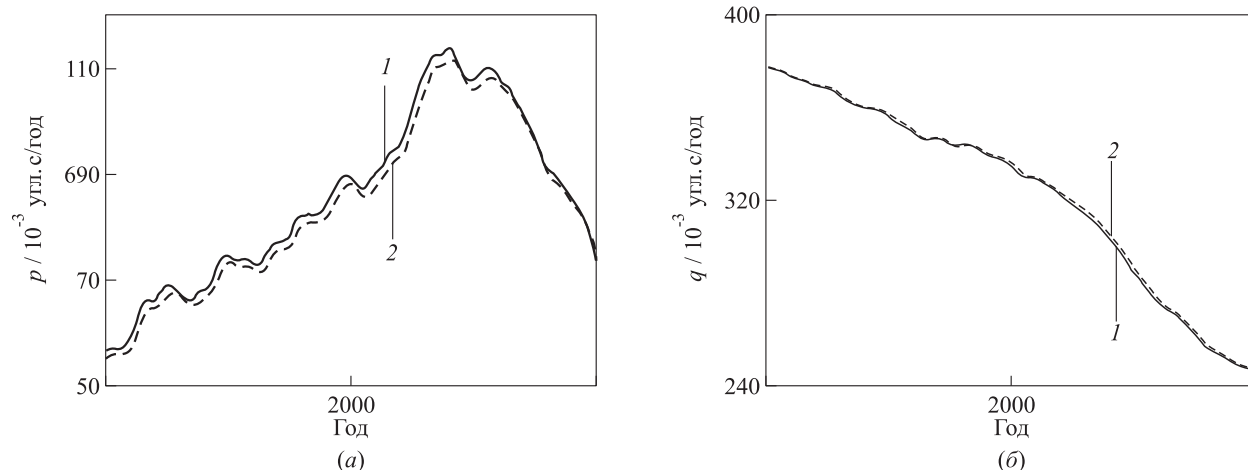


Рис. 3 Оперативная оценка методом ЛФП проекции угловой скорости $p = p(t)$ (а) и $q = q(t)$ (б) (в районе 2000 г.)

интервале времени с 1995 по 2010 гг. совпадают с ЛФКБ (рис. 2). Оценка этих параметров на небольшом временном интервале в 200 ежедневных измерений в районе 2000 г. представлена на рис. 3 для координат $p = p(t)$ и $q = q(t)$. Коэффициенты ФП при решении тестового примера 1 принимают следующие значения: $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 0,3817$; $\alpha_{12} = \alpha_{21} = 0,0038$; $\beta_{11} = \beta_{22} = 0,6172$; $\beta_{12} = \beta_{21} = 0,0062$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$. Вычислительные эксперименты по оперативной оценке переменных $\hat{X}_3 = M_1^*$, $\hat{X}_4 = N_2^*$ методом ЛФП для тестового примера 2 на интервале времени с 1995 по 2010 гг. и при $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 0,0001$, $N^* = D^* = 0,01$ дали следующие результаты: $\hat{M}_1^* = \hat{M}_2^* = 0,005$.

Модуль СДВЗ-2009-3 был использован для оценки параметров N^* и D^* с помощью дискретного полиномиального ФП на интервале времени в

500 ежесуточных измерений. В результате были получены следующие оценки: $\hat{N}^* = 0,015$; $\hat{D}^* = 0,009$.

Для учета случайных возмущений, представляющих собой широкополосные (4) и «окрашенные» (5) случайные процессы, а также инерционных свойств астрометрических систем измерения (8) и (9) разработан ЛФ, описываемый уравнениями утверждения 1. В соответствии с замечанием 6, статистическим моделированием подтверждена возможность замены рассматриваемых при $D^*/N^* < 10^{-2}$ возмущений белым шумом.

Как показали вычислительные эксперименты тестовых примеров 6–10, для оперативной оценки флуктуаций на интервале времени 3–5 лет рекомендуется использовать линейные фильтры, учитывающие одну широкополосную составляющую и первые две «окрашенные» составляющие. Для

интервалов времени 10–20 лет должны использоваться квазилинейные фильтры, учитывающие квазилинейные составляющие гироскопических и флуктуационно-диссипативных возмущений.

7 Заключение

Проведенное тестирование и статистическое моделирование убедительно показывают эффективность разработанных инструментальных средств по оперативному оцениванию флуктуаций и параметров модели.

В ИПИ РАН начата работа по дальнейшему развитию инструментального алгоритмического и программного обеспечения для обработки результатов наблюдений колебаний полюса Земли на основе канонических представлений случайных функций [5–12].

Литература

1. Пугачёв В. С., Сеницын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. 2-е изд. — М.: Наука, 1990.
2. Сеницын И. Н. Из опыта преподавания статистических основ информатики в технических университетах // Система и средства информатики. Спец. вып., посвященный II международному конгрессу ЮНЕСКО «Образование и информатика». — М.: Наука, 1996. Вып. 8. С. 68–73.
3. Сеницын И. Н. Развитие теории фильтров Пугачёва для оперативной обработки информации в стохастических системах // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 1. С. 3–13.
4. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева. 2-е изд. — М.: Логос, 2007.
5. Сеницын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009.
6. Сеницын И. Н. Корреляционные методы построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли по априорным данным // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 2. С. 2–14.
7. Сеницын И. Н., Корепанов Э. Р., Семендяев Н. Н. Методическое и программное обеспечение корреляционного анализа флуктуаций полюса Земли // Системы и средства информатики. Спец. вып. «Геоинформационные технологии». — М.: ИПИ РАН, 2008. С. 379–396.
8. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Корреляционная модель колебаний полюса Земли с параметрическими возмущениями // Астроном. журнал, 2008. Т. 85. № 6. С. 566–576.
9. Сеницын И. Н. Методы построения эргодических информационных моделей флуктуаций в стохастической динамике Земли // Информатика и её применения, 2009. Т. 3. Вып. 4. С. 2–11.
10. IERS Annual Reports. <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>.
11. Акуленко Л. Д., Кумакиев С. А., Марков Ю. Г., Рыжкова Л. В. Высокоточный прогноз движения полюса Земли // Астроном. журнал, 2006. Т. 83. № 4. С. 376–384.
12. Сеницын И. Н., Сеницын В. И., Корепанов Э. Р., Белосусов В. В., Конашенкова Т. Д., Семендяев Н. Н., Басилашвили Д. А. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (I) // Системы высокой доступности, 2009. Т. 5. № 3. С. 4–52.

ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ СТАТИСТИК, ОПИСЫВАЮЩИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДАННЫХ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ, С ОЦЕНКАМИ ОШИБОК*

Ю. Кавагучи¹, В. В. Ульянов², Я. Фуджикоши³

Аннотация: При описании геометрических свойств n наблюдений с p признаками необходимо исследовать асимптотическое поведение трех статистик: длины p -мерного вектора наблюдений, расстояния между двумя векторами наблюдений и угла между ними. В [1] найдено асимптотическое поведение указанных статистик, когда размерность p стремится к бесконечности, а объем выборки n остается постоянным. В настоящей работе результаты [1] уточняются путем построения асимптотических разложений. Кроме этого, найдены вычислимые оценки погрешности приближения предельными распределениями для первых двух статистик. Эти результаты будут также полезны в ситуациях, когда размерность данных не является чрезмерно большой.

Ключевые слова: данные большой размерности; асимптотические разложения; оценки погрешности; геометрические свойства

1 Введение

Рассмотрим случайную выборку x_1, \dots, x_n , взятую из p -мерного распределения. Набор данных можно рассматривать как n векторов или точек в p -мерном пространстве. При анализе данных полезным оказывается исследование следующих трех геометрических характеристик: длины p -мерного вектора наблюдений, расстояния между двумя векторами наблюдений и угла между ними.

В последние годы значительный интерес вызывают исследования для данных большой размерности. Это связано с тем, что такого типа данные встречаются все в большем числе приложений, в частности при анализе финансовых рынков и деятельности финансовых организаций, в социологии, генетике, биологии и математической физике. В асимптотической теории для данных большой размерности предполагается, что либо (i) оба параметра — размерность p и объем выборки n — стремятся к бесконечности, либо (ii) p стремится к бесконечности, а объем n фиксирован.

Недавний результат в рамках предположения (i) представлен, например, в [2], где получены также вычислимые оценки точности приближений.

Если x_i взяты из нормального распределения $N(0, I_p)$, в [1] в предположении (ii) показано,

что три статистики, описывающие геометрические свойства данных, удовлетворяют следующим предельным соотношениям:

$$\begin{aligned} \|x_i\| &= \sqrt{p} + O_p(1), & i &= 1, \dots, n; \\ \|x_i - x_j\| &= \sqrt{2p} + O_p(1), & i, j &= 1, \dots, n, \quad i \neq j; \\ \text{ang}(x_i, x_j) &= \frac{1}{2}\pi + O_p(p^{-1/2}), & i, j &= 1, \dots, n, \quad i \neq j, \end{aligned}$$

где $\|\cdot\|$ — евклидово расстояние и O_p обозначает стохастический порядок малости. Из этих результатов вытекает, что при увеличении размерности данные сходятся к вершинам правильного симплекса.

В настоящей работе эти результаты сначала уточняются путем построения асимптотических разложений для распределений указанных трех статистик. Затем строятся вычислимые оценки погрешности для предельных распределений первых двух статистик. При этом получены два типа неравенств с использованием идей из работы [3], где найдена оценка порядка $O(p^{-1})$ хи-квадрат приближения для преобразованной хи-квадрат случайной величины с p степенями свободы. Тем самым получена возможность судить о геометрических свойствах статистических данных, размерность которых не является чрезмерно большой.

* Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ, гранты 08-01-00567, 08-01-91205, 09-01-12180.

¹ Высшая научная и инженерная школа, Университет Чуо, Токио, n15007@gug.math.chuo-u.ac.jp

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, vulyan@gmail.com

³ Высшая научная и инженерная школа, Университет Чуо, Токио, fuji@math.sci.hiroshima-u.ac.jp

2 Асимптотические разложения для распределений статистик

Пусть $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})'$ ($i = 1, \dots, n$) есть выборка из распределения $N(0, I_p)$.

Рассмотрим сначала статистику

$$\|\mathbf{x}_i\| = S_{ii}^{1/2},$$

где $S_{ii} = \sum_{k=1}^p x_{ik}^2$. Поскольку статистика S_{ii} распределена как χ_p^2 — хи-квадрат случайная величина с p степенями свободы, она не зависит от i . Положим

$$V = \frac{S_{ii} - p}{\sqrt{2p}}.$$

Распределение V сходится к стандартному нормальному при стремлении p к бесконечности. Поскольку $S_{ii} = p(1 + \sqrt{2}p^{-1/2}V)$, имеем

$$\|\mathbf{x}_i\| = S_{ii}^{1/2} = \sqrt{p} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{2}Vp^{-1/2} - \frac{1}{4} Vp^{-1} + \frac{1}{8} \sqrt{2}V^3p^{-3/2} + \dots \right).$$

Рассмотрим асимптотическое разложение для распределения случайной величины

$$T_1 = \sqrt{2}(\|\mathbf{x}_i\| - \sqrt{p}).$$

Характеристическая функция величины T_1 запишется в виде

$$\begin{aligned} C_{T_1}(t) &= \mathbb{E} \left[\exp \left\{ (it)\sqrt{2}(\|\mathbf{x}_i\| - \sqrt{p}) \right\} \right] = \\ &= C_0(t) + \frac{1}{\sqrt{p}} C_1(t) + \frac{1}{p} C_2(t) + \mathcal{O}(p^{-3/2}), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} C_0(t) &= \mathbb{E} \left[\exp \{ (it)V \} \right]; \\ C_1(t) &= \mathbb{E} \left[-\frac{1}{4} \sqrt{2}(it)V^2 \exp \{ (it)V \} \right]; \\ C_2(t) &= \mathbb{E} \left[\left(\frac{1}{4} (it)V^3 + \frac{1}{16} (it)^2 V^4 \right) \exp \{ (it)V \} \right]. \end{aligned}$$

Для вычисления функций $C_0(t)$, $C_1(t)$ и $C_2(t)$ используем асимптотическое разложение для плотности случайной величины (с.в.) V . Характеристическая функция с.в. V может быть записана в виде

$$\begin{aligned} C_V(t) &= \exp \left\{ \frac{1}{2} (it)^2 \right\} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{p}} \frac{1}{6} (it)^3 \kappa_3 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{p} \left\{ \frac{1}{72} (it)^6 \kappa_3^2 + \frac{1}{24} (it)^4 \kappa_4 \right\} + \mathcal{O}(p^{-3/2}) \right]. \end{aligned}$$

Соответственно, плотность с.в. V раскладывается как

$$\begin{aligned} \phi(x) &\left[1 + \frac{1}{\sqrt{p}} \frac{\sqrt{2}}{3} h_3(x) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{p} \left\{ \frac{1}{9} h_6(x) + \frac{1}{2} h_4(x) \right\} \right] + \mathcal{O}(p^{-3/2}), \end{aligned}$$

где $h_i(x)$ — многочлен Эрмита порядка i , а $\phi(x)$ — плотность стандартного нормального распределения. Используя это разложение, можно найти $C_0(t)$, $C_1(t)$ и $C_2(t)$. Асимптотическое разложение для распределения с.в. T_1 можно получить, обращая ее характеристическую функцию. Тем самым доказана следующая теорема:

Теорема 1. Пусть \mathbf{x}_i есть p -мерный случайный вектор с распределением $N(0, I_p)$. Тогда функция распределения с.в. $T_1 = \sqrt{2}(\|\mathbf{x}_i\| - \sqrt{p})$ может быть представлена в виде

$$\Phi(x) - \phi(x) \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \ell_1(x) + \frac{1}{p} \ell_2(x) \right] + \mathcal{O}(p^{-3/2}),$$

где $\Phi(x)$ — функция распределения стандартного нормального закона, а $\ell_1(x)$ и $\ell_2(x)$ определяются формулами

$$\begin{aligned} \ell_1(x) &= \frac{1}{12} \sqrt{2} h_2(x) - \frac{1}{4} \sqrt{2} h_0(x); \\ \ell_2(x) &= \frac{1}{144} [-15h_5(x) - 6h_3(x) + 16h_2(x) - \\ &\quad - 81h_1(x) + 72h_0(x)]. \end{aligned}$$

Распределение с.в. $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$ ($i \neq j$) тесно связано с распределением $\|\mathbf{x}_i\|$, так как $(x_{ik} - x_{jk})/\sqrt{2} \sim N(0, 1)$. Точнее, распределение с.в. $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|/\sqrt{2}$ совпадает с распределением с.в. $\|\mathbf{x}_i\|$. Следовательно, распределение T_1 совпадает с распределением

$$T_2 = \sqrt{2} \left\{ \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|}{\sqrt{2}} - \sqrt{p} \right\} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - \sqrt{2p}$$

и справедливо следствие:

Следствие 1. Пусть \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j — независимые случайные векторы с распределением $N(0, I_p)$. Тогда распределение $T_2 = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - \sqrt{2p}$ совпадает с распределением T_1 . В частности, для функции распределения T_2 имеет место то же асимптотическое разложение, что и для T_1 .

Далее рассмотрим асимптотическое разложение для распределения угла θ между двумя независимыми векторами \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j , взятыми из нормального распределения $N(0, I_p)$. Поскольку

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 = \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 = S_{ii} + S_{jj} - 2S_{ij},$$

где $S_{ij} = \sum_{k=1}^p x_{ik}x_{jk}$, получаем

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{\|\mathbf{x}_i\|^2 + \|\mathbf{x}_j\|^2 - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2\|\mathbf{x}_i\|\|\mathbf{x}_j\|} = \\ &= \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii}S_{jj}}} = r_{ij}, \end{aligned}$$

где r_{ij} — выборочный коэффициент корреляции. Распределение r_{ij} исследовалось во многих работах. В частности, если $\rho_{ij} = 0$, для функции распределения r_{ij} имеем [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\sqrt{p} \cdot r_{ij} < x) &= \\ &= \Phi(x) + \frac{1}{p} \left\{ -\frac{3}{4}x + \frac{1}{4}x^3 \right\} \phi(x) + \mathbf{O}(p^{-3/2}). \end{aligned}$$

Поскольку θ может быть разложен в терминах r_{ij} в виде

$$\theta = \arccos r_{ij} = \frac{1}{2} \pi - \left(r_{ij} + \frac{1}{6} r_{ij}^3 + \frac{3}{40} r_{ij}^5 + \dots \right),$$

полагая $y = \sqrt{p} \cdot r_{ij}$, имеем

$$\sqrt{p} \left(\frac{1}{2} \pi - \theta \right) = y + \frac{1}{6p} y^3 + \mathbf{o}(p^{-1}).$$

Тем самым характеристическую функцию $T_3 = \sqrt{p}(\pi/2 - \theta)$ можно записать в виде

$$C_{\text{ang}}(it) = C_0(t) + \frac{1}{6p} C_1(t) + \mathbf{o}(p^{-1}),$$

где

$$\begin{aligned} C_0(t) &= \mathbf{E} [\exp \{(it)y\}]; \\ C_1(t) &= \mathbf{E} [\exp \{(it)y\} (it)y^3]. \end{aligned}$$

Используя асимптотическое разложение для распределения $\sqrt{p} \cdot r_{ij}$, вычисляем $C_0(t)$ и $C_1(t)$. Обращая полученную характеристическую функцию, приходим к следующей теореме:

Теорема 2. Пусть $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})'$ есть p -мерный случайный вектор, взятый из нормального распределения $N(0, I_p)$, и θ — угол между двумя независимыми векторами \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j . Тогда функция распределения с.в. $T_3 = \sqrt{p}(\pi/2 - \theta)$ может быть представлена в виде

$$\Phi(x) + \frac{1}{12p} [h_3(u) - 6h_1(x)] \phi(x) + \mathbf{o}(p^{-1}).$$

3 Оценки погрешностей приближений

В этой части получены вычисляемые выражения $B(p)$ такие, что

$$|\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| \leq B(p) = \mathbf{O}(p^{-1/2}), \quad (1)$$

где $T_1 = \sqrt{2}(\|\mathbf{x}_i\| - \sqrt{p})$. В силу следствия 1 результат (1) справедлив и для $T_2 = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - \sqrt{2p}$.

Идея доказательства опирается на работу [3]. Рассмотрим случайную величину

$$V_p = \frac{\chi_p^2 - p}{\sqrt{2p}}.$$

Пусть $h(x)$ есть действительная функция, определяемая формулой

$$h(x) = \sqrt{2} \left[\left(\sqrt{2p} \cdot x + p \right)^{1/2} - \sqrt{p} \right].$$

Тогда

$$h(V_p) = \sqrt{2} \left(\sqrt{\chi_p^2} - \sqrt{p} \right) = \sqrt{2} (\|X\| - \sqrt{p}) = T_1.$$

Если $x \geq -\sqrt{2p}$, то

$$\begin{aligned} \sup_{-\sqrt{2p} \leq x} |\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| &= \\ &= \sup_{-\sqrt{2p} \leq x} |\mathbf{P}(h(V_p) \leq x) - \Phi(x)| = \\ &= \sup_{-\sqrt{2p} \leq x} \left| \mathbf{P} \left(V_p \leq x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) - \Phi(x) \right| \leq \\ &\leq \sup_{-\sqrt{2p} \leq x} (|I_1| + |I_2|), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \mathbf{P} \left(V_p \leq x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) - \Phi \left(x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right); \\ I_2 &= \Phi \left(x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) - \Phi(x). \end{aligned}$$

Для I_1 в следующем разделе (см. леммы 1 и 2 ниже) будут получены два типа оценок:

$$|I_1| = \left| \mathbf{P} \left(V_p \leq x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) - \Phi \left(x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) \right| \leq D_i(\lambda, p) \text{ для } i = 1, 2.$$

Здесь же займемся оцениванием I_2 :

$$\begin{aligned} |I_2| &= \left| \Phi \left(V_p \leq x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \right) - \Phi(x) \right| = \\ &= \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{x+x^2/(2\sqrt{2p})} \exp \left\{ -\frac{z^2}{2} \right\} dz \right|. \end{aligned}$$

Если $x \geq 0$, то для I_2 получаем

$$I_2 \leq \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} \leq \frac{1}{2e\sqrt{p\pi}}.$$

Если $-\sqrt{2p} \leq x \leq 0$, то $x + x^2/(2\sqrt{2p}) \leq x/2$. Следовательно,

$$\begin{aligned} I_2 &\leq \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(x + \frac{x^2}{2\sqrt{2p}}\right)^2\right\} \leq \\ &\leq \frac{x^2}{2\sqrt{2p}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{2}\right)^2\right\} \leq \frac{2}{e\sqrt{p\pi}}. \end{aligned}$$

Поскольку $1/(2e\sqrt{p\pi}) < 2/(e\sqrt{p\pi})$, при выполнении условия $x \geq -\sqrt{2p}$ имеем

$$\sup_{-\sqrt{2p} \leq x} |\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| \leq D(\lambda, p) + \frac{2}{e\sqrt{p\pi}}, \quad (2)$$

где $D(\lambda, p) = \min(D_1(\lambda, p), D_2(\lambda, p))$.

Известно (см., например, 7.1.13 в [5]), что для любого $x \geq 0$

$$e^{x^2} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \leq \frac{1}{x + \sqrt{x^2 + 4/\pi}}. \quad (3)$$

Заменой переменных из (3) для всех $x > 0$ получаем

$$1 - \Phi(x) \leq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^{-x^2/2}}{x + \sqrt{x^2 + 8/\pi}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Phi(-\sqrt{2p}) &= 1 - \Phi(\sqrt{2p}) \leq \\ &\leq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^{-p}}{\sqrt{2p} + \sqrt{2p + 8/\pi}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (2) и (4) получаем следующую оценку

$$\begin{aligned} \sup_{x \in R} |\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| &\leq \\ &\leq \max\left(\min_\lambda D(\lambda, p) + \frac{2}{e\sqrt{p\pi}}, \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^{-p}}{\sqrt{2p} + \sqrt{2p + 8/\pi}}\right). \end{aligned}$$

Поскольку

$$\frac{2}{e\sqrt{p\pi}} > \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^{-p}}{\sqrt{2p} + \sqrt{2p + 8/\pi}}$$

и

$$\min_\lambda D(\lambda, p) > 0,$$

имеем

$$\sup_{x \in R} |\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| \leq \min_\lambda D(\lambda, p) + \frac{2}{e\sqrt{p\pi}}.$$

Таким образом (см. (6)), доказана следующая теорема:

Теорема 3. *Справедлива оценка*

$$\sup_{x \in R} |\mathbf{P}(T_1 \leq x) - \Phi(x)| < B(p),$$

где

$$B(p) = \min_\lambda D(\lambda, p) + \frac{2}{e\sqrt{p\pi}}, \quad (5)$$

минимум берется по всем $\lambda \in (0, \sqrt{3} - 1)$ и

$$\begin{aligned} D(\lambda, p) &= \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{\frac{\pi}{p}} \frac{1}{6} + \frac{2(1-\lambda)}{p(2-2\lambda-\lambda^2)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1+\lambda^2)}{\lambda^2 p} (1+\lambda^2)^{-p/4} + \frac{1}{\lambda^2 p} \exp\left(-\frac{\lambda^2 p}{4}\right) \right). \end{aligned}$$

Из следствия 1 и оценки для T_1 также получается

Следствие 2. *Для статистики $T_2 = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - \sqrt{2p}$*

$$\sup_{x \in R} |\mathbf{P}(T_2 \leq x) - \Phi(x)| < B(p),$$

где $B(p)$ определено в (5).

4 Два подхода к оценке I_1

Будем использовать результат из [3] для нахождения величины $D(\lambda, p)$, которая будет выступать оценкой для I_1 . В [3] доказано, что

$$\sup_{x \in R} |F_p(x) - \Phi_p(x)| \leq D_0(\lambda, p),$$

где

$$F_p(x) = \mathbf{P}(V_p \leq x) = \mathbf{P}\left(\chi_p^2 - p \leq \sqrt{2px}\right);$$

$$\Phi_p(x) = \Phi(x) + \frac{\sqrt{2}(1-x^2)}{3\sqrt{p}} \phi(x)$$

и

$$\begin{aligned} D_0(\lambda, p) &= \frac{2}{\pi p} \left(\frac{4}{9} + \frac{2(1-\lambda)}{(2-2\lambda-\lambda^2)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1+\lambda^2)^{1-p/4}}{\lambda^2} + \frac{3+\lambda}{3\lambda^2} e^{-\lambda^2(3-\lambda)p/(12+4\lambda)} \right). \end{aligned}$$

Чтобы оценить I_1 , надо найти равномерную оценку для $F_p(x) - \Phi(x)$. С этой целью будем использовать два подхода. Первый подход очень прост. Используя результат из [3]

$$\begin{aligned} & \sup_{x \in R} |F_p(x) - \Phi(x)| = \\ & = \sup_{x \in R} \left| F_p(x) - \left(\Phi_p(x) - \frac{\sqrt{2}(1-x^2)}{3\sqrt{p}} \phi(x) \right) \right| \leq \\ & \leq \sup_{x \in R} |F_p(x) - \Phi_p(x)| + \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{p}} \sup_{x \in R} |(1-x^2)\phi(x)| \leq \\ & \leq D_0(\lambda, p) + \frac{1}{3\sqrt{p\pi}}, \end{aligned}$$

получаем лемму:

Лемма 1. Для всех $\lambda \in (0, \sqrt{3} - 1)$ и целых $p > 1$

$$\sup_{x \in R} |F_p(x) - \Phi(x)| \leq D_1(\lambda, p),$$

где

$$\begin{aligned} D_1(\lambda, p) = & \frac{2}{\pi p} \left(\frac{4}{9} + \frac{2(1-\lambda)}{(2-2\lambda-\lambda^2)^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(1+\lambda^2)^{1-p/4}}{\lambda^2} + \right. \\ & \left. + \frac{3+\lambda}{3\lambda^2} e^{-\lambda^2(3-\lambda)p/(12+4\lambda)} \right) + \frac{1}{3\sqrt{p\pi}}. \end{aligned}$$

Второй подход основан на модификации результата из [3]. Пусть $f_p(t)$ и $g(t)$ — характеристические функции распределений $F_p(x)$ и $\Phi(x)$ соответственно. Положим $p^* = p/2$. Имеем

$$f_p(t) = \exp(-it\sqrt{p^*}) \left(1 - \frac{it}{\sqrt{p^*}} \right)^{-p^*}; \quad g(t) = e^{-t^2/2}.$$

Из формулы обращения для характеристических функций получаем

$$|F_p(x) - \Phi(x)| \leq \frac{1}{2\pi} (I_1 + I_2 + I_3),$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{|t| < \lambda\sqrt{p^*}} \frac{1}{|t|} |f_p(t) - e^{-t^2/2}| dt; \\ I_2 &= \int_{|t| \geq \lambda\sqrt{p^*}} \frac{|f_p(t)|}{|t|} dt; \\ I_3 &= \int_{|t| \geq \lambda\sqrt{p^*}} \frac{e^{-t^2/2}}{|t|} dt. \end{aligned}$$

Используя ту часть комплексной функции $\tau(z) = \log(1-z)$, для которой $\tau(0) = 0$, запишем:

$$\begin{aligned} f_p(t) &= \exp \left\{ -it\sqrt{p^*} - p^* \log \left(1 - \frac{it}{\sqrt{p^*}} \right) \right\} = \\ &= \exp \left\{ -\frac{t^2}{2} - \frac{it^3}{3\sqrt{p^*}} + p^* R_{p^*}(t) \right\} = \\ &= \exp \left\{ -\frac{t^2}{2} - \frac{it^3}{3\sqrt{p^*}} \right\} + S_{p^*}(t), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} R_{p^*}(t) &= -\log \left(1 - \frac{it}{\sqrt{p^*}} \right) - \frac{it}{\sqrt{p^*}} - \frac{(it)^2}{2p^*} - \frac{(it)^3}{3p^{*3/2}}; \\ S_{p^*}(t) &= \exp \left\{ -\frac{t^2}{2} - \frac{it^3}{3\sqrt{p^*}} \right\} (\exp p^* R_{p^*}(t) - 1). \end{aligned}$$

В [3] для $|t| < \lambda\sqrt{p^*}$ показано, что

$$|p^* R_{p^*}(t)| \leq \frac{|t|^4}{4p^*(1-|t|/\sqrt{p^*})}$$

и

$$\begin{aligned} |S_{p^*}(t)| &\leq e^{-t^2/2} |\exp \{ p^* R_{p^*}(t) \} - 1| \leq \\ &\leq e^{-t^2/2} \frac{|t|^4}{4p^*(1-\lambda)} \exp \left\{ \frac{|t|^2 \lambda^2}{4p^*(1-\lambda)} \right\} = \\ &= \frac{|t|^4}{4p^*(1-\lambda)} e^{-(a-|t|^2)/2} \end{aligned}$$

с $a = 1 - \lambda^2/(2(1-\lambda))$. Следовательно,

$$I_1 \leq I_{11} + I_{12},$$

где

$$\begin{aligned} I_{11} &= \int_{|t| < \lambda\sqrt{p^*}} \frac{e^{-t^2/2}}{|t|} |e^{-it^3/(3\sqrt{p^*})} - 1| dt; \\ I_{12} &= \int_{|t| < \lambda\sqrt{p^*}} \frac{|S_{p^*}|}{|t|} dt. \end{aligned}$$

Используя неравенство $|e^{-iz} - 1| \leq |z|$, получаем

$$I_{11} \leq \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{2}{3\sqrt{p^*}}$$

и

$$\begin{aligned} I_{12} &\leq \frac{1}{4p^*(1-\lambda)} \int_{|t| < \lambda\sqrt{p^*}} |t|^3 e^{-at^2/2} dt \leq \\ &\leq \frac{2}{4p^*(1-\lambda)} \int_0^\infty t^3 e^{-at^2/2} dt = \\ &= \frac{4}{4p^*(1-\lambda)a^2} = \frac{2}{p(1-\lambda)a^2}, \end{aligned}$$

где $a = 1 - \lambda^2/(2 - 2\lambda)$. Заметим, что $|f_p(t)| = (1 + t^2/p^*)^{-p^*/2}$. Оценку для I_2 непосредственно заимствуем из [3]:

$$I_2 \leq \int_{|t| \geq \lambda\sqrt{p^*}} \frac{1}{|t|} \frac{1}{(1 + t^2/p^*)^{p^*/2}} dt \leq \leq \frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} \int_{u \geq \lambda^2} (1 + u)^{-1-m/2} du = = \frac{4(1 + \lambda^2)}{\lambda^2 p} (1 + \lambda^2)^{-p/4}.$$

Рассуждая аналогично [6] и используя интегрирование по частям, получаем

$$I_3 \leq 2 \int_{|t| \geq \lambda\sqrt{p^*}} \frac{1}{t} e^{-t^2/2} dt = = \frac{2}{\lambda^2 p^*} \exp\left(-\frac{\lambda^2 p^*}{2}\right) - 2 \int_{\lambda\sqrt{p^*}}^{\infty} t^{-3} e^{-t^2/2} dt \leq \leq \frac{4}{\lambda^2 p} \exp\left(-\frac{\lambda^2 p}{4}\right).$$

Объединяя оценки для I_1 , I_2 и I_3 , завершаем доказательство следующей леммы:

Лемма 2. Для всех $\lambda \in (0, \sqrt{3} - 1)$ и целых $p > 1$

$$\sup_{x \in R} |F_p(x) - \Phi(x)| \leq D_2(\lambda, p),$$

где

$$D_2(\lambda, p) = \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{\frac{\pi}{p}} \frac{1}{6} + \frac{2(1 - \lambda)}{p(2 - 2\lambda - \lambda^2)^2} + + \frac{(1 + \lambda^2)}{\lambda^2 p} (1 + \lambda^2)^{-p/4} + \frac{1}{\lambda^2 p} \exp\left(-\frac{\lambda^2 p}{4}\right) \right).$$

Покажем, что оценка леммы 2 точнее оценки леммы 1, т. е.

$$D(\lambda, p) = \min(D_1(\lambda, p), D_2(\lambda, p)) = D_2(\lambda, p). \quad (6)$$

Действительно, поскольку

$$\frac{3 + \lambda}{3} > 1$$

и

$$\frac{3 - \lambda}{3 + \lambda} < 1$$

для положительных λ , равенство (6) верно.

В табл. 1 для некоторых значений p даны величины $\min_{\lambda} D(\lambda, p)$ и соответствующие значения λ , при которых достигается минимум.

Таблица 1 Минимумы $D(\lambda, p)$ при фиксированном p

p	λ	$\min D$
10	0,551	0,460
30	0,517	0,104
50	0,483	0,0550
100	0,416	0,0276
500	0,244	0,0094

Литература

1. Hall P., Marron J. S., Neeman A. Geometric representation of high dimension, low sample size data // J. Royal Statistical Soc. Series B, 2005. Vol. 67. P. 427–444.
2. Ulyanov V. V., Wakaki H., Fujikoshi Y. Berry–Esseen bound for high dimensional asymptotic approximation of Wilks’ lambda distribution // Statist. Probab. Lett., 2006. Vol. 76. No. 12. P. 1191–1200.
3. Ulyanov V. V., Christoph G., Fujikoshi Y. On approximations of transformed chi-squared distributions in statistical applications // Siber. Math. J., 2006. Vol. 47. No. 6. P. 1154–1166.
4. Konishi S. Asymptotic expansions for the distributions of functions of a correlation matrix // J. Multivariate Analysis, 1979. Vol. 9. No. 2. P. 259–266.
5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — М.: Наука, 1979.
6. Dobric V., Ghosh B. K. Some analogs of the Berry–Esseen bounds for first-order Chebyshev–Edgeworth expansions // Statist. Decisions, 1996. Vol. 14. No. 4. P. 383–404.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОЩНОСТИ КРИТЕРИЯ, ОСНОВАННОГО НА ВЫБОРОЧНОЙ МЕДИАНЕ, В СЛУЧАЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАПЛАСА*

В. Е. Бенинг¹, А. В. Сипина²

Аннотация: В работе прямыми методами, использующими асимптотические разложения, получена формула для предельного отклонения мощности критерия, основанного на выборочной медиане, от мощности наилучшего критерия в случае распределения Лапласа.

Ключевые слова: выборочная медиана; асимптотическое разложение; функция мощности; распределение Лапласа

1 Введение

Следуя работе [1], рассмотрим задачу проверки гипотезы

$$H_0 : \theta = 0$$

против последовательности сложных близких альтернатив вида

$$H_{n,1} : \theta = \frac{t}{\sqrt{n}}, \quad 0 < t < C, \quad C > 0$$

на основе выборки (X_1, \dots, X_n) — независимых одинаково распределенных наблюдений, имеющих распределение Лапласа с плотностью

$$p(x, \theta) = \frac{1}{2} e^{-|x-\theta|}, \quad x, \theta \in \mathbb{R}^1. \quad (1)$$

Распределение Лапласа широко применяется в прикладной статистике, например в задачах выделения полезного сигнала на фоне помех [2–4]. Естественность возникновения этого распределения обоснована в работе [5].

Для каждого фиксированного $t \in (0, C]$ обозначим через $\beta_n^*(t)$ мощность наилучшего критерия размера $\alpha \in (0, 1)$. По лемме Неймана–Пирсона [6, с. 94] такой критерий всегда существует и основан на логарифме отношения правдоподобия

$$\Lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \left(|X_i| - \left| X_i - tn^{-1/2} \right| \right). \quad (2)$$

В работах [1, 7] рассмотрен критерий, основанный на знаковой статистике, и получена формула для

предельного отклонения мощности данного критерия от мощности наилучшего критерия, основанного на $\Lambda_n(t)$. Поскольку у плотности $p(x, \theta)$ не существует производной по θ в точке $\theta = 0$, то это семейство не является регулярным. Это выражается в нарушении естественного порядка n^{-1} разности мощностей этих критериев и приводит к порядку $n^{-1/2}$.

В работе рассматривается статистика

$$T_n = \sqrt{2k} \zeta_n, \quad k = \left[\frac{n}{2} \right],$$

где ζ_n — выборочная медиана:

$$\zeta_n = \begin{cases} X_{(k+1)}, & n = 2k + 1; \\ \frac{X_{(k)} + X_{(k+1)}}{2}, & n = 2k. \end{cases}$$

Заметим, что в случае распределения Лапласа выборочная медиана совпадает с оценкой максимального правдоподобия (см. [3]).

Обозначим через $\beta_n(t)$ мощность критерия размера $\alpha \in (0, 1)$, основанного на статистике T_n . В работе получено асимптотическое разложение для $\beta_n(t)$ и вычислен предел разности мощностей $\beta_n^*(t)$ и $\beta_n(t)$

$$r(t) \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} (\beta_n^*(t) - \beta_n(t))$$

критериев (см. (5)), основанных соответственно на статистиках Λ_n и T_n .

В работе также приведено полное доказательство (см. [4]) представления выборочной медианы в виде случайной суммы независимых экспоненциально распределенных случайных величин.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 08-01-00567 и 08-07-00152.

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, Институт проблем информатики Российской академии наук, bening@yandex.ru

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, anna@sipin.ru

2 Асимптотическое разложение для мощности критерия, основанного на выборочной медиане

В этом разделе будет построено асимптотическое разложение для мощности $\beta_n(t)$. Основой для его получения служит работа [3] (см. теорему 2.1), в которой получено разложение для функции распределения выборочной медианы. Члены порядка $n^{-1/2}$ в разложении для функции распределения выборочной медианы без доказательства приведены также в работе [2].

Теорема 1. Для мощности $\beta_n(t)$ равномерно по $t \in (0, C]$, $C > 0$, справедливо следующее асимптотическое разложение:

$$\beta_n(t) = \begin{cases} \Phi(t - u_\alpha) - \frac{t(2u_\alpha - t)}{2\sqrt{n}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ \quad + o(n^{-1/2}), \quad t \leq u_\alpha, \quad \alpha < \frac{1}{2}; \\ \Phi(t - u_\alpha) - \frac{2u_\alpha^2 + t^2 - 2u_\alpha t}{2\sqrt{n}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ \quad + o(n^{-1/2}), \quad t > u_\alpha, \quad \alpha < \frac{1}{2}; \\ \Phi(t - u_\alpha) + \frac{t(2u_\alpha - t)}{2\sqrt{n}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ \quad + o(n^{-1/2}), \quad \alpha \geq \frac{1}{2}, \end{cases}$$

где $\Phi(x)$ и $\varphi(x)$ — функция распределения и плотность стандартного нормального закона и $\Phi(u_\alpha) = 1 - \alpha$.

Доказательство. Для доказательства теоремы воспользуемся асимптотическим разложением для функции распределения выборочной медианы в случае распределения Лапласа из работы [3] (см. формулу (1.3)):

$$P_{n,\theta}(\sqrt{2k}(\zeta_n - \theta) < x) = \Phi(x) - \frac{x|x|}{2\sqrt{2k}} \varphi(x) + \frac{x(18 + 10x^2 - 3x^4)}{48k} \varphi(x) + o(n^{-1}). \quad (3)$$

Подберем критическое значение d_n , исходя из условия

$$P_{n,0}(T_n > d_n) = \alpha + o(n^{-1}).$$

Будем искать d_n в виде

$$d_n = u_\alpha + \frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}.$$

Из формулы (3) следует, что

$$P_{n,0}(T_n > d_n) = 1 - \Phi(d_n) + \frac{d_n|d_n|}{2\sqrt{2k}} \varphi(d_n) - \frac{d_n(18 + 10d_n^2 - 3d_n^4)}{48k} \varphi(d_n) + o(n^{-1}). \quad (4)$$

Чтобы раскрыть модуль в выражении (4), рассмотрим два случая: $\alpha < 1/2$ и $\alpha \geq 1/2$.

Рассмотрим случай $\alpha < 1/2$. Это означает, что при достаточно больших n справедливо неравенство $d_n > 0$. Подставляя выражение для d_n в формулу (4) и применяя следующие разложения:

$$\Phi(d_n) = \Phi\left(u_\alpha + \frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}\right) = \Phi(u_\alpha) + \left(\frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}\right) \varphi(u_\alpha) - \frac{u_\alpha a^2}{4k} \varphi(u_\alpha) + o(n^{-1});$$

$$\varphi(d_n) = \varphi\left(u_\alpha + \frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}\right) = \varphi(u_\alpha) - \left(\frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}\right) u_\alpha \varphi(u_\alpha) + o(n^{-1}),$$

получаем

$$1 - \Phi(u_\alpha) - \left(\frac{a}{\sqrt{2k}} + \frac{b}{2k}\right) \varphi(u_\alpha) + \frac{u_\alpha a^2}{4k} \varphi(u_\alpha) + \frac{(u_\alpha + (a/\sqrt{2k}) + b/(2k))^2}{2\sqrt{2k}} \times \left(\varphi(u_\alpha) - \frac{a}{\sqrt{2k}} u_\alpha \varphi(u_\alpha)\right) - \frac{u_\alpha(18 + 10u_\alpha^2 - 3u_\alpha^4)}{48k} \varphi(u_\alpha) = \alpha + o(n^{-1}).$$

Приравнявая коэффициенты при $1/\sqrt{2k}$ и $1/(2k)$ к нулю, находим выражения для a и b :

$$a = \frac{u_\alpha^2}{2};$$

$$b = -\frac{3}{4} u_\alpha + \frac{1}{12} u_\alpha^3;$$

$$d_n = u_\alpha + \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} - \frac{3}{8k} u_\alpha + \frac{1}{24k} u_\alpha^3.$$

Теперь для получения асимптотического разложения мощности критерия используем разложение

$$P_{n,tn^{-1/2}}(T_n < x) = \Phi\left(x - t\sqrt{2kn}^{-1/2}\right) - \frac{\left(x - t\sqrt{2kn}^{-1/2}\right) \left|x - t\sqrt{2kn}^{-1/2}\right|}{2\sqrt{2k}} \times \varphi\left(x - t\sqrt{2kn}^{-1/2}\right) +$$

$$+ \frac{x - t\sqrt{2k}n^{-1/2}}{48k} \left(18 + 10(x - t\sqrt{2k}n^{-1/2})^2 - 3(x - t\sqrt{2k}n^{-1/2})^4 \right) \times \varphi \left(x - t\sqrt{2k}n^{-1/2} \right) + o(n^{-1}),$$

которое получается при подстановке $\theta = tn^{-1/2}$ в формулу (3).

Имеем

$$\begin{aligned} \beta_n(t) &= P_{n,tn^{-1/2}}(T_n > d_n) = \\ &= 1 - \Phi(d_n - t) + \frac{(d_n - t)|d_n - t|}{2\sqrt{2k}} \varphi(d_n - t) - \\ &- \frac{d_n - t}{48k} \left(18 + 10(d_n - t)^2 - 3(d_n - t)^4 \right) \varphi(d_n - t) + \\ &+ o(n^{-1}). \end{aligned}$$

Аналогично предыдущему, рассмотрим два случая: $t \leq u_\alpha$ и $t > u_\alpha$.

Пусть сначала $t \leq u_\alpha$. Используя разложения

$$\begin{aligned} \Phi(d_n - t) &= \\ &= \Phi \left(u_\alpha - t + \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} - \frac{3}{8k}u_\alpha + \frac{1}{24k}u_\alpha^3 \right) = \\ &= \Phi(u_\alpha - t) + \left(\frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} - \frac{3}{8k}u_\alpha + \frac{1}{24k}u_\alpha^3 \right) \times \\ &\quad \times \varphi(u_\alpha - t\sqrt{2k}n^{-1/2}) - \\ &- \frac{(u_\alpha - t\sqrt{2k}n^{-1/2}) \varphi(u_\alpha - t\sqrt{2k}n^{-1/2}) u_\alpha^4}{16k} + \\ &+ o(n^{-1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi(d_n - t) &= \\ &= \varphi \left(u_\alpha - t + \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} - \frac{3}{8k}u_\alpha + \frac{1}{24k}u_\alpha^3 \right) = \\ &= \varphi(u_\alpha - t) - (u_\alpha - t) \varphi(u_\alpha - t) \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} + \\ &+ o(n^{-1/2}), \end{aligned}$$

получаем, что

$$\begin{aligned} \beta_n(t) &= 1 - \Phi(u_\alpha - t) - \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ &+ \frac{u_\alpha^2}{2\sqrt{2k}} \varphi(u_\alpha - t) - \frac{2u_\alpha t - t^2}{2\sqrt{2k}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ &+ o(n^{-1/2}) = \Phi(t - u_\alpha) - \frac{t(2u_\alpha - t)}{2\sqrt{2k}} \varphi(u_\alpha - t) + \\ &+ o(n^{-1/2}). \end{aligned}$$

Во втором случае при $t > u_\alpha$ выражение для мощности приобретает вид:

$$\begin{aligned} \beta_n(t) &= \Phi(t - u_\alpha) - \\ &- \frac{t(2u_\alpha^2 + t^2 - 2u_\alpha t)}{2\sqrt{n}} \varphi(u_\alpha - t) + o(n^{-1/2}). \end{aligned}$$

При $\alpha \geq 1/2$ аналогичным образом имеем

$$\begin{aligned} \beta_n(t) &= \\ &= \Phi(t - u_\alpha) + \frac{t(2u_\alpha - t)}{2\sqrt{n}} \varphi(u_\alpha - t) + o(n^{-1/2}). \end{aligned}$$

Из этих формул следует утверждение теоремы. \square

В работе [7] было показано, что для мощности $\beta_n^*(t)$ критерия размера $\alpha \in (0, 1)$, основанного на логарифме отношения правдоподобия $\Lambda_n(t)$ (2), справедливо асимптотическое разложение

$$\beta_n^*(t) = \Phi(t - u_\alpha) - \frac{t^2}{6\sqrt{n}} \varphi(t - u_\alpha) + o(n^{-1/2}).$$

Используя это разложение и теорему 1, получаем формулу для предельного отклонения нормированной разности мощностей рассматриваемых критериев:

$$\begin{aligned} r(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n}(\beta_n^*(t) - \beta_n(t)) = \\ &= \begin{cases} \left(tu_\alpha - \frac{2t^2}{3} \right) \varphi(u_\alpha - t), & t \leq u_\alpha, \alpha < \frac{1}{2}; \\ \left(u_\alpha^2 + \frac{t^2}{3} - u_\alpha t \right) \varphi(u_\alpha - t), & t > u_\alpha, \alpha < \frac{1}{2}; \\ \left(\frac{t^2}{3} - tu_\alpha \right) \varphi(u_\alpha - t), & \alpha \geq \frac{1}{2}. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

3 Представление выборочной медианы в виде случайной суммы

В этом разделе докажем лемму о представлении выборочной медианы в случае распределения Лапласа в виде суммы случайного числа независимых экспоненциально распределенных случайных величин. Формулы для представления порядковых статистик в случае распределения Лапласа в виде

подобной суммы приведены в работе [4, с. 63], но без строгого доказательства.

Лемма 1. В случае распределения Лапласа выборочную медиану можно представить в следующем виде (здесь равенства по распределению):

$$\begin{aligned} \zeta_{2k+1} &\stackrel{d}{=} \delta_{2k+1} \sum_{j=k+1}^{K_{2k+1}} \frac{W_j}{j}; \\ \zeta_{2k} &\stackrel{d}{=} \frac{W_1 - W_2}{2k} \mathbf{1}(B_{2k+1} = k) + \\ &+ \left(\delta_{2k} \sum_{j=k+1}^{K_{2k+1}} \frac{W_j}{j} + \delta_{2k} \frac{W_k}{2k} \right) \mathbf{1}(B_{2k+1} \neq k), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\delta_n = \text{sign} \left(B_n - k - \frac{1}{2} \right),$$

W_j — независимые экспоненциально (с параметром 1) распределенные случайные величины; B_n — бернуллиевские случайные величины с параметрами $p = 1/2$ и n , независимые от W_j ;

$$K_n = \max(B_n, \bar{B}_n), \quad \bar{B}_n = n - B_n.$$

Доказательство.

Вначале докажем две вспомогательные формулы, справедливые для любого действительного числа s и любых натуральных чисел a и b :

$$\prod_{j=a}^{a+b} \frac{1}{j+is} = \sum_{j=0}^b \frac{(-1)^j}{(a+j+is)(b-j)!j!}; \quad (8)$$

$$\sum_{l=0}^k \frac{k!}{l!} \prod_{j=a}^{a+k-l} \frac{1}{j+is} = \sum_{l=0}^k \binom{k}{l} \frac{(-1)^l 2^{k-l}}{a+l+is}. \quad (9)$$

Формулу (8) докажем методом математической индукции.

При $b = 1$ формула верна. Предполагая ее верной при $b \geq 1$, докажем что она верна и при $b + 1$:

$$\begin{aligned} \prod_{j=a}^{a+b+1} \frac{1}{j+is} &= \frac{1}{a+b+1+is} \prod_{j=a}^{a+b} \frac{1}{j+is} = \\ &= \frac{1}{a+b+1+is} \left(\sum_{l=0}^k \binom{k}{l} \frac{(-1)^l 2^{k-l}}{a+l+is} \right) = \\ &= \sum_{j=0}^b \frac{(-1)^j}{(b-j)!j!} \left(\frac{1}{(b+1-j)(a+j+is)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{(b+1-j)(a+b+1+is)} \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=0}^b \frac{(-1)^j}{(a+j+is)(b+1-j)!j!} - \\ &\quad - \frac{1}{a+b+1+is} \sum_{j=0}^b \frac{(-1)^j}{(b-j+1)!j!}. \end{aligned}$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^b \frac{(-1)^j}{(b-j+1)!j!} &= \sum_{j=0}^{b+1} \frac{(-1)^j}{(b-j+1)!j!} - \frac{(-1)^{b+1}}{(b+1)!} = \\ &= \frac{1}{(b+1)!} (1-1)^{b+1} - \frac{(-1)^{b+1}}{(b+1)!} = -\frac{(-1)^{b+1}}{(b+1)!}. \end{aligned}$$

И следовательно, формула (8) доказана. Формула (9) следует из доказанной формулы (8), поскольку

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^k \frac{k!}{l!} \prod_{j=a}^{a+k-l} \frac{1}{j+is} &= \\ &= \sum_{l=0}^k \frac{k!}{l!} \sum_{j=0}^{k-l} \frac{(-1)^j}{(a+j+is)(k-l-j)!j!} = \\ &= \sum_{j=0}^k \frac{(-1)^j}{a+j+is} \sum_{l=0}^{k-j} \binom{k}{j} \binom{k-j}{l} = \\ &= \sum_{j=0}^k \frac{(-1)^j}{a+j+is} \binom{k}{j} 2^{k-j}. \end{aligned}$$

Теперь приступим к доказательству основного утверждения леммы. Рассмотрим сначала случай $n = 2k + 1$. Плотность $(k + 1)$ -й порядковой статистики, как известно, выражается формулой (см. [8])

$$p_{2k+1}(x) = (2k + 1) \binom{2k}{k} f(x) (F(x)) (1 - F(x))^k,$$

где $f(x)$ и $F(x)$ — соответственно плотность и функция распределения исходных случайных величин.

Найдем характеристическую функцию $\phi_{2k+1}(s)$ выборочной медианы ζ_{2k+1} :

$$\begin{aligned} \phi_{2k+1}(s) &= \mathbb{E} e^{is\zeta_{2k+1}} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{isx} f(x) dx = \\ &= (2k + 1) \binom{2k}{k} 2^{-(k+1)} \times \\ &\quad \times \sum_{j=0}^k (-1)^j 2^{-j} \binom{k}{ej} \frac{2(k+1+j)}{(k+1+j)^2 + s^2}. \end{aligned}$$

Теперь найдем характеристическую функцию $f_{2k+1}(s)$ случайной величины, определенной

в правой части формулы (6). С учетом того, что характеристическая функция стандартной экспоненциальной случайной величины равна $1/(1 - is)$, имеем

$$\begin{aligned} f_{2k+1}(s) &= \\ &= \sum_{l=0}^{2k+1} \mathbb{E} \exp \left(is \delta_{2k+1} \sum_{j=k+1}^{K_{2k+1}} \frac{W_j}{j} \right) \mathbf{1}(B_{2k+1} = l) = \\ &= 2^{-(2k+1)} \left(\sum_{l=0}^k \binom{2k+1}{l} \prod_{j=k+1}^{2k+1-l} \frac{j}{j+is} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{l=k+1}^{2k+1} \binom{2k+1}{l} \prod_{j=k+1}^l \frac{j}{j-is} \right) = \\ &= 2^{-(2k+1)} (2k+1) \binom{2k}{k} \sum_{l=0}^k \frac{k!}{l!} \left(\prod_{j=k+1}^{2k+1-l} \frac{1}{j+is} + \right. \\ &\quad \left. + \prod_{j=k+1}^{2k+1-l} \frac{1}{j-is} \right). \end{aligned}$$

Применяя формулу (9), получаем

$$\begin{aligned} f_{2k+1}(s) &= (2k+1) \binom{2k}{k} 2^{-(k+1)} \times \\ &\quad \times \sum_{j=0}^k (-1)^j 2^{-j} \binom{k}{j} \frac{2(k+1+j)}{(k+1+j)^2 + s^2}. \end{aligned}$$

Значит, $f_{2k+1}(s) \equiv \phi_{2k+1}(s)$ и представление (6) доказано.

Перейдем теперь к рассмотрению случая четного $n = 2k$. Совместная плотность двух порядковых статистик $X_{(k)}$ и $X_{(k+1)}$ определяется формулой (см. [8])

$$p(x, y) = \frac{(2k)!}{((k-1)!)^2} (F(x)(1 - F(y)))^{k-1} f(x)f(y).$$

Из этой формулы нетрудно получить, что плотность случайной величины

$$\zeta_{2k} = \frac{X_{(k)} + X_{(k+1)}}{2}$$

равна

$$\begin{aligned} p_{2k}(x) &= \frac{(2k)!}{2^k ((k-1)!)^2} \times \\ &\quad \times \left(\sum_{j=0}^{k-2} \frac{(-1)^j \binom{k-1}{j} 2^{-j}}{k-1-j} e^{-(k+1+j)|x|} \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \left(1 - e^{-(k-1-j)|x|} \right) - \\ &\quad \left. - \frac{(-1)^k}{2^{k-1}} |x| e^{-2k|x|} + \frac{1}{k 2^k} e^{-2k|x|} \right). \quad (10) \end{aligned}$$

Подробный вывод этой формулы приведен в работе [9]. Исходя из формулы (10), найдем характеристическую функцию $\phi_{2k}(s)$ выборочной медианы ζ_{2k} :

$$\begin{aligned} \phi_{2k}(s) &= \frac{(2k)!}{2^k ((k-1)!)^2} \left(\sum_{j=0}^{k-2} \frac{(-1)^j \binom{k-1}{j} 2^{-j}}{k-1-j} \times \right. \\ &\quad \times \left(\frac{2(k+1+j)}{(k+1+j)^2 + s^2} - \frac{4k}{4k^2 + s^2} \right) - \\ &\quad \left. - \frac{(-1)^k}{2^{k-2}(4k^2 + s^2)} + \frac{1}{2^{k-2}(4k^2 + s^2)} \right). \end{aligned}$$

Найдем теперь характеристическую функцию $f_{2k}(s)$ случайной величины, определенной в правой части формулы (7). Учитывая формулу (9), получим

$$\begin{aligned} f_{2k}(s) &= \sum_{l=0}^{k-1} \mathbb{P}(B_{2k} = l) \frac{2k}{2k+is} \prod_{j=k+1}^{2k-l} \frac{j}{j+is} + \\ &\quad + \sum_{j=k+1}^{2k} \mathbb{P}(B_{2k} = l) \frac{2k}{2k-is} \prod_{j=k+1}^{2k-l} \frac{j}{j-is} + \\ &\quad + \mathbb{P}(B_{2k} = k) \frac{4k^2}{4k^2 + s^2} = \\ &= \frac{(2k)!}{2^k ((k-1)!)^2} \left(\frac{1}{2^{k-2}(4k^2 + s^2)} + \right. \\ &\quad + 2^{1-k} \sum_{l=0}^{k-1} (-1)^l 2^{k-l-1} \binom{k-1}{l} \times \\ &\quad \times \left(\frac{1}{(2k+is)(k+1+l-is)} + \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{(2k-is)(k+1+l-is)} \right) \right). \end{aligned}$$

Применяя при $l \neq k-1$ следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(2k+is)(k+1+l+is)} &= \\ &= \frac{1}{k-1-l} \left(\frac{1}{k+1+l+is} - \frac{1}{2k+is} \right), \end{aligned}$$

получаем равенство

$$f_{2k}(s) = \frac{(2k)!}{2^k((k-1)!)^2} \left(\sum_{j=0}^{k-2} \frac{(-1)^j \binom{k-1}{j} 2^{-j}}{k-1-j} \times \left(\frac{2(k+1+j)}{(k+1+j)^2 + s^2} - \frac{4k}{4k^2 + s^2} \right) - \frac{(-1)^k}{2^{k-2}(4k^2 + s^2)} + \frac{1}{2^{k-2}(4k^2 + s^2)} \right).$$

Таким образом, $\phi_{2k}(s) \equiv f_{2k}(s)$ и утверждение (7) доказано. \square

Литература

1. *Королев Р. А., Тестова А. В., Бенинг В. Е.* О мощности асимптотически оптимального критерия в случае распределения Лапласа // Вестник Тверского Государственного Университета, серия Прикладная математика, 2008. Вып. 8. № 4(64). С. 5–23.
2. *Takeuchi K.* Asymptotic theory of statistical estimation. — Tokyo, 1974. (In Japanese.)
3. *Бурнашев М. В.* Асимптотические разложения для медианной оценки параметра // Теор. вероятн. и ее прим., 1996. Т. 41. Вып. 4. С. 738–753.
4. *Kotz S., Kozubowski T. J., Podgorski K.* The Laplace distribution and generalizations: A revisit with applications to communications, economics, engineering, and finance. — Birkhauser, 2001. P. 349.
5. *Бенинг В. Е., Королев В. Ю.* Некоторые статистические задачи, связанные с распределением Лапласа // Информатика и её применения, 2008. Т. 2. Вып. 2. С. 19–34.
6. *Леман Э.* Проверка статистических гипотез. — М.: Наука, 1964. 498 с.
7. *Королев Р. А., Бенинг В. Е.* Асимптотические разложения для мощностей критериев в случае распределения Лапласа // Вестник Тверского Государственного Университета, серия Прикладная математика, 2008. Вып. 3(10). № 26(86). С. 97–107.
8. *David H. A., Nagaraja H. N.* Order Statistics. 3rd ed. — New Jersey: Wiley, 2003. P. 458.
9. *Asrabadi B. R.* The exact confidence interval for the scale parameter and the MVUE of the Laplace distribution // Communications in statistics. Theory and methods, 1985. Vol. 14. No. 3. P. 713–733.

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ДОСТУПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ К РАЗНОРОДНЫМ ВЕДОМСТВЕННЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ РЕСУРСАМ

Г. Я. Илюшин¹, И. А. Соколов²

Аннотация: Статья посвящена вопросам реализации интероперабельности приложений и управления доступом пользователей к хранилищам информации в условиях модернизации инфраструктуры информационных технологий (ИТ) крупных ведомств. Для обеспечения направленной эволюции унаследованных автоматизированных информационных систем (АИС) и хранилищ данных без остановки функционирования существующих систем предложена технология создания программно-технической инфраструктуры промежуточного слоя. Промежуточный слой, с использованием технологий сервисно-ориентированной архитектуры и веб-сервисов, решает как задачи обеспечения интероперабельности разнородных приложений, так и задачи реализации централизованной модели управления доступом пользователей к разнородным хранилищам данных на основе формализованных ролей. Помимо задач интероперабельности, инфраструктура промежуточного слоя позволяет решить целый спектр задач обеспечения необходимого уровня информационной безопасности.

Ключевые слова: интероперабельность; управление доступом; промежуточный слой; веб-сервисы; унаследованные системы; метаданные

1 Введение

Усиление роли и расширение финансовых возможностей государства в целом и федеральных органов власти в частности, существенно изменившиеся требования законодательства, накопление позитивного опыта использования современных технологий интеграции данных в крупных пилотных проектах федерального и регионального уровня заставили по-новому взглянуть на ИТ-инфраструктуру ключевых федеральных ведомств и поставить масштабные задачи коренного изменения положения дел в информатизации органов государственной власти. Большинство федеральных ведомств прошли непростой путь создания автоматизированных систем, располагают отлаженными и достаточно современными программно-техническими системами, имеют собственную разветвленную и довольно инерционную управленческую структуру. Существующие ведомственные системы создавались и развивались в течение десятилетий, от разрозненных функционально и/или регионально ориентированных подсистем к интегрированным системам. При этом больше внимания уделялось функциональной интеграции систем, чем информационной.

Необходимость максимально возможного сохранения вложенных инвестиций, невозможность

остановки действующих систем на длительный период, сложности внедрения из-за необходимости массового переобучения персонала и необходимость существенной модернизации информационного взаимодействия департаментов ведомства создают значительные трудности как в принятии правильных управленческих решений руководством ведомства, так и в технической реализации крупных интеграционных проектов. И все же именно коренное изменение ранее существовавших подходов к созданию, модернизации и развитию ведомственных систем диктуется целым комплексом объективных причин.

1. Основа существующих технических решений построения информационных систем ведомств создавалась в начальный период централизации государственной власти, когда финансирование ИТ-проектов осуществлялось преимущественно из региональных бюджетов.

В регионах-донорах создавалась собственная, не совместимая с другими регионами ИТ-инфраструктура, проводилась собственная техническая политика, закупались и внедрялись технические и программные платформы (в том числе базовые операционные системы, системы управления базами данных (СУБД) и инструментальные средства), самостоятельно вы-

¹Институт проблем информатики Российской академии наук, ilushin@ipiran.ru

²Институт проблем информатики Российской академии наук, isokolov@ipiran.ru

бирались методы, стандарты и технологии интеграции. Разрабатываемые и на территориальном уровне внедряемые собственные типовые решения в интересах подразделений ведомств, расположенных в регионе, интегрировались на основе инструментария мощных и дорогостоящих СУБД, поскольку региональные власти не особенно заботились о лицензионной чистоте, а следовательно, и стоимости используемого программного обеспечения (ПО). Координация множества региональных разработок в интересах ведомства на федеральном уровне (руководства ведомства) была затруднена, а зачастую невозможна.

В дотационных регионах отсутствие достаточных средств на внедрение и обучение, неразвитость ИТ-инфраструктуры и недостаток специалистов, владеющих современными компьютерными технологиями, привели к консервации технических решений 90-х годов прошлого века, основанных чаще всего еще на технологиях MS DOS.

Значительный разрыв между регионами-донорами и дотационными регионами (в 5–10 раз) наблюдается в настоящее время как в показателях развитости ИТ-инфраструктуры (оснащенность учреждений и домохозяйств фиксированной и мобильной связью, компьютерами, высокоскоростным Интернетом, средствами автоматизации деятельности), так и в показателях уровня накопленного «человеческого капитала» (знаний и опыта населения в использовании современных ИТ) [1].

2. За последние несколько лет произошла существенная реорганизация системы государственного управления, в то же время существенно изменились требования к качеству информации и одновременно к ее защите от несанкционированного доступа (НСД), появились законодательные ограничения по защите персональных данных, ужесточились требования к лицензированию ПО.

По мере формирования новой управленческой структуры, расширения возможностей централизованного финансирования, каждое ведомство начинало создавать свою ИТ-инфраструктуру и вертикаль информационных ресурсов (ИР), выбирая собственные технические и программные платформы реализации прикладных задач и мало заботясь о совместимости с техническими решениями других ведомств. В то же время ужесточились требования федеральной власти к самим ведомствам по ответственности должностных лиц за актуаль-

ность и достоверность информации в их базах данных.

По мере внедрения новых информационных систем в связи с вводом в действие императивных норм и регламентов происходила постепенная техническая изоляция информационных систем и баз данных разных ведомств, внедрялись разные технические решения по организации разграничения доступа и защите данных от НСД. Интеграционные технические решения, созданные в крупных регионах, начали постепенно изживать себя, вступая в противоречие с регламентами и технической политикой отдельных ведомств.

В рамках каждого ведомства начали формироваться свои требования по разграничению доступа сотрудников к информации в соответствии с их должностными функциями. А поскольку практически каждое ведомство нуждалось в информации из других ведомств, налаживался обмен массивами информации между ними. На практике это привело к рассогласованию данных об одних и тех же информационных объектах из-за временного разрыва в обновлении информации, неправильной фильтрации данных при обмене массивами, из-за недостаточно продуманных и некачественно реализованных регламентов взаимодействия, отсутствия надежных межведомственных информационных контуров обратной связи. Наиболее трудноразрешимые проблемы (как для сотрудников ведомств, так и для граждан) возникают в случаях, когда ошибки, возникшие в недрах одного ведомства, выявляются служащими другого ведомства в связи с предоставлением гражданами или организациями первичных документов. Стало понятно, что межведомственный обмен массивами данных в силу своих органических недостатков не может служить основой преодоления противоречий в информационных хранилищах ведомств и необходимо внедрение более сложных и гибких технологий обеспечения целостности баз данных в различных органах государственной власти.

3. Новые законодательно устанавливаемые требования к повышению качества обслуживания населения (идеология «одного окна»), отмена множества ведомственных инструкций по различного рода «откреплениям» и «прикреплениям» граждан в связи со сменой места жительства или пребывания, настоятельные требования высших государственных органов власти по предоставлению гражданам различ-

ных сервисов «электронного правительства» привели к серьезным затруднениям, а в некоторых случаях даже к невозможности модернизации технических решений ведомственных систем без изменения основополагающих принципов их построения.

Одновременно выявилась сложность модернизации информационных систем в условиях разрыва информационных связей между системами автоматизации различных ведомств и технологическая их несовместимость при острой необходимости совместного использования данных. В условиях разнородности технических и программных платформ, несогласованной политики и несовместимости технических решений по разграничению доступа к данным на внутриведомственном, а часто и на межрегиональном уровне реализация межведомственного доступа к разнородным базам данных ведомств в реальном масштабе времени оказалась практически неосуществимой задачей. В то же время интеграционные решения отдельных регионов пришли в полное противоречие с новыми требованиями законодательства.

В настоящее время в большинстве федеральных ведомств начата работа по серьезной модернизации своих информационных систем и хранилищ данных. Эта работа ведется с учетом перераспределения функций и полномочий ведомств, изменения нормативной базы, необходимости межведомственного и международного взаимодействия, а также требований по взаимодействию каждого ведомства с гражданами и организациями. Наряду с работой по модернизации ведомственных сетей передачи данных, она ведется каждым ведомством в трех основных направлениях:

- (1) интеграция данных на региональном и федеральном уровне;
- (2) разработка и внедрение технических и программных средств защиты информации от НСД и систем управления доступом пользователей к информационным хранилищам;
- (3) разработка и внедрение унифицированных прикладных систем для всех уровней объектов управления с возможностью программного доступа к информационным хранилищам как своего, так и других ведомств (решение задач интероперабельности приложений и обеспечения регламентов информационного взаимодействия).

Вопросам реализации задач интероперабельности приложений и управления доступом пользователей к хранилищам информации посвящена данная статья.

Современные теоретические подходы, практические методы интеграции неоднородных ИР и даже стандарты интероперабельности в настоящее время широко известны [2–4]. Все они так или иначе опираются на идеологию создания промежуточного слоя прикладного ПО, которое берет на себя функции нивелирования технических решений разных автоматизированных систем путем реализации новых и поддержки некоторых старых API-интерфейсов (Application Programming Interface — интерфейс прикладного программирования).

Термин «промежуточный слой», используемый в настоящей статье, функционально более насыщен, чем традиционно используемые виды промежуточного слоя, как например CORBA (Common Object Request Broker Architecture — архитектура посредника объектного запроса), Web Services (веб-сервисы), SOA (Service-Oriented Architecture — сервисно-ориентированная архитектура), Message-oriented middleware (промежуточный слой ПО, ориентированный на сообщение) и пр. Так, наряду со средствами обеспечения технической интероперабельности, в предлагаемом промежуточном слое реализуются средства интегрированного доступа к разнородным информационным системам и хранилищам данных. При этом заметим, что веб-сервисный вариант промежуточного слоя является естественным выбором при нынешнем уровне технологического развития и что применение этой архитектуры промежуточного слоя решает проблему технической интероперабельности приложений, позволяя ведомству осуществлять планомерную и постепенную модернизацию унаследованных приложений наряду с разработкой новых.

Выделим две значимые цели ведомства, оправдывающие создание промежуточного слоя:

- (1) обеспечение интероперабельности информационных систем на уровне приложений промежуточного слоя при совместной обработке данных о субъектах, событиях и объектах из множества информационных хранилищ, включая комплексные и каскадные запросы сразу к нескольким разнородным информационным системам одного или нескольких ведомств;
- (2) перенаправление всех запросов сотрудников ведомства (и других ведомств) в единую территориально распределенную инфраструктуру аутентификации и управления доступом пользователей взамен ранее используемых прямых обращений к АИС и ИР, реализация необходимых контрольных (в том числе фискальных) функций.

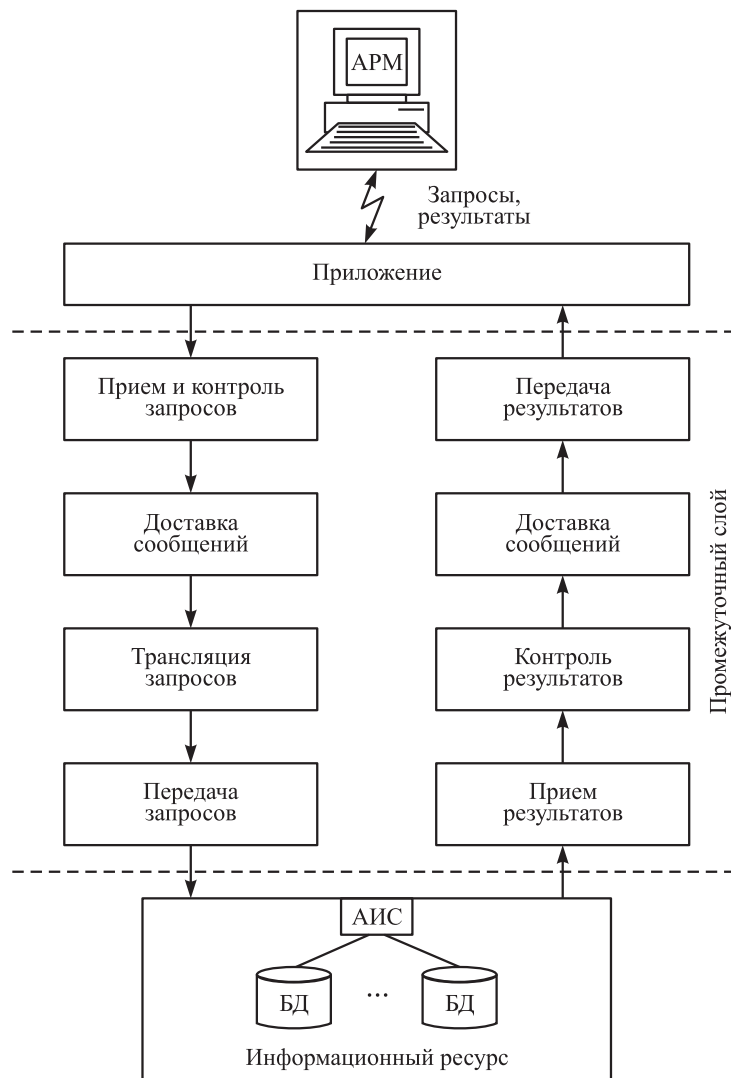


Рис. 1 Типовая последовательность действий по обработке запроса

Основные функции ПО промежуточного слоя:

- поддержка специально для этой цели разработанных детальных API-интерфейсов взаимодействия приложений;
- осуществление в реальном масштабе времени необходимых преобразований семантически однотипных данных, по-разному представленных в структурах хранения интегрируемых систем;
- централизованное управление доступом пользователей к приложениям, контроль взаимодействия приложений между собой с целью обеспечения надежной защиты ИР от НСД.

На рис. 1 показана типовая последовательность действий, выполняемых компонентами промежуточного слоя при обработке заявок приложений на поиск информации в ведомственных ИР.

Все крупнейшие производители технического и программного обеспечения декларируют полноценную реализацию современных стандартов интеграции, но каждый — по-своему. Поэтому декларируемая совместимость промышленного ПО на уровне стандартов на практике вовсе не означает технической совместимости ПО разных производителей. Во всяком случае, в процессе разработки программных средств обеспечения interoperability систем, построенных на разных программных платформах, требуется не только знание многих нюансов реализации стандартов каждым производителем, но порой и знание недокументированных особенностей всех программных платформ.

Создание команды разработчиков, обладающих столь обширными знаниями, трудноосуществимо.

Вынужденное применение метода проб и ошибок приводит к существенным временным задержкам в реализации интеграционных проектов и непредусмотренным дополнительным финансовым издержкам.

Крупные производители промышленного ПО (операционных систем, СУБД, инструментальных средств) оказывают существенную поддержку разработчикам ведомственных федеральных проектов во имя грядущей финансовой выгоды, устраняют выявленные ошибки и дорабатывают свое ПО с учетом опыта его внедрения в крупных ведомствах. В случае же использования в ведомственных проектах свободно распространяемого ПО получить информацию о технических нюансах этого ПО затруднительно, а оказать влияние на скорейшее устранение выявленных ошибок невозможно.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

- (1) модернизация систем информационного обеспечения ведомства должна осуществляться с учетом необходимости взаимодействия с аналогичными системами других ведомств. Обеспечение интероперабельности разнородных систем целесообразно с использованием программно-технической инфраструктуры промежуточного слоя;
- (2) правильный выбор программных платформ, качество проектирования архитектуры и уровень технических решений программного обеспечения промежуточного слоя имеет далеко идущие последствия, поскольку недостатки технического решения выявятся только на этапе последующей модернизации существующих и создания новых информационных систем и баз данных ведомства.

Институт проблем информатики Российской академии наук накопил значительный опыт практической разработки и внедрения средств обеспечения интероперабельности разнородных информационных систем на основе инфраструктуры промежуточного слоя. Этот опыт может быть с успехом использован как для разработки систем информационной интеграции разнородных (в том числе унаследованных) ИР крупных ведомств, так и для обеспечения межведомственного информационного взаимодействия.

В последующих разделах рассмотрены следующие практические аспекты создания и построения инфраструктуры промежуточного слоя крупного ведомства:

- задачи и этапы построения инфраструктуры интероперабельности, назначение и состав метаданных промежуточного слоя, общая схема

фильтрации на уровне запросов и результатов их выполнения при обращении пользователей к разнородным ИР (разд. 2);

- основные типы базовых (технологических) сервисов промежуточного слоя (разд. 3);
- методы организации централизованно управляемого доступа пользователей к ИР на основе ролей (разд. 4).

2 Выбор инфраструктуры промежуточного слоя

2.1 Назначение промежуточного слоя

При выборе принципов построения (модернизации) крупной территориально распределенной ведомственной системы особенно важным является решение по степени централизации хранения и обработки данных. Наиболее эффективной с точки зрения простоты интеграции, экономичности обслуживания и модернизации представляется структура на основе центров обработки данных (ЦОД). Однако принятию решения о полной реконструкции информационной инфраструктуры и объединении множества ИР крупного ведомства в единое хранилище данных препятствует множество объективных факторов:

- сложившаяся в ведомстве распределенная структура сотен региональных отраслевых (интегрированных) и специализированных баз данных, а также тысяч поддерживающих их АИС, десятков тысяч специализированных автоматизированных рабочих мест (АРМ);
- накопленный в течение многих лет опыт и нормативная база формирования и использования ИР ведомства (включая специализированные базы данных);
- обоснованное нежелание департаментов (ведомств) передавать функции ведения своих ИР от собственных подразделений специально созданному подразделению без передачи ответственности за их качество;
- несовершенная и неоднородная по своему качеству сеть передачи данных, не обеспечивающая высокоскоростной доступ всех пользователей к удаленным ИР со своих рабочих мест.

Одномоментное существенное изменение сложившейся ИТ-инфраструктуры ведомства на практике чаще всего оказывается неприемлемым по целому ряду причин:

- значительный риск потери на длительный переходный период необходимого уровня качества существующих разнородных ИР и их доступности;
- замораживание процессов модернизации функций существующих ИР на весь переходный период, что может препятствовать вводу в действие новых регламентов и сервисов электронного правительства;
- необходимость крупных инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, апробирование и внедрение новых систем, переобучение персонала;
- необходимость пересмотра нормативной и правовой базы, сопротивление радикальным изменениям со стороны сотрудников ведомства.

По этим и ряду других причин революционный метод модернизации (одномоментная перестройка ИТ-инфраструктуры, создание абсолютно новых АИС взамен существующих, полное переобучение персонала) неприемлем для крупных ведомств.

Вместо революционных методов модернизации, сулящих в отдаленном будущем значительные экономические выгоды и более высокую степень адаптивности, руководство крупных ведомств осознанно делает выбор в пользу более дорогостоящих методов направленной эволюции ИТ-инфраструктуры и АИС при максимально возможном использовании вложенных инвестиций. Достоинством такого подхода является возможность обеспечения непрерывности функционирования множества действующих АИС, постепенная их модернизация, разработка новых АИС, опирающихся уже на новую инфраструктуру и API-интерфейсы, постепенная реструктуризация баз данных, поэтапное переобучение персонала. Внедрение новых систем может осуществляться поэтапно, с корректировкой выявленных технических и организационных проблем. Например, в период внедрения новой информационной инфраструктуры в одних регионах другие регионы могут пользоваться старыми отработанными решениями. Такую направленную эволюцию ИТ-инфраструктуры и АИС предлагается реализовать на основе концепции промежуточного слоя.

Основная идея создания промежуточного слоя состоит в том, что прямое взаимодействие АРМ (клиентских приложений) с существующими АИС (серверными приложениями) постепенно исключается. На плановой основе осуществляется модернизация унаследованных и разработка новых АИС, которые взаимодействуют с другими приложениями только через API-интерфейсы промежуточного слоя. Взаимодействие же приложений

с пользователями разрешается только с использованием новой централизованной инфраструктуры идентификации и управления правами пользователей. Ядром этой инфраструктуры являются система удостоверяющих центров (СУЦ), Active Directory и база данных пользователей, содержащая для каждого пользователя все его детализированные права доступа к базам данных, управляемых АИС, модернизированными в соответствии с новыми требованиями. На рис. 2 схематично представлено изменение информационных потоков пользователей в связи с созданием промежуточного слоя и постепенной модернизацией существующих клиентских и серверных приложений.

До создания промежуточного слоя (пунктирные линии на рис. 2) каждый сотрудник ведомства, нуждающийся в доступе к нескольким ИР (базам данных территориального, регионального и федерального уровня), вынужден был работать с несколькими АИС, каждая из которых имела свою программную платформу и свой пользовательский интерфейс. Администратор каждой АИС прописывал информацию о пользователе и его правах доступа к информационным объектам ИР в соответствующей административной базе данных. В итоге пользователь получал множество Login (по числу ИР) и множество интерактивных интерфейсов взаимодействия с ИР (по числу типовых АИС).

В новых условиях сотрудник ведомства должен получить техническое средство персональной идентификации и электронное удостоверение, содержащее цифровой сертификат. Права доступа всех пользователей ко всем информационным объектам всех ИР, в соответствии со служебными обязанностями пользователей, сосредоточиваются в единой базе данных прав доступа пользователей (ПДП). В последующем, по мере разработки и внедрения новых типовых АИС, исчезнет необходимость изучения пользователем интерактивных инструментов множества АИС. В конечном итоге каждый пользователь через свой специализированный АРМ (приложение, автоматизирующее процесс выполнения должностных обязанностей) сможет получить единый интерактивный интерфейс доступа и обработки данных, получаемых из множества федеральных, региональных и территориальных ИР.

Создание промежуточного слоя в условиях ранее сложившейся территориально распределенной неоднородной ИТ-инфраструктуры ведомства приводит к необходимости разработки и внедрения новой вспомогательной инфраструктуры — совокупности взаимосвязанных территориально распределенных программно-технических комплексов промежуточного слоя. Комплексы будут размещены в подразделениях и информационных

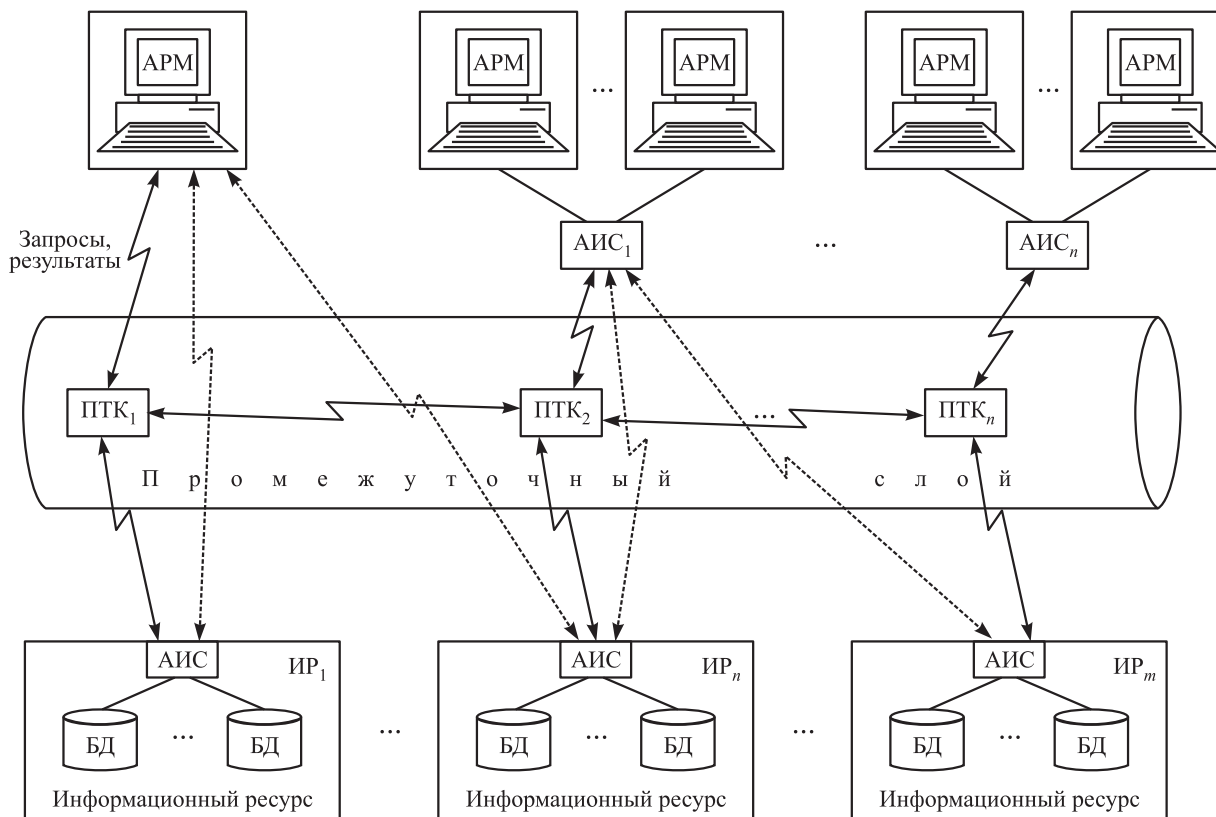


Рис. 2 Изменение информационных потоков (запросов и данных) в результате внедрения промежуточного слоя: АРМ — автоматизированное рабочее место; АИС — автоматизированная информационная система; ПТК — программно-технический комплекс; ИР — информационный ресурс ведомства; БД — база данных в составе информационного ресурса

центрах ведомства. Эти комплексы в последующем станут основой (стержнем) горизонтальной и вертикальной информационной интеграции, модернизации и последующего развития всех АИС ведомства на основе функциональной и программной стандартизации. Программно-техническая среда промежуточного слоя возьмет на себя функции централизованного управления доступом пользователей к хранилищам информации, защиты информации от НСД, эффективного противодействия потенциальным угрозам и конкретным нарушениям информационной безопасности, мониторинга программно-технических комплексов АИС, обновления ПО и некоторые другие важные функции.

2.2 Задачи и этапы разработки компонентов промежуточного слоя

Модернизация ИТ-инфраструктуры ведомства в направлении централизации должна предусматривать модернизацию коммуникационной инфраструктуры [5]. Модернизация цифровых комму-

никаций (транспортной сети ведомства) должна включать как создание соответствующих центров управления транспортной сетью ведомства, так и развитие этой транспортной сети до уровня первичных подразделений, традиционно использовавших открытые сети региональных провайдеров.

Для обеспечения возможности построения надежной системы управления доступом пользователей к хранилищам информации и внедрения ведомственной системы электронного документооборота (СЭД) необходимо создание инфраструктуры удостоверяющих центров, сертифицированной соответствующими уполномоченными государственными учреждениями. Помимо этого, для надежной аутентификации пользователей необходимо тотальное использование средств персональной идентификации.

Фундаментом последующей интеграции неоднородных (представленных в разных моделях) ИР на уровне разнообразных приложений является создание единой информационной модели данных ведомства (на первых порах хотя бы ядра такой единой

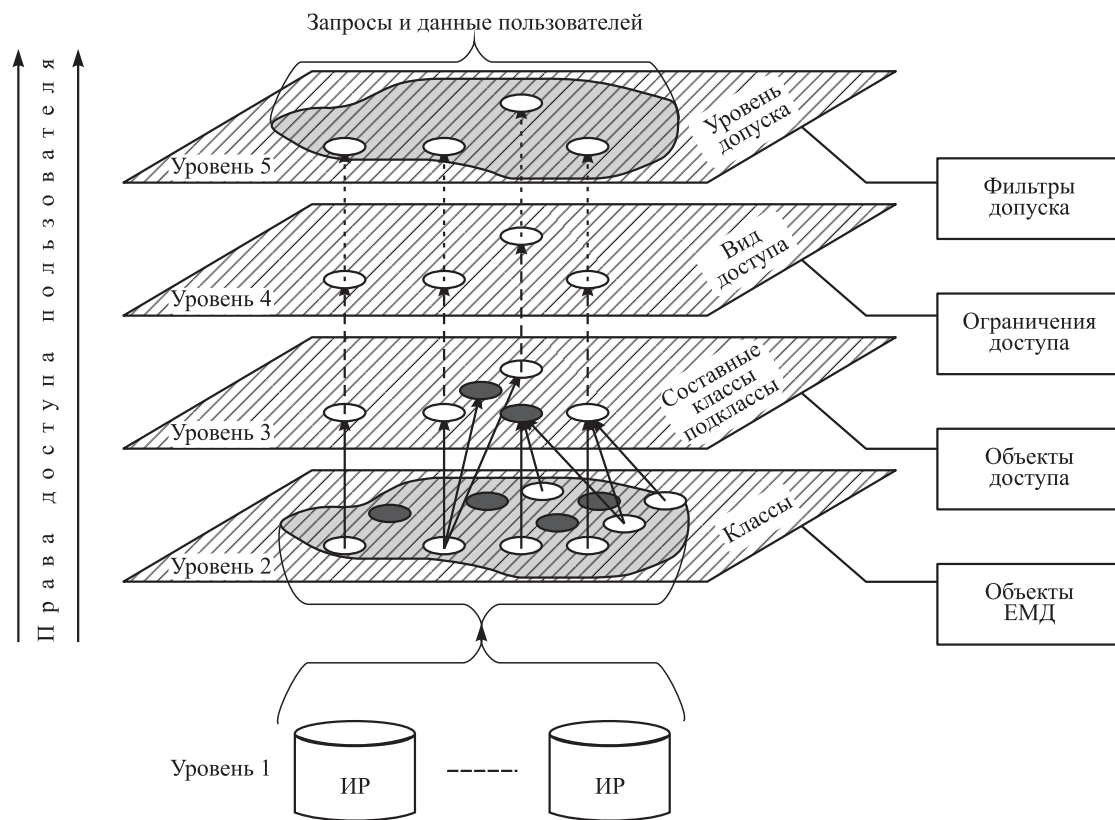


Рис. 3 Схема фильтрации доступа пользователей к запросам, информационным ресурсам, их частям и отдельным полям (группам полей)

модели), а также *единой системы классификации и кодирования информации (ЕСКК)*. Для обеспечения реализации заранее не детерминированных запросов необходима также разработка языковой основы средств манипулирования данными в форме *базовых конструкций языка манипулирования данными (ЯМД)*. Созданию единой модели данных должно сопутствовать создание совокупности отображений этой модели на информационные модели всех унаследованных АИС и их хранилищ данных, а если таковые существуют, то и на модели данных других ведомств, с которыми необходимо осуществлять информационное взаимодействие.

По мере модернизации унаследованных и разработки новых АИС и баз данных координаты приложений, взаимодействующих с инфраструктурой промежуточного слоя, и управляемых ими баз данных должны размещаться в хранилище метаданных — *центральном репозитории (реестре) метаданных (ЦРМ)*, образуя в конечном итоге *информационное хранилище ведомства* — совокупность ИР и собственно ЦРМ. В частности, в ЦРМ ведомства целесообразно хранить единую схему данных или совокупность схем данных всех типов ИР, запросы

к которым будут осуществляться с использованием ПО промежуточного слоя.

Помимо этого, в ЦРМ могут храниться и специфические структуры, отражающие особенности реализации промежуточного слоя ведомства. К специфическим структурам можно отнести представления данных при их визуализации, описания учетных документов и их структуры во взаимосвязи с особенностями политики управления доступом, описания сценариев поиска данных в подмножествах хранилища данных (в ИР и их составных частях — базах данных). Для последующей организации управления доступом пользователей к ИР важно, чтобы в схеме единой модели данных (ЕМД) были выделены классы, подклассы и составные классы, представленные во всей совокупности ИР ведомства, для которых могут быть установлены ограничения доступа (рис. 3)

Разработка корректной полной и всеобъемлющей схемы данных ведомства, переписывание тысяч разнообразных запросов и отчетов — трудоемкая задача, требующая детальной формальной и содержательной проработки, длительного времени и значительного финансирования [6]. Сложность

разработки обусловлена тем, что как в самом ведомстве, так и в смежных по функциям ведомствах помимо сотен отраслевых баз данных федерального и регионального уровня существуют также сотни специализированных АИС федерального, регионального и территориального уровня. И все они имеют собственные модели данных, используют разные языки описания и манипулирования данными, опираются на разные программные платформы.

Обычно информационные хранилища ведомства содержат преимущественно структурированную информацию, и первостепенной утилитарной задачей создания ядра модели данных ведомства и ее отображений на модели данных унаследованных систем является унификация представления семантически эквивалентных объектных типов данных, по-разному представленных в структурах хранения множества разнородных баз данных.

В таких случаях, в особенности на начальных этапах работы по формированию ядра единой модели данных ведомства, целесообразно анализировать лишь те информационные объекты и связи между ними, которые присутствуют хотя бы в двух разнородных ИР и должны совместно обрабатываться. Поскольку каждая модернизируемая или вновь создаваемая АИС (приложение) ведомства формирует возможность доступа к конечному подмножеству баз данных в виде вполне определенного конечного перечня запросов, доступ к базам данных разнородных АИС из множества АРМ также может быть ограничен конечным (пусть и расширяемым) перечнем запросов.

Требования к *системе централизованного управления доступом пользователей* к разнородным ИР должны включать не только требования по обеспечению разрешения (запрета) на доступ к конкретным базам данных этих ИР для каждой категории пользователей, но также ограничения доступа к отдельным информационным разделам и даже отдельным полям этих баз данных. С организационной точки зрения должно быть проведено детальное изучение информационных потребностей основных категорий пользователей. Перечень категорий пользователей может соответствовать существующей структуре управления ведомства (например, управлениям и департаментам). В соответствии с должностными обязанностями и информационными потребностями сотрудников внутри каждой категории пользователей должны быть выделены функциональные *роли*, определяющие права доступа каждой группы пользователей к содержимому каждого из существующих типов ИР.

Интеграция отраслевых и специализированных АИС на уровне приложений имеет целый ряд осо-

бенностей. Задача их интеграции особенно усложняется в тех случаях, когда ведомство опирается на деятельность не только собственных подразделений, но и независимых поставщиков сервисов и услуг. Это характерно для ведомств, ориентированных на предоставление услуг населению (здравоохранение, образование, социальная защита, электронный бизнес). В таких случаях общее число объектов информатизации даже на региональном уровне достигает десятков тысяч, а по стране — сотен тысяч, при этом число технических решений АИС и ИР также исчисляется тысячами. Включение такого числа разнородных объектов в информационное пространство ведомства — нетривиальная техническая и управленческая задача.

Некоторые подходы к интеграции множества разнородных социально-ориентированных ведомственных хранилищ данных и специализированных АИС на основе промежуточного слоя предложены в работах [7–9]. Но эти подходы и методы нацелены на решение лишь части комплекса задач интеграции множества независимых баз данных и АИС.

Кроме того, каждое крупное ведомство имеет уникальную исходную ИТ-инфраструктуру, и надо весьма осторожно относиться к переносу опыта интеграции одних ведомств и регионов на другие ведомства и регионы.

Выводы:

- (1) для крупного ведомства разработка единой информационной модели сводится к разработке описания и единой логической модели данных и реализации расширяемого перечня запросов и отчетов на основе единого языка (или совокупности языков) манипулирования данными;
- (2) в качестве первого шага в решении этой задачи целесообразно создание ядра единой модели (например, в форме базового набора типов объектов и связей между ними) схемы данных и совокупности отображений этой схемы данных на множество схем данных всех унаследованных и проектируемых ИР. Кроме того, необходимо выбрать базовый ЯМД, но на начальных стадиях проектирования и ввода определить совокупность базовых конструкций и ограничений ЯМД;
- (3) разработка требований к централизованной системе управления доступом сводится к выделению основных категорий пользователей и определению ролей доступа к содержимому всех типов ИР внутри каждой категории.

3 Специфика приложений ведомства и состав веб-сервисов промежуточного слоя

3.1 Основные виды приложений

Обычно использование архитектуры, предложенной консорциумом W3C (World Wide Web Consortium) [2], ассоциируется с организацией доступа к ИР на основе порталных решений, а основным инструментом доступа со стороны пользователя представляется «тонкий клиент» (браузер). Портальные решения для поиска данных в базах данных ведомства и предоставления различных сервисов — естественный компонент создаваемой новой ИТ-инфраструктуры и комплекса приложений ведомства. Портальные решения удобны для реализации чисто информационных запросов к информационным хранилищам, а также являются пока что безальтернативным инструментом для предоставления ведомством услуг населению (сервисов). Правда, в отличие от сотрудников ведомства, надежная аутентификация граждан в настоящее время невозможна из-за отсутствия единого национального стандарта средств персональной идентификации граждан (электронных удостоверений) и единой государственной инфраструктуры поддержки электронных подписей (удостоверяющих центров), что ограничивает возможности предоставления гражданам всего комплекса необходимых сервисов со стороны ведомства.

При всей важности обеспечения чисто информационных запросов пользователей к ИР ведомства основной задачей внедрения компьютерных технологий все же является автоматизация непосредственной деятельности сотрудников ведомства при решении ими служебных задач. В условиях поэтапного внедрения в рамках ведомства единой схемы данных и единой системы классификации и кодирования информации (совокупности кодификаторов и справочников) необходимо реализовать как контур доступа к ИР через промежуточный слой, так и контур формирования и обновления этих ИР.

Значительная часть решаемых задач требует использования специализированных устройств и программных инструментов, что исключает применение «тонкого клиента» для этих целей. Во многих случаях к отдельным типам приложений предъявляются жесткие требования в части реактивности.

Это характерно для приложений, автоматизирующих процесс предоставления сотрудникам ведомства или населению жестко регламентированных

услуг. Для повышения реактивности таких приложений широко используются локальные классификаторы и внутренние базы данных приложений, представление которых в единой схеме данных ведомства нецелесообразно.

Существуют также приложения, использующие специфические форматы данных и специализированные драйверы (например, при работе с устройствами обработки биометрической информации, лабораторным оборудованием и т. п.).

В связи с этим многие специализированные АИС территориальных подразделений ведомства целесообразно реализовывать в виде клиент-серверных решений, причем основная часть необходимой информации, включая все необходимые классификаторы, должна располагаться непосредственно на серверах локальной сети подразделения. Получение же информации из других (внешних) баз данных должно осуществляться через промежуточный слой в интерактивном или пакетном режиме с использованием программных интерфейсов и базы данных запросов при обеспечении надежной аутентификации и идентификации как пользователей запросов, так и собственно приложений.

Практически в любом ведомстве существует класс задач, для решения которых удобно использовать не интерактивный, а пакетный (отложенный) режим обработки запросов к базам данных. Отложенный режим характерен для решения большинства задач электронного документооборота и значительной части задач по формированию ИР (ввод новых данных), обновления всевозможных классификаторов, формирования и получения различных справок и отчетов, при выполнении запросов, допускающих получение информации из базы данных в течение нескольких часов или минут, а не секунд. Пакетный режим обработки предпочтителен (вне зависимости от типа запросов) в случае использования коммутируемых и низкоскоростных линий связи.

С учетом вышесказанного технические решения промежуточного слоя должны обеспечить доступ к базам данных со стороны систем автоматизации подразделений ведомства на уровне программных интерфейсов, включая поддержку интерфейсов обращения к АИС как в режиме реального времени, так и с использованием технологий электронной почты.

3.2 Базовые веб-сервисы промежуточного слоя

После развертывания программно-технической инфраструктуры промежуточного слоя и модернизации унаследованных АИС новая ИТ-инфра-

Таблица 1 Пример набора технологических сервисов промежуточного слоя

Сервисы манипулирования данными (для компонентов АИС, взаимодействующих с базами данных ИР)	Сервисы доступа к базам данных промежуточного слоя (для компонентов АИС, взаимодействующих с промежуточным слоем)	Административные сервисы (для административных компонентов промежуточного слоя)
Реализация запросов к ИР	Доступ к схемам данных ИР и классификаторам	Корректировка ЕМД, ЕСКК, ЦРМ
Обновление данных в базах данных ИР	Доступ к описаниям типовых запросов	Корректировка баз данных управления доступом пользователей
Обмен информационными массивами (загрузка/выгрузка)	Получение прав доступа к ИР для текущего пользователя	Корректировка прав доступа административного персонала

структура ведомства может быть представлена как совокупность приложений, реализующих заданные прикладные функции с использованием новых API-интерфейсов и удовлетворяющих требованиям информационной безопасности ведомства. Между приложениями и промежуточным слоем определяются стандартизированные интерфейсы, реализуемые в форме веб-сервисов. Для определения состава этих веб-сервисов исходными данными являются решения по архитектуре и структуре промежуточного слоя, а также требования ведомства к основным функциям промежуточного слоя.

Поскольку в основу интероперабельности разнородных АИС положена сервис-ориентированная архитектура, все взаимодействие приложений специализированных АРМ различного назначения с АИС осуществляется не напрямую, а исключительно через специальную инфраструктуру промежуточного слоя.

Детальный анализ требований по взаимодействию со стороны приложений ведомства позволяет сформулировать перечень веб-сервисов промежуточного слоя. Для каждого ведомства перечень этих сервисов может различаться. Однако можно выделить перечень сервисов, которые должны быть реализованы в любом случае, поскольку они носят не содержательный, а технологический характер. Пример такого набора технологических сервисов приведен в табл. 1.

Взаимодействие узлов промежуточного слоя с АРМ/АИС заключается в приеме информации (запросов и данных для обновления БД) от АРМ/АИС и в передаче им результатов исполнения запросов и информации о ходе обработки запросов и обновления данных в базах данных. Реализация указан-

ных видов взаимодействия выполняется с помощью интерактивных и пакетных сервисов (сервисы взаимодействия с АРМ/АИС по обработке запросов и сервисы взаимодействия с АРМ/АИС по вводу данных с целью обновления ИР).

К основным способам хранения документов, описаний метаданных и приложений в ведомственных информационных системах можно отнести:

- документы на языках HTML¹, XML², а также файлы (текстовые, в форматах Word, Excel, PowerPoint, Flash, Acrobat, графические, звуковые и видео файлы, файлы биометрической информации и различные файлы специализированного формата, такие как DICOM³);
- базы данных и процедуры SQL⁴, JAVA-апплеты, скрипты и т. п.

Визуализация данных должна осуществляться приложениями на устройства различного типа:

- мониторы настольных и портативных компьютеров (различной разрешающей способности);
- карманные персональные компьютеры (PDA — Personal Digital Assistant);
- сенсорные мониторы для точек публичного доступа;
- другие устройства, прежде всего различные мобильные (гибридные) устройства, объединяющие в едином корпусе мобильный телефон, сканер, видеокамеру и PDA.

Для каждого типа устройств, принятого на вооружение в ведомстве, необходимо обеспечить представление информации в необходимом формате и размере. При этом часто возникает проблема визуализации одного и того же документа в

¹HyperText Markup Language — язык разметки гипертекста.

²EXtensible Markup Language — расширяемый язык разметки.

³Digital Imaging and COmmunications in Medicine — индустриальный стандарт создания, хранения, передачи и визуализации медицинских изображений и документов обследованных пациентов.

⁴Structured Query Language — язык структурированных запросов.

различных форматах, необходимость хранения нескольких экземпляров одного и того же документа и даже реализация нескольких комплектов одних и тех же запросов для различных типов устройств.

Выводы:

- (1) перечень веб-сервисов промежуточного слоя специфичен для каждого ведомства, поскольку должен учитывать особенности предметной области и технологий представления и обработки данных. Представление данных как в информационных хранилищах, так и на оконечных устройствах пользователей для некоторых ведомств могут иметь значительную специфику;
- (2) можно выделить совокупность веб-сервисов, не связанных со спецификой предметной области. Это сервисы, реализующие технологические функции, связанные с аутентификацией и определением ПДП, поиском и обновлением данных, доступа к метаданным и классификаторам. В отдельный блок можно выделить сервисы доступа к административным базам данных и сервисы, необходимые для прикладного уровня управления функционированием.

4 Доступ пользователей к информационным ресурсам и управление доступом на основе ролей

Методы и технологии реализации централизованного доступа пользователей к разнородным базам данных ведомства могут различаться. Значительное влияние на технологии реализации оказывает выбор базовой программной платформы промежуточного слоя, а также программные платформы ключевых унаследованных АИС ведомства. Ниже описываются основные структуры хранения и методы реализации системы управления доступом пользователей к разнородным АИС ведомства, реализованные в рамках нескольких научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в ИПИ РАН.

Основными структурами хранения информации о пользователях различных приложений ведомства являются следующие:

- база данных цифровых сертификатов (открытых и закрытых ключей и их владельцев) — хранится только в центрах регистрации, не доступных для программного доступа со стороны любых приложений на сетевом уровне;

- базы данных действующих и отозванных цифровых сертификатов (открытых ключей) сотрудников ведомства, доступные приложениям, но не включающие информации о владельцах, — хранятся в центрах сертификации;
- единая система каталогов пользователей (учетные записи всех пользователей);
- база данных прав доступа всех категорий пользователей, включая все категории обслуживающего персонала;
- база данных пользователей и принадлежность этих пользователей к категориям доступа.

Важной вспомогательной структурой, используемой при управлении доступом пользователей к ИР, является база данных перечня типовых запросов (ПТЗ).

Если первые три структуры хранения информации о пользователях обязаны присутствовать в составе ИТ-инфраструктуры ведомства независимо от необходимости создания централизованной системы управления доступом пользователей к множеству ИР, то две последние структуры хранения необходимы именно для реализации централизованного управления доступом пользователей к базам данных разнородных ИР и электронного документооборота. Все вышеперечисленные административные базы данных должны быть корректны и увязаны между собой, что является одной из важных задач обслуживающего персонала. На рис. 4 приведена упрощенная схема информационного взаимодействия приложения АРМ пользователя с базами данных Active Directory (осуществляется системными средствами операционной системы) и ПДП к выполнению конкретного запроса или доступа к конкретному ИР (осуществляется с использованием веб-сервиса системы управления доступом). В качестве персонального средства идентификации (ПСИ) могут использоваться любые съемные носители (магнитные карты, дискеты, флеш-носители).

Остановимся несколько подробнее на специфике этих структур хранения информации о пользователях.

Система удостоверяющих центров реализуется как совокупность комплекса программно-технических средств центров регистрации и центров сертификации, а также организационно-технических мероприятий, необходимых для использования криптографических функций в целях защиты информации от НСД, аутентификации пользователей единого информационного пространства и

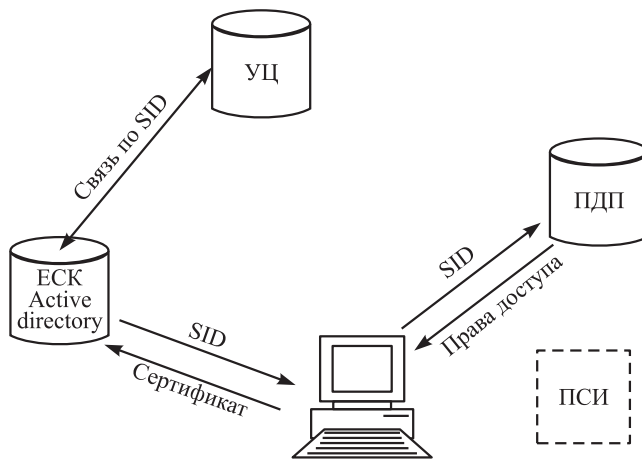


Рис. 4 Упрощенная схема взаимодействия приложения с базами данных ЕСК, УЦ и ПДП: ЕСК — Единая система каталогов, содержит учетные записи пользователей; УЦ — удостоверяющий центр, содержит сертификаты (электронные подписи) пользователей; ПДП — права доступа пользователей; ПСИ — персональное средство идентификации, съемный носитель, содержащий сертификат пользователя; SID (Security IDentifier) — идентификатор безопасности

разграничения их прав доступа, подтверждения авторства и обеспечения целостности и подлинности электронных документов.

Корневой удостоверяющий центр является вершиной древовидной структуры иерархии доверия в СУЦ и является вышестоящим по отношению к подчиненным УЦ. Подчиненные УЦ ведомства целесообразно располагать в информационных центрах ведомства, например в субъектах федерации. Основной задачей УЦ является выпуск сертификатов открытого ключа для пользователей ведомства. Выпуск сертификатов, все действия по управлению сертификатами на основании заявок, публикация сертификатов пользователей и списка отозванных сертификатов УЦ осуществляются в автоматизированном режиме. Система удостоверяющих центров ведомства может взаимодействовать с СУЦ других органов государственной власти.

Единая система каталогов пользователей ЕСК (LDAP¹ или Active Directory) — общепринятая для всех программных платформ основа идентификации пользователей на прикладном уровне. Детальный анализ назначения, функций и методов проектирования и использования ЕСК в ведомственных системах выходит за рамки данной публикации. Здесь важно только отметить, что учетные записи пользователей должны содержать как минимум системные идентификаторы безопасности (SID) всех пользователей, а также поля для связи с базой данных пользователей.

База данных ПДП является основой управления доступом пользователей на всех уровнях об-

работки запросов (приложение → промежуточный слой → АИС). Для каждого пользователя в базе данных ПДП определяется персональная запись, связанная с его учетной записью в ЕСК, и следующие, связанные с учетной записью пользователя, данные:

- перечень выданных пользователю разрешений на доступ;
- перечень типовых ролей, в которые включен пользователь.

Также в базе данных ПДП хранится информация о типовых ролях пользователей и информация об иерархии типовых ролей.

Типовые запросы. Каждый типовой запрос описывает определенный класс реальных (исполняемых) запросов, которые могут различаться значениями поисковых параметров, составом возвращаемых полей данных или составом поисковых фильтров. Для описания такого класса запросов предназначен шаблон запроса — формальное XML-описание, специфицирующее общую структуру типового запроса, его семантику, а также все возможные вариации запроса. Простейшим приемом поддержки варьируемых структурных элементов типового запроса может быть их описание с помощью текстовых подстановок, включаемых в шаблон запроса. Неважрируемые (фиксированные) структурные элементы типового запроса всегда должны описываться в терминах единой модели данных. Описание запроса в терминах единой модели является универсальным и не зависит от спе-

¹Lightweight Directory Access Protocol — облегченный протокол доступа к каталогам.

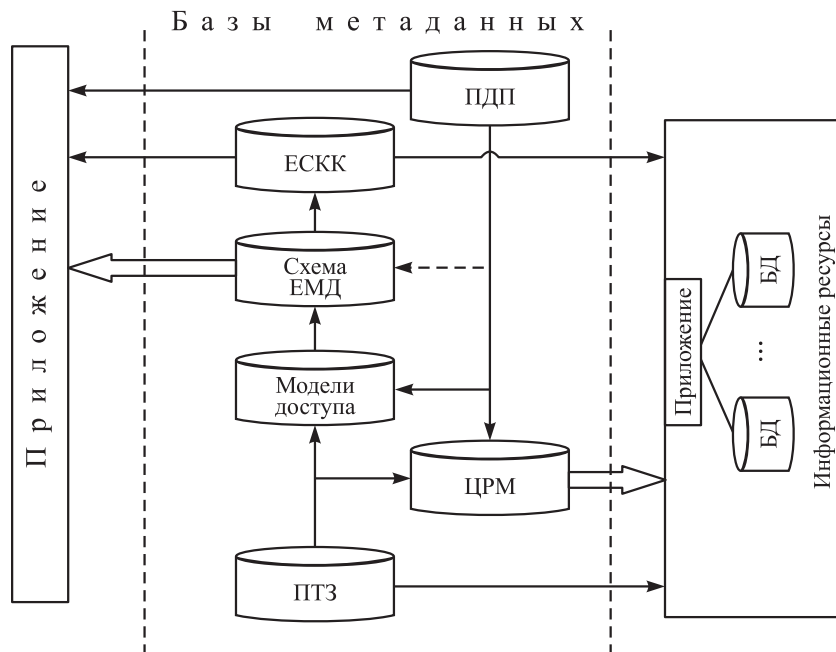


Рис. 5 Базы метаданных, используемые для управления доступом и обработки запросов: ПДП — права доступа пользователей; ЕСКК — единая система классификации и кодирования; ЕМД — единая модель данных; ЦРМ — центральный репозиторий метаданных; ПТЗ — перечень типовых запросов

цифики реализации различных приложений, которые исполняют запрос. Рассмотрим эту технологию несколько подробнее.

Шаблон запроса описывает целый класс реальных (исполняемых) запросов, поэтому каждый раз при формировании реального запроса необходимо конкретизировать его структуру и параметры. Для этой цели служит макет запроса, представляющий собой XML-описание структуры и параметров исполняемого запроса. Подготовка макета запроса является задачей приложения, инициирующего поисковый запрос. Макет запроса может рассматриваться как формальная спецификация поискового запроса, предназначенного для исполнения в АИС.

Каждый типовой запрос связывается с множеством ИР, где он может быть исполнен. При конструировании и связывании типового запроса с конкретными приложениями и базами данных выражения в шаблоне запроса переписываются из терминов единой схемы данных в термины схемы данных ИР (отображение шаблона запроса на ИР).

Перед исполнением типового запроса в приложении, осуществляющем доступ к базам данных ИР, всегда выполняется трансляция запроса. Процесс трансляции осуществляется автоматически средствами ПО промежуточного слоя перед передачей его на исполнение в приложение. Результатом трансляции служит текст запроса в терминах

схемы базы данных ИР, готовый к подаче на вход конкретного приложения. Результаты исполнения любого типового запроса представляются в XML-формате в терминах единой схемы данных. Для каждого типового запроса задается схема данных, описывающая формат представления результатов.

Каждый типовой запрос связывается с одной или несколькими группами доступа. На основании этих связей вычисляются права доступа конкретного пользователя к типовому запросу. Фильтрация информации с учетом прав доступа конкретного пользователя согласно его роли может осуществляться как на уровне приложений, так и на уровне компонентов промежуточного слоя. Типовые запросы могут связываться также с типовыми ролями с целью блокирования возможности отдельных групп пользователей обращаться к базам данных ИР с определенными запросами. На рис. 5 схематично представлен состав баз метаданных, используемых компонентами промежуточного слоя при реализации сервисов обработки запросов и управления доступом.

Завершая описание предложенной модели групповых политик пользователей по доступу к ИР ведомства, можно сформулировать основные уровни ограничения (или наоборот разрешения) доступа групп пользователей к структурам данных и операциям. Методически представляется целесо-

образным выделить два уровня управления доступом пользователей — уровень запросов и уровень данных.

Уровень запросов:

- доступ к запросам на обновление баз данных (индивидуально для каждого ИР);
- доступ к запросам на поиск в конкретных базах данных однотипных (например, типовых территориальных) ИР и разнородных ИР с семантически однородными данными.

Уровень данных (для всех запросов):

- доступ к отдельным ИР и группам ИР;
- доступ к отдельным базам данных (разделам ИР) и отдельным учетным документам;
- доступ к отдельным полям ИР (в терминах единой схемы данных) для всех запросов.

Помимо вышеперечисленных, в рамках ведомства могут существовать и дополнительные требования к групповым политикам. Прежде всего, могут накладываться ограничения по возможности использования различных масок и логических функций в поисковых полях запросов, а также ограничения по числу релевантных объектов, предоставляемых пользователю в качестве результата. Особое значение такие требования могут иметь в целях выполнения законодательных ограничений на доступ к персональным данным, а также предотвращения несанкционированного копирования данных из баз данных ведомства. Могут быть сформулированы требования к фильтрации результатов запросов к совокупности ИР (например, с целью устранения дублирующей информации), реализации каскадных запросов (результаты выполнения одного запроса являются параметрами последующих запросов). Поскольку обычно новые законодательные, межведомственные и внутриведомственные требования на начальном этапе не подкреплены правоприменительной практикой, необходимо поэтапное уточнение требований на примере решения конкретных прикладных задач.

По мере наработки успешных технических решений реализации этих дополнительных требований в рамках конкретных АИС, методы и алгоритмы решений могут быть обобщены и представлены в промежуточном слое. Например, могут быть реализованы дополнительные препроцессоры запросов или постпроцессоры обработки результатов запросов. Обращения же к соответствующим дополнительным функциям промежуточного слоя будут оформлены в виде веб-сервисов.

Выводы:

- (1) практический опыт реализации системы управления доступом пользователей к разнородным базам данных на основе единой схемы данных и технологий веб-сервисов доказал возможность интеграции на прикладном уровне разнородных унаследованных АИС, построенных на различных программных платформах. При этом трудоемкость модернизации унаследованных АИС составляла не более 5% трудоемкости проектирования новых АИС, удовлетворяющих требованиям ведомства к интеграции данных и обеспечению информационной безопасности;
- (2) структурной основой хранения информации о пользователях (сотрудников данного ведомства и других ведомств) и их правах доступа к ИР ведомства являются:
 - СУЦ;
 - единая система каталогов пользователей;
 - база данных ПДП (групповых ролей);
 - база данных пользователей;
- (3) в рамках описанного технического решения групповые политики доступа пользователей к АИС и базам данных ИР ведомства осуществляются на следующих уровнях:
 - уровень перечня ИР;
 - уровень отдельных баз данных (разделов) каждого ИР;
 - уровень отдельных полей единой схемы данных;
 - уровень возможности взаимодействия с конкретными АИС и доступности запросов к базам данных ИР;
- (4) для упрощения процесса проектирования системы запросов в терминах единой схемы данных с использованием базового подмножества ЯМД реализованы методы шаблона запроса и подстановок. Эти методы обеспечивают единообразную интерпретацию компонентами промежуточного слоя запросов к множеству АИС на основе единой схемы данных и компактного подмножества конструкций единого ЯМД, интерпретируемого всеми АИС. С другой стороны, эти методы позволяют дополнять базовые конструкции ЯМД произвольными языковыми конструкциями, в том числе конструкциями ЯМД конкретных СУБД, используемых при разработке АИС.

5 Заключение

Модернизация систем информационного обеспечения ведомства должна осуществляться с учетом необходимости взаимодействия с аналогичными системами других ведомств. Интероперабельность разнородных систем можно обеспечить при использовании инфраструктуры промежуточного слоя. Инфраструктура промежуточного слоя решает следующие задачи:

- (1) обеспечение интероперабельности информационных систем на уровне приложений промежуточного слоя при совместной обработке данных из множества информационных хранилищ, включая комплексные и каскадные запросы сразу к нескольким разнородным информационным системам;
- (2) перенаправление всех запросов сотрудников ведомства (и других ведомств) в единую территориально распределенную инфраструктуру аутентификации и управления доступом пользователей взамен ранее используемых прямых обращений к АИС и ИР.

Создание промежуточного слоя в условиях ранее сложившейся территориально распределенной неоднородной ИТ-инфраструктуры ведомства сводится к разработке и внедрению совокупности взаимосвязанных территориально распределенных программно-технических комплексов промежуточного слоя. Эти комплексы служат основой (стержнем) горизонтальной и вертикальной информационной интеграции, модернизации и последующего развития всех АИС ведомства на основе функциональной и программной стандартизации. Программно-техническая среда промежуточного слоя берет на себя функции централизованного управления доступом пользователей к хранилищам информации и обеспечения информационной безопасности.

Разработка единой информационной модели ведомства сводится к разработке единой схемы данных и реализации расширяемого перечня запросов и отчетов на основе единого языка (или совокупности языков) манипулирования данными. В качестве первого шага в решении этой задачи целесообразно создание ядра единой схемы данных и определение совокупности базовых конструкций и ограничений выбранного языка манипулирования данными.

Перечень веб-сервисов ПО промежуточного слоя специфичен для каждого ведомства, однако можно выделить совокупность веб-сервисов, не связанных со спецификой предметной области. Это

сервисы, связанные с аутентификацией и определением прав доступа пользователей, поиском и обновлением данных, доступом к метаданным и классификаторам, доступом к административным базам данных, и сервисы, необходимые для прикладного уровня управления функционированием.

Разработка требований к централизованной системе управления доступом сводится к выделению основных категорий пользователей и определению ролей доступа к ИР внутри каждой категории. Структурной основой хранения информации о пользователях (сотрудниках данного ведомства и других ведомств) и их правах доступа к ИР ведомства являются:

- СУЦ;
- единая система каталогов пользователей;
- база данных ПДП (групповых ролей);
- база данных пользователей.

Для упрощения процесса проектирования системы запросов в терминах единой схемы данных с использованием базового подмножества ЯМД целесообразно использовать шаблоны запросов и подстановок.

Технические решения, изложенные в данной публикации, прошли практическую апробацию [7–9]. При этом осуществлялась модернизация унаследованных АИС, разработанных с использованием различных инструментальных средств и функционирующих на комплексах различной технической и программной архитектуры (3 семейства операционных систем, 4 семейства СУБД).

Литература

1. Анализ развития и использования информационно-коммуникационных технологий в регионах России: Аналитический доклад / Под ред. Ю. Е. Хохлова. — М.: Институт развития информационного общества, 2008. 240 с.
2. Web Services Activity, W3C. <http://www.w3.org/2002/ws/>.
3. Захаров В. Н., Калинин Л. А., Соколов И. А., Ступников С. А. Конструирование канонических информационных моделей для интегрированных информационных систем // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 2. С. 15–38.
4. Босов А. В. Порталы в системах органов государственной власти // Информатика и её применения, 2008. Т. 2. Вып. 1. С. 44–54.
5. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Кондрашев В. А. Об одном подходе к выбору системотехнических решений построения информационно-телекоммуникаци-

- онных систем // Системы и средства информатики, 2006. Вып. 16. С. 66–71.
6. Брюхов Д. О., Вовченко А. Е., Захаров В. Н., Желенкова О. П., Калинин Л. А., Мартынов Д. О., Скворцов Н. А., Ступников С. А. Архитектура промежуточного слоя предметных посредников для решения задач над множеством интегрируемых неоднородных распределенных информационных ресурсов в гибридной грид-инфраструктуре виртуальных обсерваторий // Информатика и её применения, 2008. Т. 2. Вып. 1. С. 2–34.
 7. Поляков С. В., Костомарова Л. Г., Шаренская Т. Н., Илюшин Г. Я. Корпоративная автоматизированная система здравоохранения города Москвы (КАИС «Мосгорздрав») // Информационное общество, 2008. № 1. С. 20–25.
 8. Илюшин Г. Я. Информационная архитектура региональных проектов здравоохранения на примере проекта «Удаленная регистрация» // Информационное общество, 2008. № 1. С. 31–40.
 9. Соколов И. А., Зацаринный А. А., Захаров В. Н., Илюшин Г. Я., Кузьмин А. П., Цыганков В. С. Основные системотехнические решения по построению ЕИТКС ОВД // Системы и средства информатики. Спец. вып. Научно-технические вопросы построения и развития информационно-телекоммуникационной системы органов внутренних дел. — М.: ИПИ РАН, 2009. С. 11–33.

НЕФТЬ КАК НОСИТЕЛЬ ИНФОРМАЦИИ О СВОЕМ ПРОИСХОЖДЕНИИ, СТРУКТУРЕ И ЭВОЛЮЦИИ

Р. Б. Сейфуль-Мулюков¹

Аннотация: Статья посвящена одному из аспектов применения законов информатики при исследовании сложных природных систем. Нефть как сложную систему можно рассматривать в качестве носителя информации, необходимой для оценки гипотез ее происхождения. Этой информацией является элементный и углеводородный состав нефти, распространение по площади, разрезу и в разновозрастных комплексах осадочного чехла. Носителем информации в нефти служат атомы углерода и водорода, определяющие химические связи и способности формировать углеводородные последовательности. Показано, что объем информации в исходном веществе и самой нефти позволяет оценить и сравнить существующие модели ее происхождения.

Ключевые слова: нефть; происхождение нефти; нефть как носитель информации; нефть как сложная система; оценка объема информации; объем информации нефти

1 Введение

Наряду со многими удивительными свойствами и характеристиками нефть обладает уникальной особенностью — ее исходное вещество, состав, условия залегания и происхождение можно трактовать с самых разных, нередко диаметрально противоположных точек зрения, и все они выглядят весьма обоснованными. Наглядно это можно видеть на примере гипотез о происхождении нефти.

Вначале появились две противоположные гипотезы, причем обе были высказаны априори как догадки, поскольку геологическая, геохимическая и физическая доказательные базы в то время только закладывались.

Согласно первой, органической, гипотезе нефть образовалась из органических остатков бактерий, животных и растений, т. е. является детищем биосферы. Эта гипотеза активно поддерживается большинством геохимиков-нефтяников, несмотря на то, что ее единственным аргументом служат результаты изучения геохимии незначительной (не более первых процентов) составляющей осадочных пород, керогена.

Согласно неорганической гипотезе нефть имеет абиогенное, глубинное происхождение. Представления об абиогенном происхождении нефти получили доказательства в связи с установлением углеводородной дегазации Земли, наличием клатратов и газогидратов. Эти явления и их масштабы на Земле в целом описаны в работах [1–4].

Анализ альтернативных гипотез показывает, что понятия, принципы и законы информатики прак-

тически не используются в исследованиях природы нефти. Законы информатики о сложной системе и ее развитии, единице информации (бите), которой можно выразить любое физическое вещество, информационная энтропия и ее изменения, наконец, понятие носитель информации и формы его существования и выражения практически не рассматриваются в приложении к изучению нефти.

Вместе с тем химический и элементный состав нефти, ее физические свойства и их воплощение в геологических условиях залегания нефти определяют ее как сложную систему [5]. Поэтому законы информатики как средство их познания применимы к изучению проблемы ее генезиса. В статье рассматривается нефть как носитель информации, достаточной для объяснения ее состава, распределения в недрах по агрегатному состоянию и причинно-следственных факторов образования нефти — от исходного до конечного вещества.

2 Информация о первооснове нефти

Считается, что носитель информации — это физическое средство выражения абстрактного понятия. Носителями информации являются камень, дерево, папирус, бумага, холст, флэш-память, диск, другие физические материалы и нефть. В первооснове носителем информации является атом, а точнее — электроны его орбиталей и элементарные частицы ядра. Биологическим аналогом является

¹Институт проблем информатики Российской академии наук, rust@ipiran.ru

ген, в котором заложена вся информация о живом организме.

Изучение проблем нефти с позиций информатики диктует необходимость выделения ее первоосновы в каждой из двух гипотез происхождения нефти. У органиков это химически стойкое органическое вещество, а именно липиды (соли жирных кислот), созданное живыми организмами биосферы, у неоргаников — химические вещества и минералы, слагающие недра Земли, взаимодействие которых приводит к образованию углеводородов.

В органической гипотезе носителем информации о нефти является геном живого организма. В неорганической гипотезе первичная информация о нефти как совокупности углеводородных последовательностей формируется на субатомном уровне, отражая особенности взаимодействия атомов углерода и водорода между собой и с другими элементами.

Определим информацию, заложенную в первооснове нефти.

Одной из важнейших является информация об элементном составе. Нефть в среднем на 99,9% состоит из пяти элементов, их усредненный состав: углерода — 85%, водорода — 13%, кислорода — 0,8%, азота — 0,6% и серы — 0,6% [6]. Эта информация определяет термодинамические, геологические и геохимические условия, обеспечившие концентрацию в одном веществе 85% углерода и 13% водорода. Глубинные зоны Земли могут обеспечить условия с такой термодинамикой, геологией и геохимией, а следовательно, и процесс соединения углеводородных последовательностей в нефть.

Органическая гипотеза образования нефти требует обосновать энергию, обеспечившую трансформацию низкоуглеродного вещества живого, соответственно 20% и 8,5% в бактерии и водоросли, в нефть с 85% углерода. Такое обоснование не всегда возможно. Недра многих нефтеносных территорий, особенно платформенных, никогда не погружались на глубины с температурой и давлением, необходимыми для катагенеза органических остатков [7]. Недостаток температуры и давления для катагенеза сторонники органической гипотезы компенсируют временем низкотемпературного катагенеза, увеличивая его на десятки и даже сотни миллионов лет, или миграцией нефти из далеко расположенных зон генерации, в которых такие условия создавались, к зонам аккумуляции. Время, даже если оно исчисляется сотнями миллионов лет, не может компенсировать недостаток энергии (температуры и давления), необходимой для катагенеза исходного вещества. Исходное вещество органической природы за эти миллионы лет в результате обмена

веществом и энергией с окружающей геологической средой, и прежде всего с водой, неизменно теряет свои самые ценные компоненты и утратит нефтеродные свойства.

Углеводородный состав нефти несет информацию о ее генезисе. Углеводороды нефти разделяются на две неравные части. Большая из них, составляющая от 80% до 90%, — это чистые углеводороды, т. е. молекулы, состоящие только из атомов углерода и водорода. Углеводородных соединений в нефти примерно 500, и ни одно из них в чистом виде не встречается ни в одном живом организме и не синтезируется непосредственно ни одним из них. Простейший углеводород метан может быть газообразным продуктом жизнедеятельности либо анаэробного биохимического разложения органических остатков на ранних стадиях их разложения, т. е. образованным из готовых органических материалов. Однако количества образующегося таким образом метана недостаточно для формирования углеводородов нефти, содержащихся в осадочных породах.

Меньшая часть нефти (в среднем 4,5%) представлена гетероциклическими соединениями или гетероциклами. Это углеводородные соединения, часть атомов углерода которых замещена на атомы серы, кислорода или азота в более мягких термодинамических условиях, что создало условия для невалентных, водородных и ковалентных химических связей углеводородов с металлами и неметаллами. Нефть включает примерно 250 сернистых, 85 кислородных и 30 азотных гетероциклов [6]. Гетероциклы имеют прямое отношение к биосфере, особенно азотсодержащие. Их некоторые характеристики важны для понимания генезиса нефти. Например, кероген нефтематеринских пород как основа гипотезы органического происхождения нефти — это в большей части гетероциклы [8, 9]. Как отмечает Пожарский [10], гетероциклы участвуют в строении и во многих жизненно важных процессах живой клетки, выполняя биохимические, биологические или физиологические функции, например такие гетероциклы, как липополисахариды бактерий, витамины и ферменты животных и растений и др.

Особенности гетероциклических углеводородов проявляются на сравнительно небольших глубинах земной коры, термодинамика которых обеспечивает формирование гетероциклов на основе углеводородов и реализацию их реакционной способности.

Таким образом, информация об углеводородном составе нефти дает основание считать, что 90% углеводородов нефти не имеет прямого отношения к биосфере, а 4,5% могут образоваться в термодинамических условиях земной коры, успешно вза-

имодествовать со всеми элементами биосферы, являться частью ее и накапливаться с органическими остатками в осадочных породах.

3 Информация о способности нефти к миграции

Вязкость нефти — это информация о ее миграционных возможностях. Относительная (удельная) вязкость, выражающая отношение абсолютной (динамической) вязкости к вязкости воды, зависит от температуры. Для различной нефти при температуре более 50 °С она превосходит вязкость воды минимум в 1,5 раза. Эта физическая характеристика вместе с фильтрацией — показателем характера движения флюида через породу и свойством самой породы пропускать флюид, называемым проницаемостью, — определяет ее миграционную способность в пористой среде пластов осадочных горных пород.

Нефть всегда эпигенетична и может попасть в залежь только в результате миграции: горизонтальной, вертикальной или их комбинации, которые зависят от характеристик флюида и породы.

Горизонтальная миграция — это движение нефти по порам и пустотам осадочных пород различного размера и формы. При любой их комбинации перемещение флюида может осуществляться только при наличии градиента давления, а поскольку в горизонтально залегающих толщах он практически равен нулю, то в таких толщах флюид как бы стоит, даже если он находится под огромным геостатическим давлением. Лейбензон [11] установил, что даже при значительной разнице начальных и конечных давлений в идеальном грунте происходит значительное падение давления мигрирующего флюида за счет сил адсорбции частицами пористой среды. В реальной среде потери на адсорбцию при горизонтальной миграции превышают возможности даже самых «продуктивных» нефтематеринских свит. Многие исследователи считают, что нефть не способна к далекой горизонтальной миграции в толщах осадочных пород, поэтому она не может служить основным фактором формирования нефтяных залежей.

Для вертикальной миграции газа, жидкости и их смесей в недрах значительно больше возможностей. Эта миграция всегда обуславливается градиентом давления и температуры от среды с большей энергией к среде с меньшей энергией. Вертикальной миграции способствуют ослабленные тектонические зоны, которыми являются активные глубинные разломы, границы крупных фрагментов зем-

ной коры и их частей и каналы, созданные в силу особенностей состава и строения литосферы.

Именно вертикальной миграции газообразных углеводородов глубинной природы и обязаны метан, газогидраты и клатраты. Валяев [1] оценивает объем вертикальной миграции глубинных углеводородов (в основном метана) в $5 \cdot 10^{13}$ г/год или $2,5 \cdot 10^{16}$ т за 500 млн лет, что соответствует времени палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Запасы клатратов оцениваются в $3 \cdot 10^{12}$ т [4], а газогидратов — в $3 \cdot 10^{12}$ т [3]. Эти формы простейшего углеводорода не имеют никакого отношения к биосфере, и их количество в земной коре на порядки превосходит запасы всех жидких и газообразных углеводородов, содержащихся в рассеянном виде в осадочных породах.

4 Информация о месте образования нефти

Информация о нефти — в сочетании ее территориального распространения и постоянного состава. Нефть в промышленных масштабах или в виде проявлений различной интенсивности присутствует в недрах всех континентов, на дне прилегающих к ним акваторий мирового океана, в жерлах вулканов, на дне озера Байкал [12], в гранитах Скандинавии [13], в породах кристаллического фундамента и во многих других местах. К 1996 г. было выделено более 550 нефтегазоносных бассейнов, из которых более 70 — на шельфах морей и океанов. В 226 бассейнах было открыто более 20 000 нефтяных и нефтегазовых месторождений [14], каждое из 50 наиболее крупных из них содержит более 1 млрд т [15]. Общее представление о распространении нефтеносных территорий дают схематические карты, приведенные во многих работах.

Повсеместное распространение нефти дополняется постоянством ее среднего углеводородного состава, независимо от географического места и глубины залегания. Нефть может быть немного легче, немного тяжелее, содержать 0,5% или 2% серы, но это повсюду нефть определенного углеводородного состава. В этом проявляется инвариантность и уникальность нефти как сложной системы [5].

Повсеместность распространения и постоянство состава говорят только об одном — едином, глобальном источнике и едином природном механизме генерации углеводородных последовательностей. Неорганическая гипотеза легко объясняет эту особенность нефти, поскольку глубины, на которых протекают процессы образования углерода и водорода как элементов, и глубины литосферы,

на которых формируются углеводородные последовательности, имеют необходимую энергетику и катализаторы, и эта сфера охватывает весь земной шар.

Органическая гипотеза в объяснении этого феномена вынуждена оперировать осадочными бассейнами прошлых эпох как областями аккумуляции органических веществ в виде остатков бактерий, животных и растений. В геологической ретроспективе области осадконакопления были развиты не повсеместно, разновозрастные бассейны не совпадали в пространстве, а условия, в которые затем попадали осадки, отложенные в любом бассейне и сформированные из них комплексы осадочных пород, в том числе и с остатками органических веществ, очень сильно различались и нередко целиком размывались [7]. Поэтому геологический фактор, в принципе весьма динамичный и очень разный в проявлениях на платформенных и геосинклинальных областях, не объясняет консерватизма состава нефти и повсеместности ее распространения, в том числе и вне пределов развития осадочных пород.

5 Информация о возрасте нефти

Информация о нефти — в комплексах осадочных и магматических пород, от кристаллического фундамента, с возрастом более 1,5 млрд лет, до третичного, не старше 86 млн лет. Этот факт важен для понимания генезиса нефти.

В органической гипотезе возраст нефти и вмещающей породы может быть одинаков. Следовательно, нефть может быть докембрийской, например вендской (старше 650 млн лет), палеозойской, например девонской (не моложе 364 млн лет), или третичной, например майкопской (не моложе 12 млн лет). Признание факта накопления материнского вещества нефти в докембрии или палеозое неизбежно привязывает исходное вещество к биосфере прошлых периодов. Например, биосфера венда была представлена бактериями и многоклеточными, беспозвоночными, безраковинными животными типа медуз и слизняков, относимой к так называемой эдиакарской фауне [16]. Сохранение их остатков в морском осадке, равно как и органических остатков бактерий, а тем более формирование из них керогена, проблематично, хотя бы потому, что эти остатки были частью замкнутых трофических экосистем.

Образование нефти сотни миллионов лет тому назад неизбежно означает стабильный, неизменный элементный и углеводородный ее состав, сохраняющийся сотни миллионов лет. Это против-

речит закону информатики о постоянном развитии и изменении сложных систем и закону о самопроизвольном возрастании энтропии или беспорядка любой сложной системы. Неоднократное изменение геологической структуры, которое испытывала любая нефтеносная территория, также изменяло нефть.

Неорганическая гипотеза в ее существующих вариантах не рассматривает зависимость между образованием нефти и ее возрастом, концентрируясь на физической, химической и термодинамической сторонах процесса образования нефти.

6 Информация об исходном веществе и генезисе нефти

Нефть несет информацию о себе тем, что молекулы углеводородов состоят из атомов углерода и водорода. Поэтому в связи с генезисом нефти, состоящей в основном из этих двух элементов, вопрос — откуда берутся сами атомы, в силу каких физических процессов и химических реакций они соединяются в молекулы углеводородных последовательностей, вполне закономерен. В такой постановке проблема происхождения нефти никогда не ставилась. Косвенно Жармен [17], анализируя каталитические превращения систем С—Н на атомном и молекулярном уровне, практически впервые доказал возможность превращения простейших парафинов в олефины и ароматические углеводороды и наоборот при температурах, не превышающих +1150 °С, в присутствии катализаторов, т. е. в условиях земной коры.

Происхождение атомов углерода и водорода как первоосновы нефти — это один из ключевых вопросов в проблеме ее образования.

Схема появления атомного, а затем формирования молекулярного состояния вещества рассмотрена в публикации Фомина [18]. В этой проблеме он опирался на результаты исследований Штернхаймера о физико-химических характеристиках астеносферы и представлениях Тхоровской [19] и Капустинского [20] о появлении атомов как факте саморазвития материи Земли. Для идей о развитии материи важным явилось представление Амбарцумяна [21], основанное на астрофизических наблюдениях «... развитие материи идет от простого к сложному, от более плотного к менее плотному состоянию». В рассматриваемом контексте плотным является ультрасжатое под давлением 50 ГПа (50 тыс. атм) гомогенное вещество внутренних частей Земли, находящееся ниже уровня 400 км, где проходит верхняя астеносфера. При таком давле-

нии, как считает Фомин, вещество не может быть горячим, а атом не может сохранить свою ядерно-орбитальную конфигурацию.

Переход аномального состояния вещества в «нормальное», как называют эти состояния Фомин, сопровождается выделением огромной тепловой энергии, расплавлением вещества мантии и его декомпрессией. Дегазация Земли, в том числе и углеводородная, появление расплавленной магмы и появление «нормальных» атомов — это и есть последствия декомпрессии.

С этого рубежа атомы проявляют способность формировать химические связи. Появление первых соединений углерода с водородом связано со свойствами атома углерода, обладающего уникальной способностью реализовать свои валентные возможности. Так возникают первые, простейшие, газообразные углеводородные последовательности: CH_4 —метан, C_2H_6 —этан и C_2H_2 —ацетилен.

Жермен [17] показал, что система углерод–водород в присутствии катализаторов испытывает превращения, определяемые заданным соотношением температуры и давления. Углеводород парафинового ряда при высокой температуре может крекироваться до смеси парафинов и олефинов, дегидрогенизироваться до олефинов с тем же числом атомов углерода, дегидроциклизоваться до ароматики либо разложиться на изначальный углерод и водород. В литосфере усложняется состав и структура системы С–Н с формированием углеводородных последовательностей, и эти изменения определяются термодинамикой и катализаторами.

Важно, что все процессы и превращения углеводородных последовательностей происходят не локально, не в изолированных разновозрастных линзах и толщах осадочных пород, а повсеместно, охватывая определенную геосферу Земли, начиная с верхней астеносферы, где зарождаются атомы, до зоны нефтенакпления, отражая общую эволюцию развития вещества планеты. Локализовать точное место образования нефти нельзя, ее образование начинается с момента появления атомов углерода и водорода и заканчивается в залежи. Там же начинается процесс разрушения нефти. Нефть как сложная система не развивается по-другому.

Для сравнения гипотез происхождения и эволюции нефти необходим одинаковый критерий, позволяющий оценить динамическое состояние системы на отдельных этапах ее развития согласно существующим точкам зрения и сравнить динамику этих состояний. Две гипотезы происхождения нефти такого единого, общепризнанного критерия не используют, но такой критерий существует, и это — информационное содержание. Информация содержится в атомах, составляющих молекулы

исходного и промежуточного вещества нефти, а оценка объема информации в атомах не зависит от точек зрения на природу этих веществ.

Великие физики, включая Эйнштейна [22], Шеннона [23], Бриллюэна [24], доказали связь основных категорий мироздания с информацией. Поэтому использование информации для оценки состояния системы и ее динамики во времени и пространстве отражает и основывается на связи между информацией и энергией, информацией и энтропией, информацией и гравитацией, информацией и массой [25]. Рассматривая информационные взаимодействия в системах неживой и живой природы [26], мы основывались на этих положениях, считая, что информация — универсальная категория, позволяющая выразить количество и качество материи, энергии, пространства, времени и движения, вовлеченных в любой процесс или явление.

Использование информации позволяет изменить первооснову системы — атомы и вещество, ими составленное, и проследить динамику изменения информационного содержания вещества на различных этапах его преобразования.

Изменение информационной характеристики сложных систем и материи в целом согласуется и с общими закономерностями развития, установленными Амбарцумяном — развитие материи идет от простого к сложному, от более плотного к менее плотному состоянию. Процесс перехода от простого состояния к более сложному — это процесс увеличения порядка, информации и, соответственно, уменьшения неопределенности и энтропии. Развитие материи от плотного к менее плотному состоянию трудно выразить в процессах образования нефти. Однако можно считать, что источник исходного вещества находится в более плотном состоянии, нежели горные породы земной коры и тем более рыхлый морской осадок, в котором накапливается органическое вещество.

В общем случае, если процесс формирования конечной сложной системы идет с поглощением тепла, то этот процесс происходит с возрастанием ее энтропии, увеличением неопределенности и уменьшением информации в системе. Эндотермический процесс катагенеза керогена как основа образования нефти — это и есть процесс увеличения энтропии системы. Однако процесс образования нефти как сложной системы углеводородных последовательностей означает уменьшение энтропии, увеличение сложности и, соответственно, увеличение объема информации. Поэтому образование нефти с термодинамической точки зрения есть процесс трансформации исходного вещества, находящегося в нагретом состоянии, в ве-

щество более холодное, от материи, находящейся в более плотном состоянии, к веществу менее плотному. Используя объем информации как критерий, можно проследить, как она изменяется по всей цепочке трансформации от исходного вещества до нефти и битума как для органической, так и для неорганической гипотезы. Для расчетов объема информации используем данные об объеме информации в атомах элементов таблицы Менделеева, приведенные в работе [27]. Значения объема информации в атомах пяти элементов, составляющих 99,9% нефти, равны: С — 109,642; Н — 10,422; S — 317,504; N — 138,908 и O — 149,33 бит.

Объем информации в единице массы вещества, например нефти или керогена, складывается из информации атомов каждого элемента в молекулах, составляющих единицу массы. При этом используется брутто-формула вещества либо эмпирическая формула, по которой и рассчитывается количество информации в атомах. Помимо информации в атомах учитывается объем информации в структуре молекулы. В расчетах Гуревича [27] он основан на числе валентных связей атомов, составляющих структуру молекулы.

Объем информации, содержащейся в нефти, может быть рассчитан как сумма каждой из трех основных ее частей: углеводов, гетероциклов и примесей — либо по эмпирической формуле, составленной по процентному содержанию составляющих ее основных элементов.

Углеводородный состав нефти, составляющий 90% ее массы, включает три группы углеводов: парафины (30%–35%), нафтены (25%–75%) и ароматические (10%–15%) [6]. Расчет по брутто-формулам для типичных жидких представителей этих групп: пентана C_5H_{10} , циклогексана C_6H_{12} и бензола C_6H_6 — и для трех азотсодержащих гетероциклов: нейтральных, кислых и основных аминокислот — определяет объем информации в условной молекуле нефти, равный **6171** бит.

Объем информации для легкой и тяжелой нефти рассчитан также и по эмпирической формуле. Учитывалось, что в легкой нефти на 2% меньше С и соответственно больше Н и O, а в тяжелой — на 2% больше С и соответственно меньше Н и O. В качестве примера приведем расчет количества информации, содержащейся в условной молекуле легкой нефти.

Элементный состав легкой нефти в среднем таков: С — 83%, Н — 14%, O — 2%, S — 0,9% и N — 0,1%. Количество атомов каждого элемента, исходя из его процентного содержания и массы, равно: С — $83/12 = 6,9$; Н — 14; O — $2/16 = 0,13$; S — $0,9/32 = 0,03$; N — $0,1/14 = 0,01$. Общее число атомов — $6,9 + 14 + 0,13 + 0,03 +$

$+ 0,01 = 21,07$ атомных единиц массы, а число атомов в эмпирической формуле (условной молекуле) легкой нефти равно: С — 32,7; Н — 66,4; O — 0,6; S — 0,1; N — 0,1, и эмпирическая формула имеет вид $C_{32}H_{66}OSN$.

Соответственно, объем информации составит: С — 3507, Н — 686; O — 149; N — 138,9; S — 317,5. В сумме это 4798 бит плюс 64 бита на структуру условной молекулы, итого **4862** бит.

Элементный состав тяжелой нефти: С — 86%, Н — 12%, O — 0%, S — 0,9% и N — 0,1%.

Аналогичный расчет дает ее эмпирическую формулу $C_{37}H_{62}SN$. Объем информации в условной молекуле тяжелой нефти равен **5228** бит.

Таким образом, разные подсчеты показали небольшую разницу в объеме информации в условной молекуле нефти.

7 Информация об эволюции нефти в земной коре

Первыми углеводородными последовательностями, образующимися на начальных этапах генезиса нефти, являются: CH_4 — метан, C_2H_6 — этан и C_2H_2 — ацетилен. Самый простой и стойкий из них — метан. Информация, содержащаяся в его молекуле, принята за исходную для всех последующих углеводородных последовательностей, а поскольку молекула метана состоит из одного атома углерода и четырех атомов водорода, то это дает **156** бит, включая объем информации, содержащейся в структуре молекулы метана.

Эволюция углеводородных последовательностей от простейших, образующихся в астеносфере, до аккумуляции самой полной последовательности — нефти в зоне нефтенакпления есть процесс усложнения состава и структуры последовательностей. Существует уровень, ниже которого углеводороды могут существовать только в газообразном состоянии, а выше — в газообразном, жидком и твердом. Газообразным углеводородом этого уровня условно принят бутан — C_4H_{10} , молекула которого состоит из четырех атомов углерода и десяти атомов водорода, что соответствует **547** битам информации.

Конечной стадией эволюции углеводородных последовательностей нефти в верхней части земной коры являются битумы битуминозных пород. Битумы — это асфальтово-смолистые вещества, наиболее тяжелые компоненты нефти с наиболее сложной структурой молекул. Их усредненный элементный состав, приведенный в [6], таков: С — 84%, Н — 8%, S — 3%, O — 4% и N — 1%. Соответственно,

в условной единице массы битума содержится: С — 6,91; Н — 8; S — 0,09; N — 0,07; O — 0,25 и в сумме 15,41 атомов, а в атомных процентах: С — 45,4; Н — 51,9; S — 0,6; N — 0,5; O — 1,6. Эмпирическая формула битума — $C_{45}H_{51}OSN$, а объем информации в условной единице массы битума составляет **6365** бит.

Таким образом, динамика изменения информации в единице условной массы от начальных стадий образования углеводородных последовательностей до конечной в виде их совокупности в нефти и, наконец, в битуме битуминозной породы по неорганической схеме выгладит следующим образом:

- на уровне образования первого простейшего углеводорода — **156** бит;
- на уровне существования газообразных углеводородов — **547** бит;
- на уровне главной зоны нефтенакпления (1500–3500 м) полная совокупность углеводородных последовательностей (нефть) — **6171** бит;
- верхний уровень, близкий к поверхности Земли (нефть, лишенная легких компонентов, — битум битуминозной породы) — **6365** бит.

Динамика изменения веществ от исходного до конечного в органической гипотезе выгладит следующим образом. Одной из наиболее полных работ об образовании нефти по этой схеме является монография [8]. Исходя из химического состава биомассы, авторы определили основные компоненты жиров и масел, встречающихся в организмах, которые откладываются как органическое вещество осадочной породы. Для расчета объема информации условной единицы исходного вещества выбраны: триглицерид — $C_{18}H_{20}O_6$, стеариновая $C_{18}H_{36}O_2$ и линоленовая $C_{18}H_{30}O_2$ аминокислоты [8, 28]. Объем их информации соответственно равен 3100, 2670 и 2590, а условная единица массы исходного вещества для образования нефти содержит **8360** бит информации.

В монографии [9] приводится эмпирическая формула керогена, выведенная из соотношения масс его элементов, — $C_{55}H_{40}NSO_3$. Соответственно, объем информации в условной молекуле керогена равен **7369** бит.

Таким образом, динамика изменения объема информации от начальных стадий накопления остатков липидов, созревания керогена в нефтематеринской породе до конечной стадии — нефти и битума битуминозной породы — по органической схеме выгладит следующим образом:

- на уровне биосферы исходное вещество (липид) — **8360** бит;

– на уровнях созревания керогена (глубины 5–15 км) — **7369** бит;

– на уровне главной зоны нефтенакпления (1500–3500 м) как полная совокупность углеводородных последовательностей (нефть) — **6171** бит;

– на верхнем уровне, близком к поверхности Земли (битум битуминозной породы) — **6365** бит.

Таким образом, для сравнения схем генезиса нефти имеется два ряда последовательных значений объема информации, содержащейся в исходном и конечном веществе, отражающих две различные схемы. Подобная оценка более чем нетривиальна. Она произведена на основе современных представлений о роли информации в строении и развитии материи и базируется на массе и заряде атомов или структуре молекулы веществ, определяемых на базе общепринятых химических и физических констант, что позволяет сравнить результаты, полученные для разных схем процесса генезиса, но по одному стандарту измерения.

Полученные показатели объема информации не привязаны к геологическому времени, к глубине или месту с заданными физико-географическими, геологическими и геохимическими параметрами, которые по отношению к нефти и к значениям отдельных стадий преобразования исходного вещества являются переменными величинами и допускают различные интерпретации.

Последовательности объемов информации позволяют сделать следующие выводы.

Абиогенная схема генезиса от образования первых углеводородных последовательностей и дальнейшего усложнения их состава и структуры в литосфере и в земной коре подкрепляется соответствующим изменением объема информации. Ее увеличение соответствует усложнению структуры и состава углеводородных последовательностей от простейших вплоть до нефти и битума во всем вертикальном диапазоне их распространения.

Органическая гипотеза по последовательности изменения объема информации в исходном, промежуточном и конечном веществе не соответствует законам развития материи, требует ответа на некоторые вопросы. Схема объективно отражает последовательное снижение объема информации от исходного вещества до нефти и затем некоторое его увеличение до стадии битума, что трактуется синтез нефти из готовых органических материалов как образование сложной системы, т. е. процесс, протекающий от сложного к простому. В этом процессе вещество от менее разогретого состояния, находящегося под меньшим давлением, переходит в более разогретое состояние под большим давлением.

Однако с точки зрения кинетики процесс перестройки структуры исходного вещества, его декомпозиция, разрушение существующих химических связей и создание нового вещества, в котором существенно увеличивается концентрация углерода, не может быть трансформацией от сложного к простому.

С геохимической точки зрения кероген есть нерастворимая, дебитуминизированная часть органического вещества осадочных пород или остаток существовавшего ранее. Кероген, нефтеродный потенциал которого определяют в настоящее время, а породы, его содержащие, называют нефтематеринскими, — фактически это породы, бывшие нефтематеринскими и уже реализовавшие этот потенциал. Содержащееся в нем органическое вещество и объем его информации есть не отражение этого потенциала, а характеристики метаморфизованных остатков липидов, смешанных с углеводородными последовательностями глубинного происхождения, отложившимися вместе с осадком.

Битум — это смолисто-асфальтовые компоненты нефти, состоящие из сложных по структуре молекул, а нефть по ее углеводородному составу и соотношению углерод–водород не вписывается в схему между исходным и конечным состоянием.

Следовательно, природный процесс:

липид → осадок обогащенный $C_{орг}$ →
→ кероген → микронепть → нефть → битум

с точки зрения закономерностей развития материи, изменения энтропии и информационного содержания не реализуем.

Осадочные толщи с повышенным содержанием углерода и углеводородов развиты глобально и гораздо шире, чем собственно нефть. Толщи, считавшиеся ранее нефтематеринскими, потому что сейчас содержат первые проценты углеводородных веществ, на самом деле таковыми не являлись и не являются. Содержащиеся в них углеводороды, принимаемые за $C_{орг}$, в основном представляют собой смесь органического вещества биосферной природы и углеводородных последовательностей глубинного происхождения, аккумулярованные в осадках одновременно с осадконакоплением.

В условиях термодинамики земной коры эти углеродсодержащие толщи не обладали нефтегенерирующим потенциалом, что показало изучение кернов пород моложе 150 млн лет и содержащегося в них углерода, в том числе $C_{орг}$. Керны были отобраны по программе глубоководного бурения на шельфах и на дне мирового океана. Сошлемся лишь на два отчета [29, 30].

Индексы нефтегенерационного потенциала, соответствующие 10 грациям катагенеза [31], на самом деле отражают степень метаморфизма углеводородных последовательностей, аккумулярованных с осадком. Остатки углеводородных гетероциклов биосферы, захороненные с ними углеводородные последовательности не имеют прямого отношения к нефти, аккумулярованной в залежах и месторождениях главной зоны нефтенакпления.

8 Заключение

Итак, углеводородный и элементный состав нефти показывает абсолютное преобладание в ней углерода, не характерного для живого организма биосферы. Образование нефти в процессе перевода в верхней части земной коры низкоуглеродистого органического вещества в высокоуглеродистую нефть в результате катагенеза керогена в областях с осадочным чехлом относительно небольшой мощности не обеспечено необходимой для этого процесса температурой и давлением. Геологическое время не может быть заменой энергии, необходимой для катагенеза, поскольку изменения внутренней структуры и состава керогена, происходящие в течение требуемого геологического времени (не менее 10 млн лет), независимо от внешних условий среды носят деструктивный, необратимый для керогена характер.

Углеводородный состав нефти означает, что преобладающая ее часть в виде углеводородов (соединений только атомов углерода и водорода) не имеет биосферного происхождения.

Нефть в силу своей вязкости и адсорбции частицами горной породы не способна мигрировать по горизонтально залегающим комплексам осадочных пород на большие расстояния, поэтому латеральная миграция не может рассматриваться как фактор формирования ее залежей.

Глобальное распространение нефти, ее повсеместность в земной коре доказывают независимость ее образования от геологических условий недр. Образование нефти не привязано к осадочным седиментационным бассейнам. Структура, состав, возраст и взаимоотношение вмещающих пород имеют для нефти значение только как каналы миграции, создатели условий для аккумуляции, завершающей стадии оформления состава нефти в данной геологической формации и кратковременной, в геологическом масштабе времени, консервации нефти в залежи.

Нахождение нефти в комплексах пород различного состава и любого возраста не доказывает, что они «ровесники». Докембрийской, палеозойской и

мезозойской нефти в недрах быть не может, а есть залежи нефти, близкой по элементному и углеводородному составу, в фундаменте докембрийских, палеозойских, мезозойских и кайнозойских отложений. Нефть в любых породах как сложная система может существовать в недрах в первозданном виде короткое в геологическом масштабе время.

Определение объема информации в нефти и веществах, с ней генетически связанных, может явиться вполне современным инструментом, дополняющим существующие методы изучения нефти и ее генезиса.

Литература

1. *Валяев Б. М.* Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений // Геология нефти и газа, 1997. № 9.
2. *Дмитриевский А. Н., Валяев Б. М.* Углеводородная дегазация через дно океана: локализация, проявления, масштабы, значимость // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. — М.: ГЕОС, 2002. С. 7–36.
3. *Фрадкин В.* Газ на дне океана как альтернатива энергоносителя. 2004. <http://n-t.ru/tp/ie/gn.htm>.
4. Новый вид ископаемого топлива, использующийся только в России // Наука. Известия, 2009. <http://www.inauka.ru/news/article93252html>.
5. *Сейфуль-Мулюков Р. Б.* Нефть в квантовом мире // Системы и средства информатики. Доп. вып. — М.: ИПИ РАН, 2008. С. 195–213.
6. Нефть. <http://ru.wikipedia.org/wiki/нефть>.
7. *Сейфуль-Мулюков Р. Б.* Палеотектонические факторы нефтеобразования и нефтенакпления. — М.: Недра, 1983. 269 с.
8. *Tissot B. P., Velte D. H.* Petroleum formation and occurrence. A new approach to oil and gas exploration. — Berlin: Springer-Verlag, 1978.
9. *Богородская Л. И., Конторович А. Э., Ларичева А. И.* Кероген: методы изучения, геохимическая интерпретация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 254 с.
10. *Пожарский А. Ф.* Гетероциклические соединения в биологии и медицине // Статьи Соросовского Образовательного журнала, 1996. <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/112.html>.
11. *Лейбензон Л. С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. — М.: ОГИЗ—Гостехиздат, 1947. 244 с.
12. Байкал открывает свои тайны: на дне озера обнаружили источник нефти. 2008. <http://www.rian.ru/elements/20080807/150155919.html>.
13. *Laherrere J.* No free lunch, Part 1: A critique of Thomas Gold's claims for abiotic oil. — The Wilder-
- ness Publications, 2004. http://www.copvicia.com/free/ww3/102104_no_free_pt1.shtml.
14. Нефтегазоносные бассейны мира. Карта. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1995.
15. Крупнейшие нефтяные месторождения мира. http://ru.wikipedia.org/wiki/крупнейшие_нефтяные_месторождения_мира.
16. *Малаховская Я. Е., Иванцов А. Ю.* Вендские жители Земли. — Архангельск: ПИН РАН, 2003. 48 с.
17. *Germain J. E.* Catalytic conversion of hydrocarbons. — London—New York: Academic Press, 1969.
18. *Фомин Ю. М.* Верхняя астеносфера — переходная зона между веществом мантии и литосферы. <http://www.evolbiol.ru/fomin.htm>.
19. *Тхоровская Н. В.* Аномалия Земли // Материалы международной конференции памяти акад. П. Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002. — М.: ГЕОС, 2002. С. 454–455.
20. *Капустинский А. Ф.* Геосферы и химические свойства атомов // Геохимия, 1956. № 1. С. 53–61.
21. *Амбарцумян В. А.* Научные труды. Т. 2. — Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1960.
22. *Эйнштейн А.* Основы общей теории относительности // Собр. науч. тр. Т. 1. — М.: Наука, 1965.
23. *Шеннон К.* Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963.
24. *Бриллюен Л.* Наука и теория информации. — М.: Физматгиз, 1960.
25. *Гуревич И. М.* Законы информатики — основа строения и познания сложных систем. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 400 с.
26. *Сейфуль-Мулюков Р. Б.* Информация и информационные процессы в системах неживой и живой природы // Системы и средства информатики. Спец. вып. — М.: ИПИ РАН, 2007. С. 140–156.
27. *Гуревич И. М.* Информационные характеристики физических систем. — М.: Изд-во 11 формат, 2009. 167 с.
28. Липиды. <http://lipid.narod.ru/fa.html>.
29. *McIver R. D.* Hydrocarbons in canned mud from sites 185, 186, 189, and 191 — Leg 19 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1973. Vol. 19. P. 875–877. http://www.deepseadrilling.org/19/volume/dsdp19_34.pdf.
30. *Simoneit B. R. T.* Organic geochemistry of the shales from the Northwestern Proto-Atlantic, DSDP Leg 43 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1979. Vol. 43. P. 643–650. http://www.deepseadrilling.org/43/volume/dsdp43_25.pdf.
31. *Баженова Т. К., Шиманский В. К.* Исследование онтогенеза углеводородных систем как основа раздельного прогноза нефте- и газонасыщенности осадочных бассейнов // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2007. № 2. <http://www.ngtp.ru>.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Труды секции «Биометрия» 19-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2009» (г. Москва, Россия, 5–9 октября 2009 г.)

Международная конференция по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон» — это крупнейшая международная конференция по компьютерной графике и зрению на территории бывшего СССР. В 2009 г. конференция прошла 5–9 октября 2009 г. на базе Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Работа одной из секций конференции, посвященной вопросам биометрической идентификации личности, организовывалась с участием научно-образовательного центра (НОЦ) Института проблем информатики Российской академии наук и факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ «Биометрическая информатика». По согласованию с НОЦ и руководством секции в журнале публикуется в виде тематического раздела цикл статей, являющихся доработанными и дополненными версиями докладов, представленных на указанной секции конференции «ГрафиКон'2009».

В статье А. Р. Арутюняна «Моделирование влияния деформаций отпечатков пальцев на точность дактилоскопической идентификации» исследована проблема влияния искажений на точность дактилоскопической идентификации. Предложен способ учета таких искажений и проведены эксперименты по моделированию изменения точности идентификации в зависимости от силы деформаций отпечатков пальцев.

Статья В. Ю. Гудкова «Математические модели изображения отпечатка пальца на основе описания линий» посвящена топологической модели изображения отпечатка пальца. Особенностью модели является независимость от масштаба и эластичных деформаций отпечатков.

В статье С. Л. Каратеева, И. В. Бекетовой, М. В. Ососкова, В. А. Князя, Ю. В. Визильтера, А. В. Бондаренко и С. Ю. Желтова «Автоматизированный контроль качества цифровых изображений для персональных документов» представлен программно-аппаратный комплекс интерактивного получения цифрового изображения лица для паспортно-визовых документов нового поколения.

В статье В. С. Конушина, Г. Р. Кривовязя и А. С. Конушина «Алгоритм распознавания людей в видео-последовательности по одежде» представлен алгоритм идентификации личности по одежде. Такие методы идентификации относятся к новым «мягким» методам идентификации, которые не могут использоваться самостоятельно, но могут усилить традиционные способы идентификации в ряде прикладных задач.

В статье Е. А. Павельевой и А. С. Крылова «Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита» предложена новая система признаков для идентификации по изображению радужной оболочки глаза. Для вычисления признаков предложен способ выявления ключевых точек изображения и их компактного описания на основе преобразования Эрмита.

В статье В. И. Протасова «Составление субъективного портрета с использованием эволюционного морфинга и квалиметрия метода» исследуется процесс составления субъективного портрета (фоторобота) коллективом свидетелей для последующей автоматизированной идентификации. По результатам исследования предложен «генетический» способ получения новых алгоритмов получения фоторобота. Для отбора наиболее эффективных алгоритмов используются модели свидетелей («виртуальные свидетели»).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ НА ТОЧНОСТЬ ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ*

А. Р. Арутюнян¹

Аннотация: Рассмотрена проблема учета влияния искажающих факторов на точность биометрической идентификационной системы. Предложена модель искажающих факторов, основанная на приближении методом моментов условных плотностей распределений меры сходства биометрических образцов. Разработан способ их оценки и учета. Проведены эксперименты по моделированию влияния эластичных деформаций на точность дактилоскопической идентификации.

Ключевые слова: биометрическая идентификация; операционные испытания; нелинейные деформации отпечатков

1 Введение

На сегодняшний день биометрические технологии идентификации личности получили широкое распространение в различных областях обеспечения безопасности: от контроля и управления доступом в офисные помещения до гражданской идентификации и правоохранительных приложений [1–3]. С распространением таких технологий актуальной становится проблема выбора того или иного метода биометрической идентификации. Основным фактором, определяющим результаты выбора, является точность идентификации, выраженная ROC (Receiver Operating Characteristics — функциональные характеристики приемника) кривой соотношения вероятностей ошибок 1-го (FRR — False Reject Rate, вероятность ложного отказа) и 2-го (FAR — False Acceptance Rate, вероятность ложной идентификации) рода [4]. При этом ROC-кривая зависит от данных, которые использовались при ее оценке, т. е. фактически зависит от среды и характеризующих ее искажающих факторов. На практике эти зависимости могут быть очень сильными. На рис. 1 приведен пример измерения ROC-кривой для технологии NIST VTB (National Institute of Standards and Technology Verification Test Bed) [5] на массивах отпечатков пальцев, полученных в разное время. Видно, что оценки вероятности FRR при одной и той же вероятности FAR могут различаться в 5–6 раз. Аналогичные оценки потенциального влияния среды могут быть получены теоретически [6, 7].

Подобная ситуация типична и для других биометрических характеристик. На рис. 2 показано

изменение точности идентификации за период с 1993 по 2006 гг., измеренное в ходе технологических испытаний NIST (США). В частности, эти цифры указывают на то, что с 2002 по 2006 гг. FRR снизилась в 20 раз, хотя при измерении точности на одном массиве (рис. 3) наблюдается изменение в 3–4 раза, что больше соответствует практическим наблюдениям. Основной причиной таких расхождений является изменение условий испытаний. В 2006 г. использовались данные, полученные в лучших операционных условиях по сравнению с 2002 г.

Обратная ситуация наблюдалась в испытаниях технологий распознавания по отпечаткам пальцев FVC (Fingerprint Verification Competition): данные тестовых массивов FVC2004 оказались значительно хуже массивов FVC2002. Поэтому наблюдалось формальное снижение точности идентификации в то время, когда технологии распознавания по отпечаткам пальцев с точки зрения практики значительно улучшились.

Такая неточность в оценке вероятности ошибок идентификации может приводить к неправильным решениям при проектировании и эксплуатации биометрических систем и даже к неправильному выбору используемой биометрической характеристики.

Для решения этой проблемы в статье предложена модель искажающих факторов биометрической идентификации и способ оценки степени их влияния на точность распознавания и его последующего учета при эксплуатации. Входными параметрами модели являются численные оценки искажающих

* Работа выполнена в рамках исследований Научно-образовательного центра ИПИ РАН – ВМК МГУ «Биометрическая информатика».

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, artem@ibrae.ac.ru

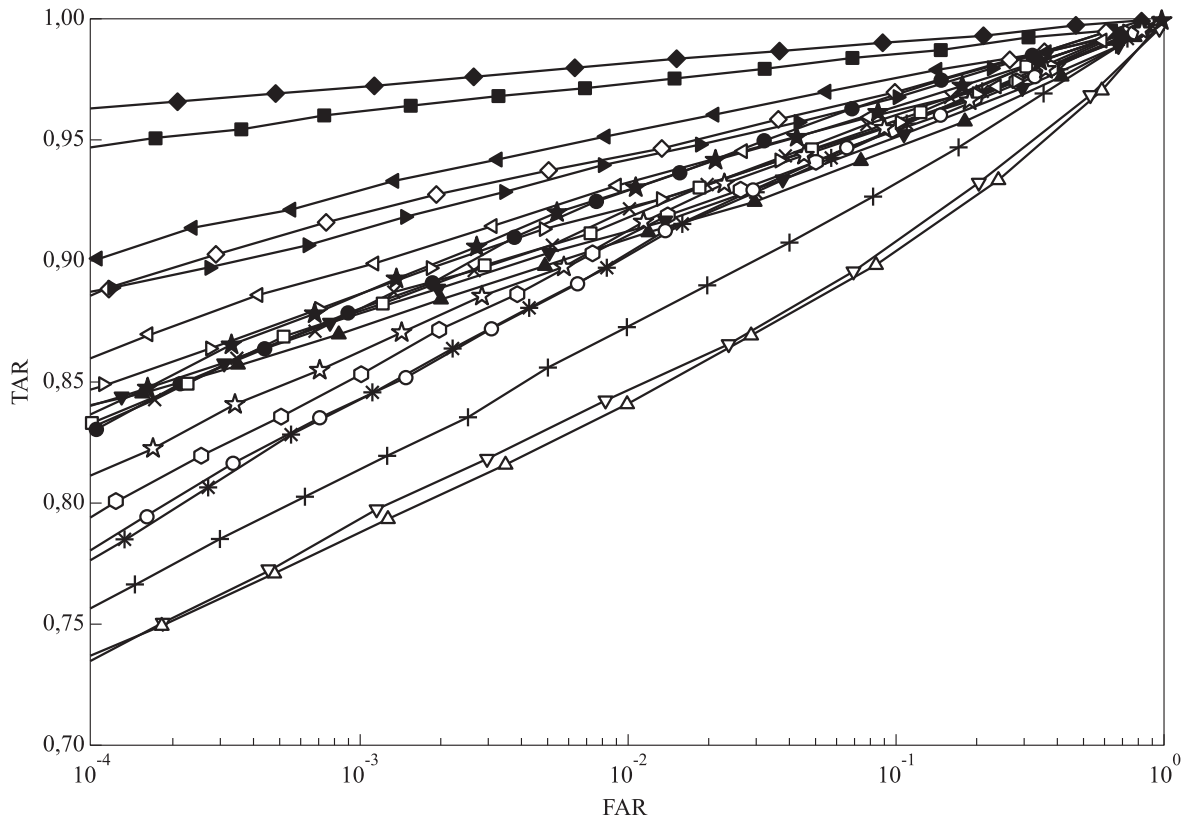


Рис. 1 Кривые ROC идентификации по отпечаткам пальцев для технологии NIST VTB на различных массивах: TAR — True Acceptance Rate

факторов и ROC-кривая в эталонных операционных условиях. Выходными параметрами — ROC-кривая в реальных условиях эксплуатации.

Статья организована следующим образом. В разд. 2 приведена модель искажающих факторов. Раздел 3 посвящен применению модели к учету упругих деформаций в задаче дактилоскопической идентификации. Заключение содержит основные выводы по работе.

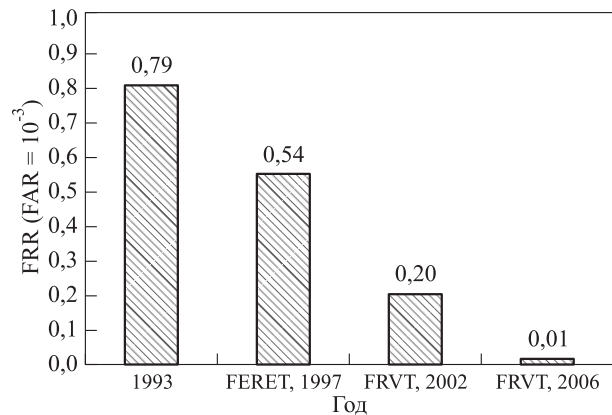


Рис. 2 Номинальный прогресс точности идентификации по форме лица в испытаниях NIST

2 Модель операционных условий

При оценке точности идентификации биометрическая система достаточно полно характеризуется условными плотностями распределений: меры сходства биометрических образцов в «своих» и «чужих» сравнениях. Обозначим их через $f^{gen}(x)$ и $f^{imp}(x)$ соответственно. Принятие решения осуществляется на основе сравнения меры сходства с порогом. Ошибки идентификации при выбранном пороге определяются как интегралы от плотностей (рис. 4). Ошибки FAR и FRR определяются по следующим формулам:

$$FAR(t) = \int_t^{+\infty} f^{imp}(x) dx ;$$

$$FRR(t) = \int_{-\infty}^t f^{gen}(x) dx ,$$

где t — порог принятия решения.

Под влиянием различных операционных условий плотности распределений меняются. В [6] был предложен способ грубого учета операцион-

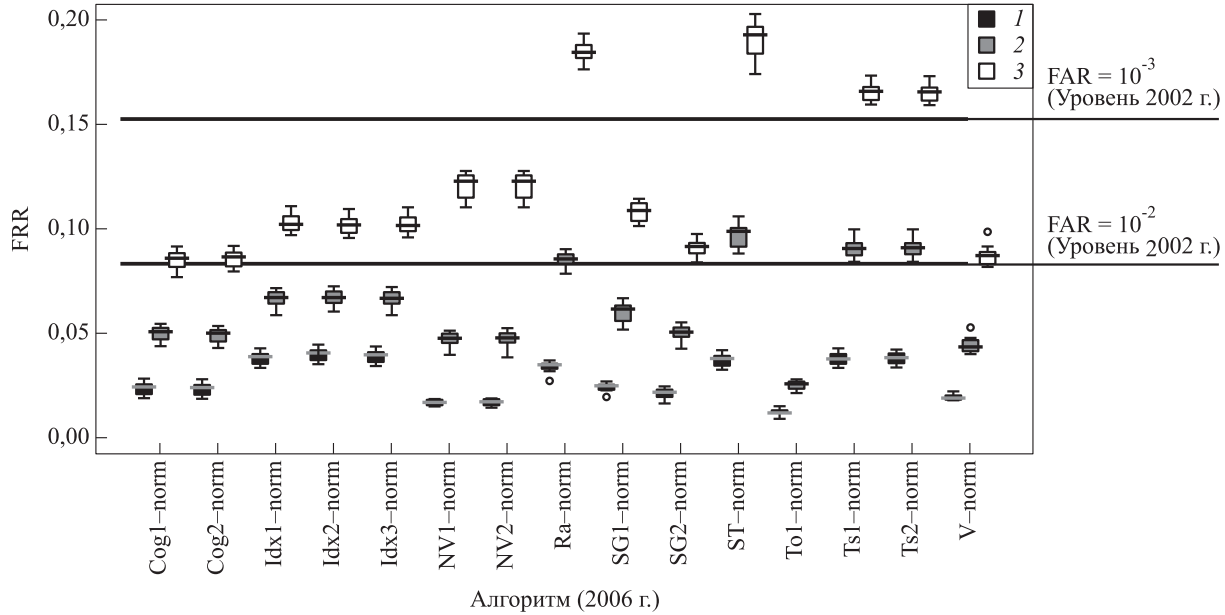


Рис. 3 Изменение точности идентификации при испытаниях NIST FRVT2002 и NIST FRVT2006 на одном массиве: 1 – FAR = 10⁻²; 2 – FAR = 10⁻³; 3 – FAR = 10⁻⁴

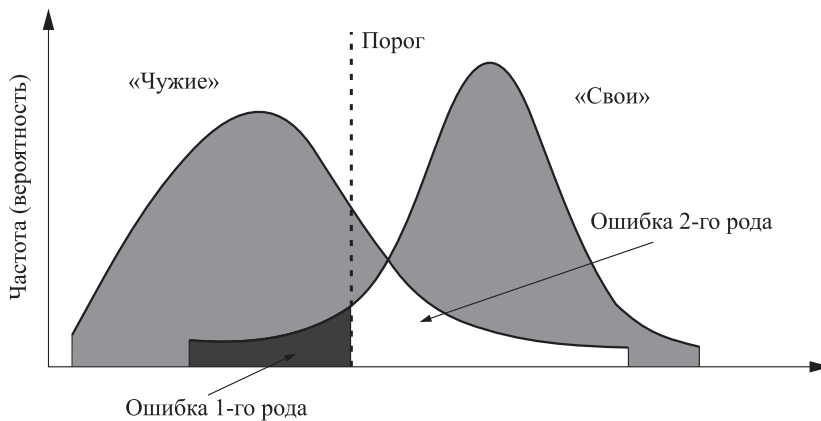


Рис. 4 Примерный вид плотностей условных распределений меры сходства биометрического сравнения

ных условий на основе вероятностных моментов первого и второго порядка. Воспользуемся теперь более точным приближением плотностей биометрических тестов [8] методом моментов с базовой нормальной плотностью [9].

Пусть на основе эмпирических данных оценены вероятностные моменты условных распределений. Обозначим их через $\{m^{\text{gen}}, \sigma^{\text{gen}}, \gamma_3^{\text{gen}}, \dots, \gamma_n^{\text{gen}}\}$ и $\{m^{\text{imp}}, \sigma^{\text{imp}}, \gamma_3^{\text{imp}}, \dots, \gamma_n^{\text{imp}}\}$ для «своих» и «чужих» сравнений соответственно. Статистика γ (нормированный вероятностный момент) вычисляется по следующей формуле:

$$\gamma_k = M \left[\left(\frac{x - m}{\sigma} \right)^k \right].$$

Плотности распределений приближаются следующими функциями:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \gamma_i R_i(m + \alpha x) f_{0,1}^M(m + \alpha x),$$

где R_i — базисные полиномы, $f_{0,1}^N$ — плотность стандартного нормального распределения.

Приближение достаточно точно описывает реальные биометрические данные с точки зрения основной технологической характеристики: ROC-кривой (рис. 5).

Операционные условия влияют на ROC-кривую. Если воздействие искажающего фактора приводит к изменениям в ROC-кривой, то оно также

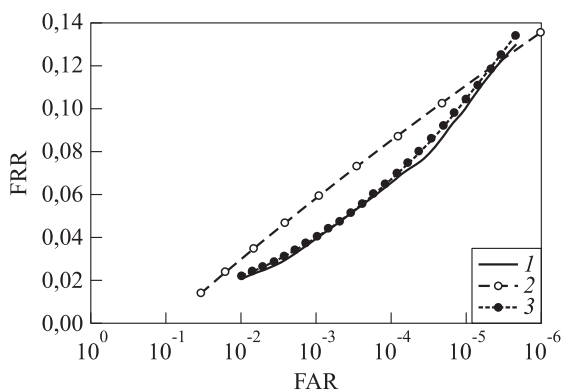


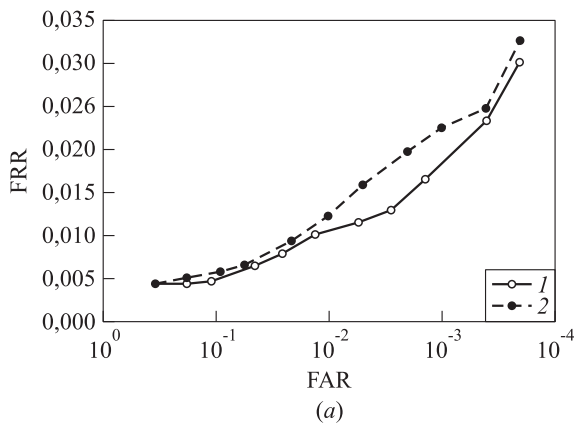
Рис. 5 Приближение ROC дактилоскопической идентификации: 1 — исходная ROC; 2 — нормальная аппроксимация; 3 — аппроксимация методом моментов (база NIST BSSR1\ri) [4]

приводит к изменениям в векторе параметров S , который можно рассматривать как функцию S от операционных условий u . Если есть численная оценка операционных факторов, то изменение распределений можно приближенно определить по формуле

$$S(u) = S(0) + \sum_{i=1}^w \frac{\partial S}{\partial u_i} u_i. \quad (1)$$

3 Моделирование искажающих факторов на примере деформаций отпечатков пальцев

В качестве примера использования моделирования искажающих факторов рассмотрим дефор-



мации отпечатков пальцев. Выбор деформаций в качестве модельного примера определяется тем, что это один из немногих искажающих факторов дактилоскопической идентификации, который может быть численно оценен. Как показано в [10, 11], сила воздействия деформации может быть определена энергией деформации.

Для оценки влияния деформаций на параметры распределений были проведены эксперименты на базе FVC2002 DB1 с двумя алгоритмами распознавания отпечатков пальцев: Biolink MST и прямого наложения изображений. На рис. 6 представлены примеры изменения ROC под воздействием деформаций отпечатков пальцев [9, 10] для каждого из этих методов распознавания. В табл. 1 и 2 приведены изменения вероятностных моментов.

Для уточнения измерения влияния деформаций согласно уравнению (1) были построены зависимости параметров распределений от энергии деформации. На рис. 7 представлены зависимости меры сходства в своих сравнениях от энергии деформации на основе эмпирических данных FVC2002DB1. В чужих сравнениях была принята гипотеза о независимости распределений от фактора деформаций, так как для этих сравнений моменты практически не изменяются (см. табл. 1 и 2).

Из рис. 7 видно, что имеется ощутимая зависимость меры сходства от энергии деформации. На рис. 8 представлены графики относительных изменений параметров распределений в своих сравнениях при росте силы деформации отпечатков. В качестве единичной эталонной энергии деформации взята средняя энергия, измеренная на базе FVC2002 DB1.

Результаты искусственного моделирования точности идентификации в зависимости от силы деформации представлены на рис. 9.

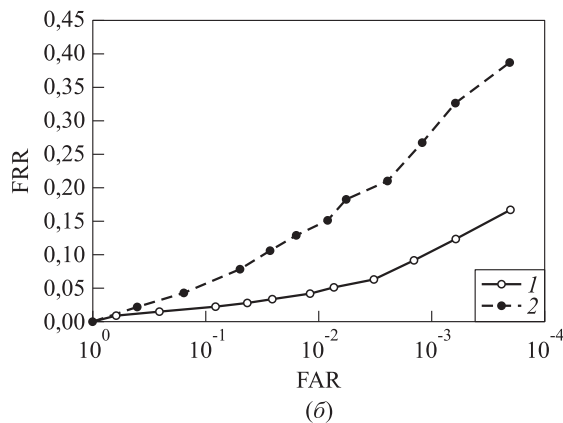


Рис. 6 Среднее изменение ROC при идентификации отпечатков под действием деформаций (1 — без деформаций; 2 — с деформациями): (а) Biolink MST; (б) прямое наложение изображений

Таблица 1 Изменение вероятностных моментов условных распределений мер сходства под влиянием деформаций отпечатков пальцев (Biolink MST)

Отпечатки	μ	σ	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
Свои (без деформаций)	730	181	-0,22	2,84	-3,29	16,70
Свои (с деформациями)	680	198	-0,78	3,94	-9,75	36,00
Чужие (без деформаций)	100	73	0,76	3,01	6,00	18,10
Чужие (с деформациями)	96	73	0,66	3,13	5,56	19,02

Таблица 2 Изменение вероятностных моментов условных распределений мер сходства под влиянием деформаций отпечатков пальцев (прямое наложение изображений)

Отпечатки	μ	σ	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
Свои (без деформаций)	335	147	0,33	2,81	2,83	14,96
Свои (с деформациями)	264	138	0,83	3,35	6,81	22,47
Чужие (без деформаций)	54	22	1,31	6,22	23,45	116,00
Чужие (с деформациями)	55	21	1,23	5,79	21,59	104,76

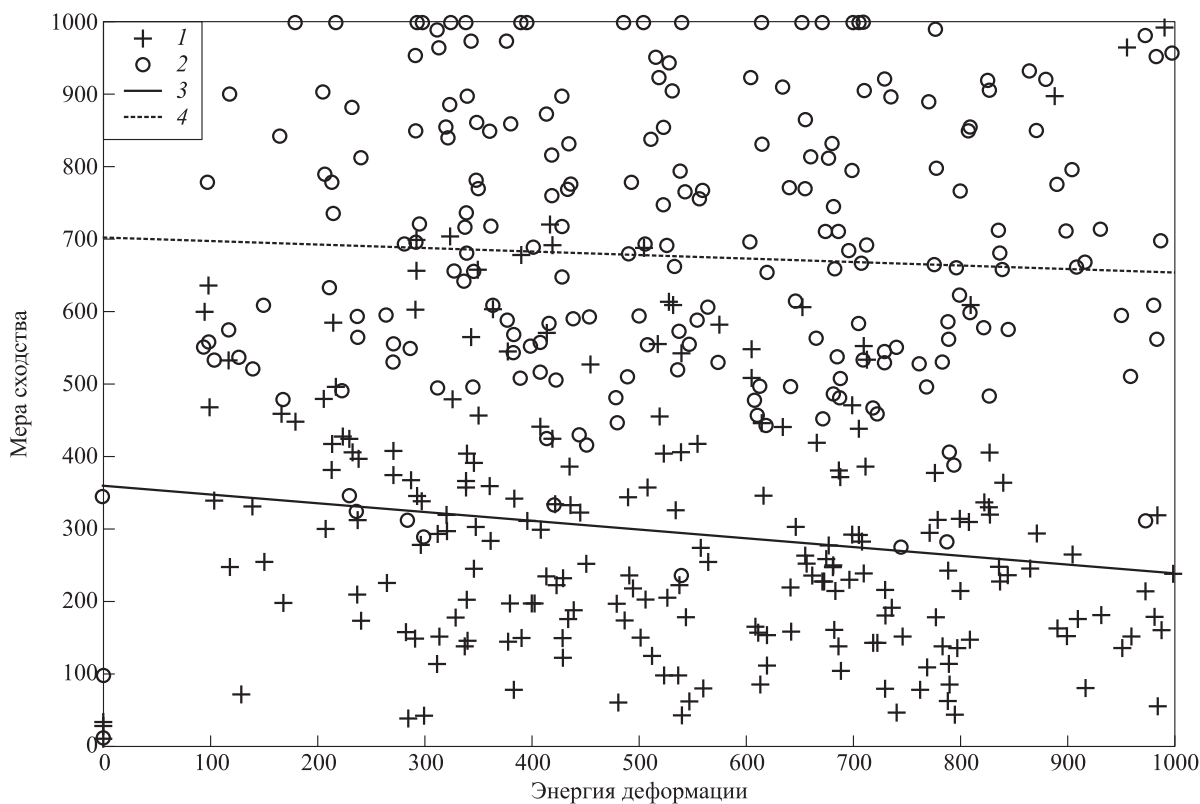


Рис. 7 Выборочные зависимости меры сходства от энергии деформации на репрезентативной выборке в экспериментах с базой FVC2002DB1: 1 — прямое наложение; 2 — Biolink MST; 3 — линейный (прямое наложение); 4 — линейный (Biolink MST)

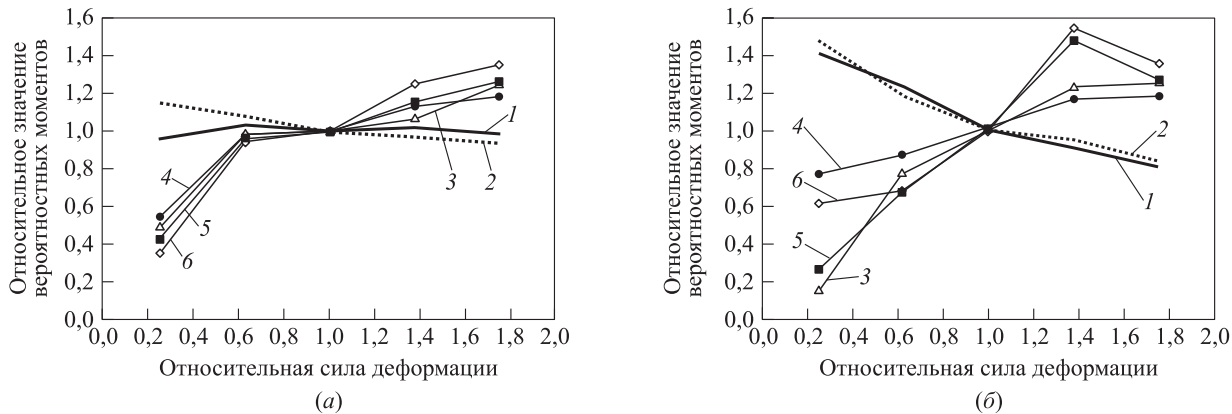


Рис. 8 Относительное изменение параметров распределений в зависимости от силы деформации (от 1 до 6): (а) Biolink MST; (б) прямое наложение

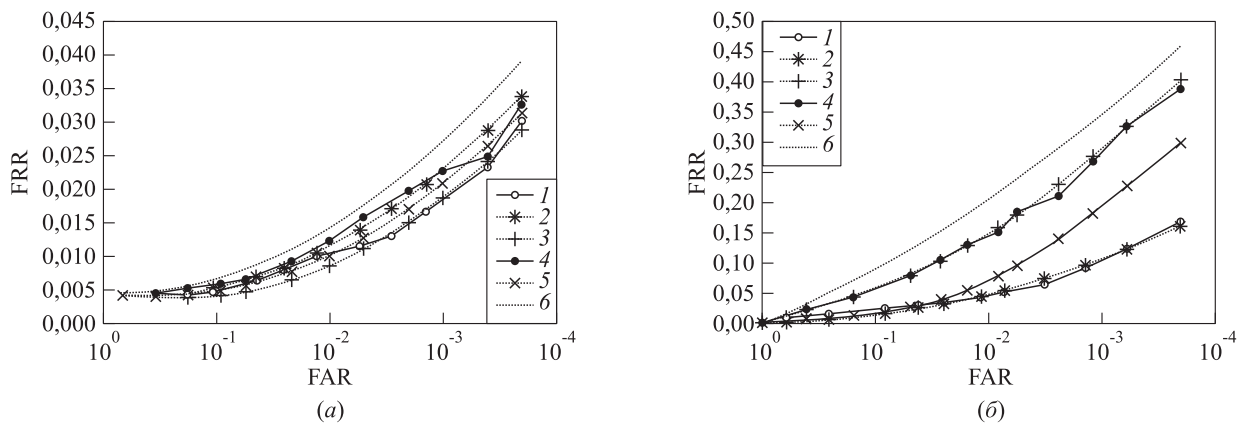


Рис. 9 Изменение ROC в зависимости от силы деформации (1 — без деформаций (факт.); 2 — без деформаций (модель); 3 — с деформациями $\times 1$ (модель); 4 — с деформациями (факт.); 5 — с деформациями $\times 0,5$ (модель); 6 — с деформациями $\times 2$ (модель)): (а) Biolink MST; (б) прямое наложение

4 Заключение

В статье представлена модель операционных условий и метод оценки показателей точности биометрической идентификации при их изменении. Эксперименты с дактилоскопической идентификацией позволяют сделать предварительное заключение о практической применимости модели.

В дальнейшем модель может применяться к оценке других искажающих факторов биометрической идентификации, допускающих непосредственное численное измерение, например угла поворота лица.

Литература

1. Bolle R. M., Connell J. H., Pankanti S., Ratha N. K., Senior A. W. Guide to biometrics. — New York: Springer-Verlag, 2003.

2. Dessimoz D., Champod C., Richiadi J., Drygajlo A. Multi-modal biometrics for identity documents. Research Report, PFS 314-08.05. UNIL, June 2006.
3. Sinityn I. N., Ushmaev O. S. Development of metrological and biometric technologies and systems // 9th Conference (International) in Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies — PRIA-9-2002 Proceedings. — Nizhni Novgorod, 2008. Vol. 2. P. 169–172.
4. Wayman J. L., Jain A. K., Maltoni D., Maio D. Biometric systems: Technology, design and performance evaluation. — London: Springer Verlag, 2005.
5. Watson C., Wilson C., Indovina M., Cochran B. Two finger matching with Vendor SDK matchers. NISTIR 7249. July 2005.
6. Ушмаев О. С. Адаптация биометрической системы к искажающим факторам на примере дактилоскопической идентификации // Информатика и её применения, 2009. Т. 3. Вып. 2. С. 25–33.

7. Урмаев О. С., Арутюнян А. Р. Метод оценки качества биометрической идентификации в операционных условиях на примере дактилоскопической идентификации // Труды конференции ГрафиКон'2009: 19-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению. — М.: МАКС ПРЕСС, 2009. С. 232–235.
8. Ushmaev O., Novikov S. Biometric fusion: Robust approach // 2nd Workshop on Multimodal User Authentication — MMUA'06 Proceedings. Toulouse, France, 11–12 May 2006. <http://mmua.cs.uchb.edu/MMUA2006/Papers/127.pdf>.
9. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic systems: Theory and applications. — World Scientific, 2001.
10. Урмаев О. С., Арутюнян А. Р. Влияние деформаций на качество биометрической идентификации по отпечаткам пальцев // Информатика и её применения, 2009. Т. 3. Вып. 4. С. 12–21.
11. Novikov S. Ushmaev O. Registration and modelling of elastic deformations of fingerprints // Biometric Authentication: ECCV 2004 International Workshop — BioAW2004 Proceedings. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. P. 80–88.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТПЕЧАТКА ПАЛЬЦА НА ОСНОВЕ ОПИСАНИЯ ЛИНИЙ

В. Ю. Гудков¹

Аннотация: Представлена математическая модель изображения отпечатка пальца на основе топологических векторов для линий и векторов гребневого счета для линий. Модель сохраняется в шаблоне изображения и используется при идентификации.

Ключевые слова: отпечаток пальца; частный признак; топология; детектирование событий; гребневый счет

1 Введение

В компьютеризированных системах верификация и идентификация дактилоскопических изображений (ДИ) выполняется на основе шаблонов, базис которых составляет описание частных признаков в виде начал и окончаний, слияний и разветвлений линий [1, 2]. Их обычно детектируют по стилизованному представлению ДИ в виде скелета линий, представленному на рис. 1 [2, 3].

Математическая модель должна опираться на необходимое и достаточное число признаков [3]. В дактилоскопии информативными считают частные признаки и гребневый счет между ними [2].

Однако они не исчерпывают все множество математических моделей, используемых для автоматического доказательства индивидуальности ДИ [1, 2, 4, 5]. Каждая из таких моделей нацелена на повышение точности идентификации, однако неизвестно ни одной лучшей, свободной от недостатков модели [2]. Например, классический гребневый счет, который в криминалистике предписывается измерять по прямой линии, не работает в области значительного искривления линий узора и в области петель, дельт и завитков [6]. Это очевидно при измерении гребневого счета по прямой линии, проходящей близко к касательной к изображению папиллярной линии (см. рис. 1).

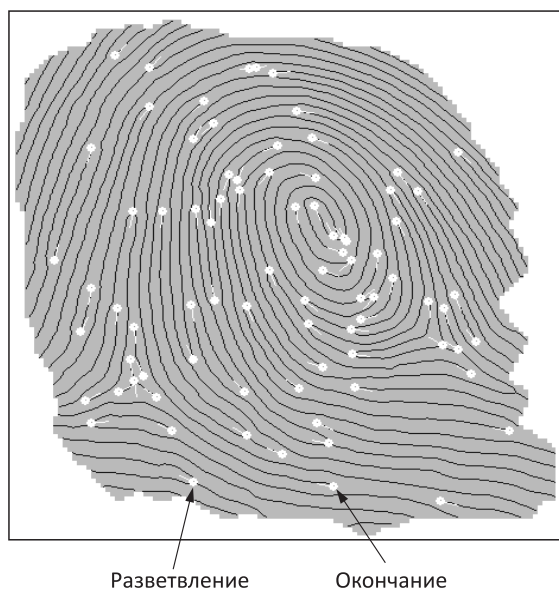


Рис. 1 Скелет и частные признаки изображения отпечатка пальца

2 Шаблон изображения

Частные признаки и гребневый счет между ними как набор данных сохраняют в файле, который называют шаблоном [2]. У разных производителей программного обеспечения шаблоны различны [1, 2, 6], но можно указать их общее свойство: они содержат данные, являющиеся некоторой метрикой для частных признаков.

В работе предлагается шаблон изображения, синтезируемый как отображение в виде

$$\Gamma : F_0^{(m)} \rightarrow \{L_m, L_l, L_r\},$$

где $F_0^{(m)} = |f_0^{(m)}(x, y)|$ — скелет изображения (см. рис. 1); L_m — список частных признаков; L_l — список топологических векторов для линий; L_r — список векторов гребневого счета для линий.

Начала и окончания, слияния и разветвления линий называют частными признаками. Учет направления частного признака в сторону увеличения числа линий позволяет выделить два типа частных

¹Челябинский государственный университет, кафедра прикладной математики, diana@sonda.ru

признаков: окончания и разветвления [2]. Они указаны стрелками на рис. 1, а их множество образует основу для формирования списка L_m .

Построение списков L_l и L_r опирается на частные признаки и скелетные линии. Однако и топологический вектор, и вектор гребневого счета имеют много общего: они характеризуют одинаковые свойства множества точек линии, а не окрестность одной точки. Эта интересная особенность повышает устойчивость модели.

2.1 Список частных признаков

Пусть M_i — индексированный номером i частный признак. Список частных признаков L_m находится в виде

$$L_m = \{M_i = \{(x_i, y_i), \alpha_i, t_i\} | i = \overline{1, n_1}\}, \quad (1)$$

где $|L_m| = n_1$ — мощность списка; (x_i, y_i) , α_i и t_i — координаты, направление и тип частного признака, детектируемого внутри информативной области изображения [4, 5] (на рис. 1 информативная область ДИ затемнена, а скелет зачернен).

Координаты (x_i, y_i) определяются координатами вершины скелета [3]. Направление α_i как угол определяется простой цепью вершин скелета для окончания и тремя простыми цепями для разветвления [2, 7]. Тип $t_i \in \{0, 1\}$ устанавливается валентностью вершины скелета как вершины графа [7], где 0 — разветвление, а 1 — окончание. Координаты (x_i, y_i) , направление α_i и тип t_i являются базовыми параметрами M_i , которые используются при идентификации изображения [1, 2].

2.2 Список топологических векторов

Список топологических векторов для линий L_l находится на основе списка L_m по (1) и всех вершин скелета $F_0^{(m)}$, исключая вершины частных признаков, в виде

$$L_l = \{V_i = \{(e_j, n_j, l_j)\} | i = \overline{1, n_2}, j = \overline{1, m_t}\}, \quad (2)$$

где V_i — топологический вектор для группы вершин скелета; $|L_l| = n_2$ — мощность списка и $n_2 > n_1$; i — индекс как номер топологического вектора; j — номер связи в топологическом векторе; e_j — событие, а l_j — длина связи, сформированная частным признаком с номером n_j ; $m_t = 4m + 2$ — число связей с учетом центральной линии.

Опишем процедуру синтеза списка.

В информативной области ДИ выделяют линии, строят скелет и детектируют два типа частных признаков: окончания и разветвления (см. рис. 1) [2].

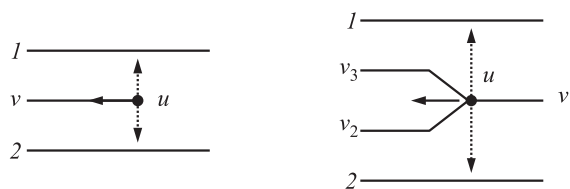


Рис. 2 Проекции для окончания и разветвления

Направление частного признака M_i указывает на область увеличения числа линий и параллельно касательной к изображению папиллярной линии в малой его окрестности. Каждый частный признак нумеруют. Затем от каждого частного признака фиксируют две проекции: вправо и влево от перпендикуляра к его направлению на смежные скелетные линии. На рис. 2 проекции показаны пунктиром, а две соответствующие вершины скелета на линиях 1 и 2 закрашены.

Выберем вершину скелета p_i (но не частный признак). Проведем через ее координаты (x_i, y_i) вправо и влево сечение на глубину нескольких линий перпендикулярно касательным к пересекаемым линиям. Пронумеруем по спирали, разворачивающейся по часовой стрелке, рассеченные линии, которые назовем связями. Сечение проходит, отслеживая направление кривизны линий [4]. Одна линия в сечении образует две связи. Топологический вектор определяют по сечению методом слежения за ходом каждой связи от сечения до встречи с другим частным признаком, расположенным на связи, или с проекцией от него на связь. На связях детектируют события, показанные на рис. 3 и представленные в двоичном коде:

1101 — на связи проекция от окончания, расположенного справа по ходу связи, направление окончания ориентировано навстречу ходу связи;

1001 — на связи проекция от окончания, расположенного справа по ходу связи, направление окончания ориентировано по ходу связи;

1110 — на связи проекция от окончания, расположенного слева по ходу связи, направление окончания ориентировано навстречу ходу связи;

1010 — на связи проекция от окончания, расположенного слева по ходу связи, направление окончания ориентировано по ходу связи;

0101 — на связи проекция от разветвления, расположенного справа по ходу связи, направление разветвления ориентировано навстречу ходу связи;

0001 — на связи проекция от разветвления, расположенного справа по ходу связи, направление разветвления ориентировано по ходу связи;

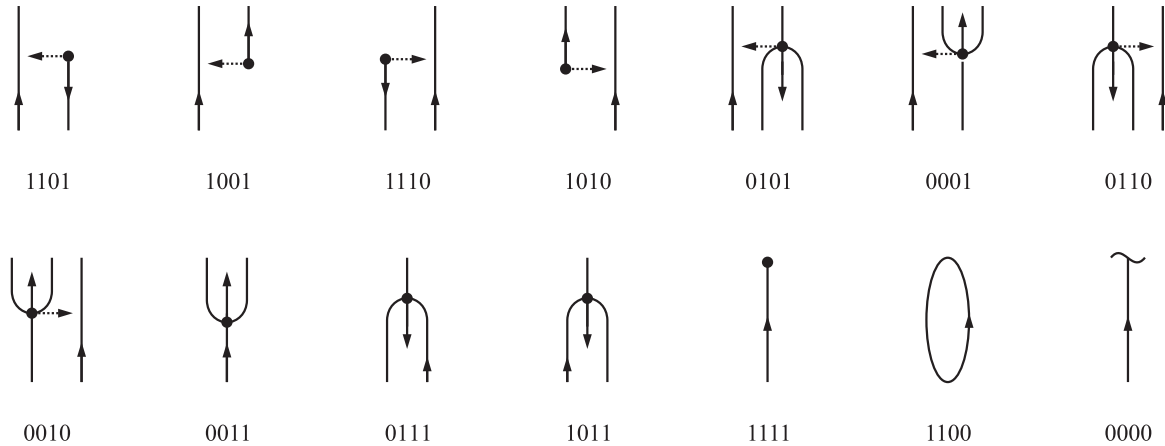


Рис. 3 События

0110 — на связи проекция от разветвления, расположенного слева по ходу связи, направление разветвления ориентировано навстречу ходу связи;

0010 — на связи проекция от разветвления, расположенного слева по ходу связи, направление разветвления ориентировано по ходу связи;

0011 — на связи разветвление, направление которого ориентировано по ходу связи;

0111 — разветвление на связи, образованной линией, касательная к которой образует минимальный угол при повороте направления разветвления против часовой стрелки;

1011 — разветвление на связи, образованной линией, касательная к которой образует минимальный угол при повороте направления разветвления по часовой стрелке;

1111 — на связи окончание, направление которого ориентировано навстречу ходу связи;

1100 — связь по линии замыкается, частный признак или проекция от него отсутствует;

0000 — на связи нет ни частного признака, ни проекции от него (обрыв скелета).

С событием как числом, детектированным на связи, ассоциируют номер частного признака, иницирующего это событие. Событие привязано к номеру связи. Для событий 0000 и 1100 номера частных признаков отсутствуют. Нумерованный набор связей с событиями и номерами частных признаков есть **базовый топологический вектор** (экономный). Событие и номер частного признака образуют упорядоченную пару (e_j, n_j) , которую дополняют длиной связи от сечения до позиции, в которой детектируется это событие. Так формируется **расширенный топологический вектор**. Событие, номер частного признака и длина связи образуют упо-

рядоченную тройку (e_j, n_j, l_j) . Для событий 0000 и 1100 длины связей описывают информативные области без частных признаков. Длины связей, обрывающихся на краю ДИ, устойчивы в том смысле, что не укорачиваются при полной прокатке пальца [4].

Местоположение бита в событии определяет тип частного признака, его направление и местоположение по отношению к направлению хода связи и др. (см. рис. 3).

Сечение разрезает линии на связи, пронумерованные по спирали, разворачивающейся по часовой стрелке. На рис. 4 в сечении для вершины *A* скелета пронумерованы связи 0–17. Топологический вектор вершины *A* представлен в виде табл. 1. На рис. 5 в сечении для вершины *B* скелета пронумерованы

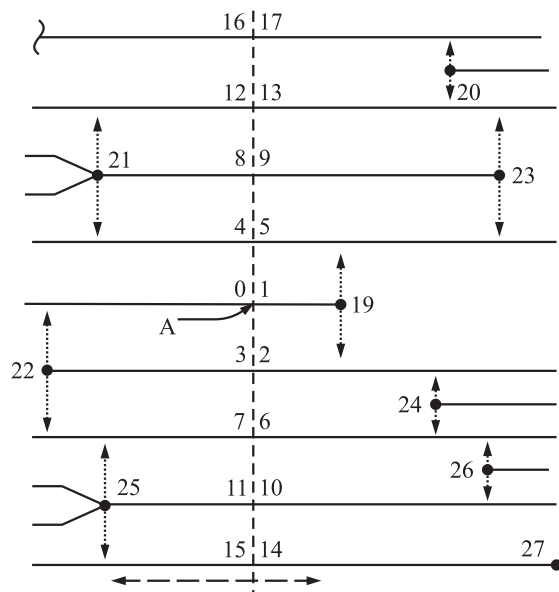


Рис. 4 Сечение для линии с окончанием

Таблица 1 Топологический вектор для вершины *A*

Номер	Событие	Индекс	Длина
0	1110	22	l_0
1	1111	19	l_1
2	1110	19	l_2
3	1111	22	l_3
4	0001	21	l_4
5	1101	19	l_5
6	1010	24	l_6
7	0010	25	l_7
8	0011	21	l_8
9	1111	23	l_9
10	1010	26	l_{10}
11	0011	25	l_{11}
12	0010	21	l_{12}
13	1010	20	l_{13}
14	1111	27	l_{14}
15	0001	25	l_{15}
16	0000	—	—
17	1001	20	l_{17}

Таблица 2 Топологический вектор для вершины *B*

Номер	Событие	Индекс	Длина
0	1110	22	l_0
1	1011	19	l_1
2	0111	19	l_2
3	1111	22	l_3
4	0001	21	l_4
5	0101	19	l_5
6	0110	19	l_6
7	0010	25	l_7
8	0011	21	l_8
9	1111	23	l_9
10	1010	26	l_{10}
11	0011	25	l_{11}
12	0010	21	l_{12}
13	1010	20	l_{13}
14	1111	27	l_{14}
15	0001	25	l_{15}
16	0000	—	—
17	1001	20	l_{17}

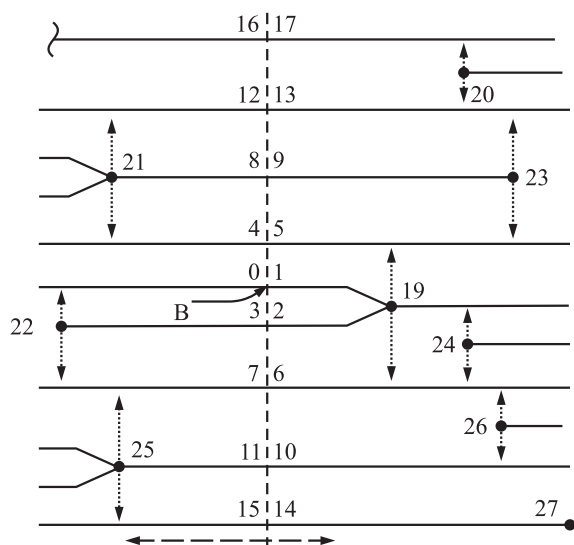


Рис. 5 Сечение для линии с разветвлением

связи 0–17. Топологический вектор вершины *B* представлен в виде табл. 2. Сечения изображены пунктиром. Рисунки показывают *мутацию* окончания 19 в разветвление 19 (из-за грязи) [4]. По сути вершины *A* и *B* скелета одни и те же. События, привязанные к номерам связей, позволяют сопоставить топологию *базовых топологических векторов* [4].

Начало нумерации связей в сечении для вершин *A* и *B* (связи № 0) несущественно, так как при развороте ДИ формируется зеркальное отображение номеров связей в сечении, которое распознается и учитывается при идентификации ДИ. При

глубине сечения $m = 4$ для линии формируется восемнадцать связей $m_t = 18$.

Число топологических векторов конечно. На рис. 4 внизу двунаправленной пунктирной стрелкой указана зона, уместающаяся между частными признаками 19 и 25, в пределах которой для вершины *A* при смещении ее по скелету синтезируется один и тот же *базовый топологический вектор*. Подобная зона указана для вершины *B* внизу на рис. 5. Топологические векторы с равными *базовыми топологическими векторами* объединяют [4]. Их количество при этом на один–два порядка уменьшается до величины $n_2 < 1000$ по (2) при $n_1 < 100$ по (1). Вектор V_i автоматически характеризует отрезок линии, а не частный признак. Поскольку на содержание *базового топологического вектора* деформация изображения практически не влияет, вектор называют топологическим [1].

На этом построение списка (2) завершается.

Сопоставительный анализ [4] и [1] показывает, что [4] имеет ряд преимуществ. *Во-первых*, сечение строится по кривой, отслеживающей направление кривизны линий. *Во-вторых*, при вычислении событий используются проекции от частных признаков, что при их мутациях предотвращает потерю информации. *В-третьих*, нумерация связей разворачивается по спирали без пропуска связей, что позволяет наращивать сечение с сохранением содержания общей части укороченного и удлиненного векторов. *В-четвертых*, при объединении можно выбрать топологический вектор с максимальной величиной минимальной длины связи и отодвинуть сечение от частных признаков. *В-пятых*,

при объединении векторов происходит автоматическое разбиение линий на отрезки, что обеспечивает более подробное описание ДИ в области петель, дельт, завитков и участков повышенной кривизны линий. Это повышает устойчивость и информативность математической модели.

2.3 Список векторов гребневого счета

В дактилоскопии гребневый счет является базой при доказательстве идентичности отпечатков пальцев в суде [2]. Его предписывают измерять как количество линий, уместающихся на прямой между двумя частными признаками. В электронных системах для одного частного признака M_i , как правило, определяют несколько подобных величин.

Согласно [2], из списка L_m выбирают очередной частный признак M_i и принимают его за центр вращения луча сканирования, начальное положение которого совпадает с направлением $\theta_i \in M_i$ по (1). Изображение сканируют, вращая луч сканирования. При встрече луча с $M_k \in L_m$ формируют упорядоченную пару (r_j, n_j) , где $n_j = k$ — номер частного признака M_k и $k \neq i$; r_j — гребневый счет между M_i и M_k ; j — номер связи как число встреченных лучом частных признаков. Количество таких пар не превышает числа $n_1 - 1$.

Эти операции повторяют $\forall M_i \in L_m, i = \overline{1, n_1}$. Геометрические характеристики, связанные с упорядоченной парой и являющиеся производными от параметров частных признаков и угла луча сканирования, для модели избыточны и вычисляются при идентификации. В шаблонах число связей для M_i , как правило, ограничивают, а связи группируют по квадрантам или октантам ориентированной по $\theta_i \in M_i$ системы координат [2].

Основных недостатков гребневого счета, указанных в [1, 2, 5, 6], четыре. *Во-первых*, величина r_j неустойчива, так как при мутации окончания в разветвление или разветвления в окончание величина гребневого счета меняется. *Во-вторых*, в области петель, дельт, завитков и существенной кривизны линий гребневый счет недостоверен из-за механизма измерения по прямой линии. *В-третьих*, группировка величин гребневого счета по квадрантам или октантам приводит к появлению пограничного эффекта из-за перехода частных признаков через границы разбиения плоскости на области. *В-четвертых*, выбор частных признаков, для которых выполняется измерение гребневого счета, зависит от деформации изображения. Это увеличивает ошибки идентификации.

Для преодоления указанных недостатков предлагается список векторов гребневого счета для линий, который синтезируется на основе всех вершин

скелета $F_0^{(m)}$, исключая вершины частных признаков, и списка частных признаков L_m в виде

$$L_r = \{R_i = \{(r_j, n_j) \mid i = \overline{1, n_3}, j = \overline{1, n_4}\}, \quad (3)$$

где R_i — вектор гребневого счета для группы вершин скелета как упорядоченное по индексу j множество упорядоченных пар (r_j, n_j) ; $|L_r| = n_3$ — мощность списка, $n_3 > n_1$; i — индекс как номер вектора; j — номер связи в векторе; n_4 — число связей в векторе, $n_4 < n_1$; r_j — величина гребневого счета, а n_j — номер частного признака по (1) на j -й связи; $n_1 = |L_m|$ по (1).

Опишем процедуру синтеза списка.

В информативной области ДИ выделяют линии и строят скелет, по которому детектируют два типа частных признаков: окончания и разветвления [2]. Направление частного признака указывает на область увеличения числа линий и параллельно касательной к изображению папиллярной линии в малой окрестности частного признака M_i . Каждый M_i нумеруют и описывают координатами, направлением и типом по (1).

Выберем вершину скелета p_g (но не частный признак) и примем ее за центр вращения луча сканирования, начальное направление которого совпадает с направлением линии скелета. Изображение сканируют, вращая луч сканирования. При встрече луча с $M_k \in L_m$ формируют упорядоченную пару (r_j, n_j) , где $n_j = k$ — номер частного признака M_k ; r_j — гребневый счет между p_g и M_k ; j — номер связи как число встреченных лучом частных признаков. Количество таких пар не превышает числа n_1 . В результате одного оборота луча формируется **вектор гребневого счета** $R_g = \{(r_j, n_j) \mid j = \overline{1, n_1}\}$ как упорядоченное по индексу j множество упорядоченных пар (r_j, n_j) . Связи замыкаются по кольцу, и их можно перенумеровать, меняя начальное направление луча сканирования, например $R_g^s = \{(r_l, n_l) \mid l = \overline{1, n_1}\}$, где номер связи $l = (j + s) \bmod (n_1 + 1)$. В этом случае для вершины p_g на основе вектора R_g можно с учетом замыкания связей по кольцу синтезировать $|R_g^s|_{s = \overline{1, n_1}} = n_1$ **эквивалентных векторов гребневого счета**. Для скелета формируется конечный набор векторов гребневого счета. **Векторы гребневого счета**, для которых можно синтезировать одинаковые **эквивалентные векторы гребневого счета**, объединяют [5]. Операция объединения означает выбор, например случайным образом, одного из объединяемых векторов и помещение его в список векторов гребневого счета $L_r = \{R_i \mid i = \overline{1, n_3}\}$ по (3). Число векторов при этом на один—два порядка уменьшается. Вектор R_i для изображения уникален и автоматически характеризует отрезок

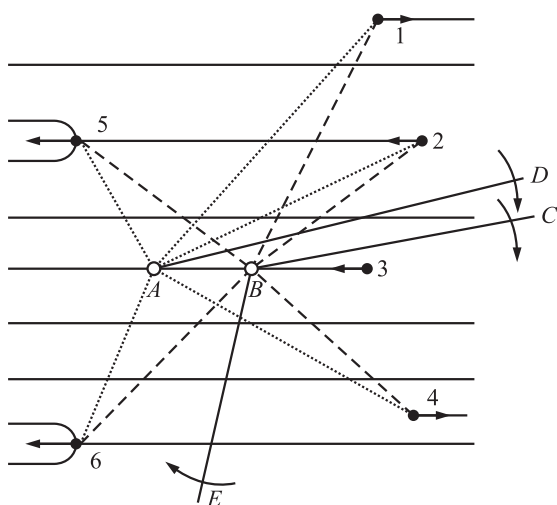


Рис. 6 Гребневый счет линии

линии, а не частный признак. На этом построение списка (3) завершается.

Очевидны следующие достоинства метода.

Во-первых, гребневый счет на одном конце замыкается на вершину скелета, не подверженную мутациям частных признаков, что повышает устойчивость величины гребневого счета r_j . *Во-вторых*, линии в области петель, дельт, завитков и существенной кривизны линий автоматически разбиваются векторами R_i на короткие отрезки, что позволяет по-разному детализировать представление ДИ. Это уменьшает ошибки идентификации. Число связей в векторе можно ограничить, например, по длине луча или плотности распределения частных признаков.

На рис. 6 вершина B выбрана за центр вращения луча сканирования BC . При вращении по часовой стрелке он поочередно встретится с частными признаками 3, 4, 6, 5, 1, 2. Если гребневый счет определяется числом пересеченных линий вдоль путей, показанных на рис. 6 длинным пунктиром, то для последовательности встреченных частных признаков генерируются величины гребневого счета 0, 2, 2, 1, 3, 1. Это можно представить упорядоченным множеством пар $\{(0, 3), (2, 4), (2, 6), (1, 5), (3, 1), (1, 2)\}$, которое для вершины B образует вектор гребневого счета. При другом начальном положении луча сканирования, например BE (см. рис. 6), определяется другое множество пар $\{(2, 6), (1, 5), (3, 1), (1, 2), (0, 3), (2, 4)\}$, которое при замыкании в кольцо идентифицируется с исходным множеством пар $\{(0, 3), (2, 4), (2, 6), (1, 5), (3, 1), (1, 2)\}$. Действительно, для вершины B существует 6 эквивалентных векторов гребневого счета.

При выборе вершины A с помощью луча сканирования AD (на рис. 6 показано его начальное положение), который вращают по часовой стрелке, формируется упорядоченное множество пар $\{(0, 3), (2, 4), (2, 6), (1, 5), (3, 1), (1, 2)\}$. Оно совпадает с одним из эквивалентных векторов гребневого счета для вершины B (независимо от начального направления луча AD). Эти вычисленные векторы гребневого счета для вершины A и вершины B объединяют.

3 Заключение

В работе предложены две математические модели ДИ на основе топологических векторов для линий (2) и векторов гребневого счета для линий (3). Обе модели получены операцией объединения векторов, которые строят для вершин скелета, исключая вершины частных признаков. Операцию объединения выполняют для тех векторов, которые подобно характеризуют некоторую область ДИ. Объединяемые векторы замещают вектором, отражающим свойства скелетной линии или ее отрезка.

Несмотря на различный подход при построении каждой из двух моделей, указывается их общее свойство: модели ориентированы на описание линий, а не точек. Как следствие, такие модели более полно описывают изображение по сравнению с моделями, предлагавшимися ранее [1, 2, 6]. Платой за это преимущество является повышенная дробность отрезков линий, описываемых топологическими векторами и векторами гребневого счета, в области значительной кривизны линий. Однако все это позволяет реализовать механизмы, компенсирующие влияние мутаций частных признаков и деформации изображения на математическую модель и повышающие ее устойчивость.

Дальнейшее направление развития видится в синтезе математических моделей, ориентированных на описание областей изображения с помощью структур для нескольких линий. Такие исследования помогут реализовать механизмы индексирования ДИ, многократно ускоряющие процедуры идентификации изображений отпечатков пальцев.

Литература

1. Patent USA 5631971, Int. Cl. G 06 K 9/00. Vector based topological fingerprint matching / M. K. Sparrow (Winchester). — Field: Jul. 15, 1994; Date of patent: May 20, 1997; US Cl. 382/125. 17 p.
2. Maltoni D., Maio D., Jain A. K. Handbook of fingerprint recognition. — New York: Springer-Verlag, 2003. 348 p.

3. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2006. 1072 с. № 2007118575/09; заявл. 18.05.2007; опубл. 27.06.2009; Бюл. № 18. 13 с.
4. Патент РФ 2321057, МПК G 06 K 9/52, A 61 B 5/117. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Ю. Гудков. — № 2006142831/09; заявл. 04.12.2006; опубл. 27.03.2008; Бюл. № 9. 13 с.
5. Патент РФ 2360286, МПК G 06 K 9/00. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Ю. Гудков. — № 2007118575/09; заявл. 18.05.2007; опубл. 27.06.2009; Бюл. № 18. 13 с.
6. *Sparrow M. K., Sparrow P. J.* A topological approach to the matching of single fingerprints: Development of algorithms for use on latent finger marks // U.S. Dep. Comer. Nat. Bur. Stand. Spec. Pub., 1985. № 500–126. 61 p.
7. *Новиков Ф. А.* Дискретная математика для программистов: Учебник для вузов. 3-е изд. — СПб.: Питер, 2008. 384 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ*

С. Л. Каратеев¹, И. В. Бекетова², М. В. Ососков³, В. А. Князь³, Ю. В. Визильтер³,
А. В. Бондаренко³, С. Ю. Желтов³

Аннотация: Приведено описание программно-аппаратного комплекса для автоматизации процесса получения и контроля цифровых фотографий для биометрических документов: общая структура комплекса, функции, аппаратное и алгоритмическое обеспечение. Алгоритмическое обеспечение комплекса включает: детектор лица, модуль оценки яркостных и цветовых характеристик; детектор открытых/закрытых глаз; детектор очков; детектор бликов и теней; детектор основных элементов лица (рот, нос, брови), детектор поворотов и наклонов головы. Проведено исследование точности используемых алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица по монокулярному цифровому изображению. Для этого разработана специальная методика, основанная на использовании синтезированных ракурсных изображений реальных лиц, реконструированных по результатам трехмерного сканирования.

Ключевые слова: биометрия; персональные документы; обнаружение лиц; бустинг; трехмерное сканирование; трехмерное моделирование

1 Введение

Введение стандарта на цифровые фотографии лица определяет необходимость автоматизации операций контроля качества изображений лиц как непосредственно в процессе получения этих изображений, так и на любом этапе подготовки паспортных, визовых и иных персональных документов.

Для обеспечения согласованности национальных стандартов цифровых фотографий международной организацией по стандартизации были разработаны рекомендации ISO/IEC FCD 19794-5. В России стандартом, определяющим требования к изображениям лиц для биометрических документов, является ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006.

Для автоматизации процесса получения цифровых фотографий, удовлетворяющих основным требованиям и рекомендациям ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006, в ГосНИИАС был разработан описанный в данной статье программно-аппаратный комплекс. Комплекс обеспечивает получение цифровых фотографий лица, а также оценку в реальном времени основных характеристик изображения и параметров лица, что позволяет оператору с мини-

мальными усилиями, не превышающими усилия, необходимые для получения обычной качественной фотографии лица, получать цифровые фотографии лиц, гарантированно удовлетворяющие требованиям данного ГОСТа. Кроме того, мобильный комплекс может быть использован для контроля параметров фотографий лиц, полученных от других источников изображений, — как в цифровом, так и в бумажном виде, предоставляя возможность оценки пригодности фотографий для последующей биометрической обработки.

В данной статье также описаны результаты исследования возможной точности алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица по монокулярному цифровому изображению. Поскольку в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006 на цифровой фотографии лица в биометрических документах допустимый угол поворота изображения лица (головы) вокруг любой из осей координатной системы не должен превышать 5°, задача оценки возможной точности измерения пространственной ориентации головы на цифровом изображении представляет существенный интерес, равно как и задача выбора наиболее надежно работающих косвенных методов оценки углов поворота.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 09-07-13551-офи.ц.

¹ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», goga@gosniias.ru

² ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», irus@gosniias.ru

³ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

2 Требования к цифровым фотографиям для биометрических документов

ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006 определяет основные требования и дополняющие их рекомендации к цифровым изображениям лица и форматам сохранения данных. Общий вид и основные геометрические характеристики фотографии лица приведены на рис. 1.

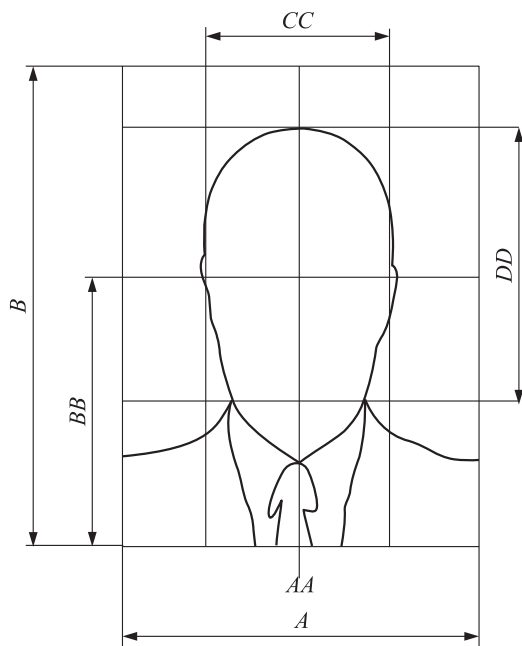


Рис. 1 Основные геометрические характеристики изображения лица

Основные характеристики изображения лица на цифровой фотографии для биометрических документов должны соответствовать следующим требованиям:

- минимальный размер фотографии 525×420 пикселей;
- изображение лица на фотографии должно быть фронтальным и не иметь отклонения относительно основных осей более чем на 5° ;
- соотношение ширины фотографии и ширины головы ($A:CC$) должно быть не менее 7:5 и не более чем 2:1;
- расстояние от нижней границы фотографии до горизонтальной линии, проходящей через центры глаз (BB), должно составлять 50%–70% от высоты полного изображения;
- площадь лица на фотографии должна составлять 70%–80% от площади фотографии;
- цвет и яркость фона должны обеспечивать надежное определение контура головы;
- на изображениях лиц не должно быть световых бликов и сильного затенения;
- на фоне не должно быть теней от головы или каких-либо предметов;
- на изображениях лица не должно быть закрытых глаз, предметов, закрывающих глаза и лицо или искажающих черты лица.

Как видно из вышеприведенных требований, проверка цифровых изображений лица на соответствие требованиям ГОСТа является весьма нетривиальной задачей. Здесь недостаточно визуального анализа фотографии для принятия решения о ее пригодности для использования в документах, удостоверяющих личность. Поэтому при создании мобильного комплекса биометрической регистрации изображений лиц было разработано специализированное программное обеспечение, автоматизирующее процесс создания и контроля фотографий, удовлетворяющих требованиям ГОСТа.

3 Алгоритмическое обеспечение комплекса

На основании измеренных и рассчитанных характеристик изображения лица алгоритмическое обеспечение осуществляет диагностику наличия и причин отклонений от требований ГОСТа и вывод сообщений об этих отклонениях и их возможных причинах.

Для получения оценок основных параметров изображения лица в автоматическом режиме решаются следующие задачи:

- автоматическое обнаружение лица на изображении;
- автоматическое определение контура и оценка параметров лица на изображении;
- автоматическое обнаружение глаз на изображении и оценка координат центров зрачков;
- обнаружение бликов и областей сильной затененности на изображении лица;
- формирование фронтальных и условно-фронтальных цветных и монохромных изображений заданного размера для печати фотографий;
- формирование изображений для систем обмена биометрическими данными.

Алгоритм автоматического обнаружения области лица является вариантом каскадного детектора, обучаемого с помощью метода Adaboost [1, 2]. В алгоритме слабые (weak) классификаторы построены на основе фильтров Хаара, однако отклик формируется с использованием аппроксимации распределения вероятностей амплитуды откликов. Аппроксимация распределения вероятностей откликов представляется в виде гистограммы, которая строится по взвешенным примерам, в результате чего обучение слабых классификаторов проводится на подвыборках одного и того же фиксированного размера, но имеющих различные распределения обучающих изображений. В процессе обучения при формировании каскадного классификатора для каждого последующего классификатора признаковое пространство сокращается за счет устранения признаков, на которых построены предыдущие классификаторы. Поскольку каждый следующий классификатор обучается в другом подпространстве признаков, он обладает уточняющими свойствами и работает по принципу последовательных приближений. Классификатор представляет собой линейную комбинацию слабых классификаторов, число которых варьируется от 5 до 75. Классификаторы объединяются в каскадную структуру, число слоев каскада варьируется от 4 до 8 в зависимости от желаемого уровня соотношения ошибок первого и второго рода. Математическое моделирование показало [3], что при работе по случайно выбранной совокупности тестовых изображений алгоритм автоматического обнаружения изображений лица обеспечивает вероятность правильного обнаружения не менее 0,95 при вероятности ложного обнаружения лица не более 0,01.

Алгоритм автоматического определения контура лица на изображении построен на использовании информации об оттенках кожи человека. Областью интереса алгоритма является фрагмент изображения, классифицированный как лицо каскадным классификатором Adaboost. Каждому пикселю цветного RGB-фрагмента изображения ставится в соответствие вектор параметров цвета (H, S, V) в цветовом пространстве HSV (*Hue*, *Saturation*, *Value* — цветовой тон, насыщенность, яркость) [4]. Распределение оттенков кожи представлено бинарной картой, хранящейся в структуре данных типа «просмотровой таблицы» (Look-Up-Table, LUT). Сегментация фрагмента изображения выполняется путем проверки принадлежности параметров цвета пикселей к кластеру модели оттенков кожи с помощью операции поиска по таблице. Область изображения кожи формируется из пикселей, векторы параметров которых вошли в один из кластеров. Для формирования одной однородной области

пикселей, по цвету соответствующих оттенкам кожи, и удаления мелких областей, линий и отдельных пикселей к изображению применяются такие операции математической морфологии, как дилатация и эрозия. Линии контура лица формируются с помощью алгоритма сплайн-интерполяции к координатам граничных пикселей области кожи лица. Размеры прямоугольника, в который вписаны линии контура лица, являются линейными размерами изображения лица. На рис. 2 приведены результаты работы алгоритма цветовой сегментации изображения лица. Белым цветом отображены пиксели, классифицированные как кожа.

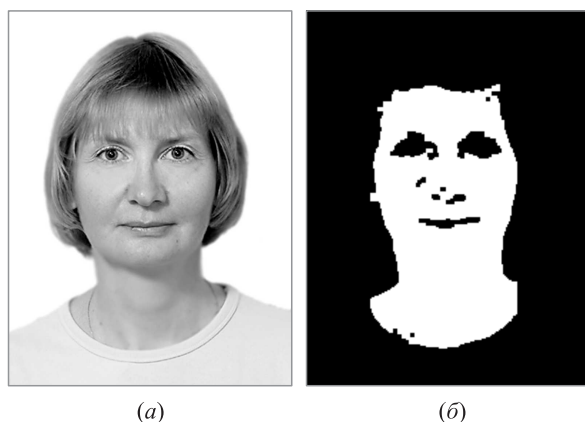


Рис. 2 Пример работы алгоритма цветовой пиксельной сегментации кожи лица: (а) исходное изображение; (б) результат выделения кожи на изображении

Задача обнаружения изображений глаз решается как задача поиска и распознавания на цифровом изображении лица локальных областей, обладающих специфическими характерными для изображений глаз параметрами. Областью интереса алгоритма является часть изображения лица, представляющая собой область ожидаемого расположения глаз. На основе статистической модели проводится предварительная оценка ожидаемого положения и размеров глаз, благодаря чему существенно возрастает вычислительная эффективность алгоритма. Алгоритм автоматического обнаружения области глаз с помощью каскадного классификатора Adaboost определяет координаты глаз в пределах радужной оболочки. Для точной локализации изображений глаз производится поиск координат центров зрачков с использованием операций морфологической фильтрации. Морфологический фильтр выделяет изображение зрачка и радужной оболочки глаза, устраняя при этом шумовые помехи и артефакты изображения, например блики. Координаты центров зрачков определяются путем

свертки изображения с круговым фильтром, подчеркивающим форму зрачка. Проведенное математическое моделирование показало, что при работе по случайно выбранной совокупности тестовых изображений разработанный алгоритм автоматического обнаружения и локализации изображений глаз обеспечивает вероятность правильного обнаружения и локализации не менее 0,95 при вероятности ложного обнаружения глаз не более 0,01. Пример работы алгоритмов обнаружения изображения лица, выделения контура лица и обнаружения глаз представлен на рис. 3.

Определение бликов и областей затенения осуществляется путем анализа пространственных распределений яркостей на последовательности изображений лица, сглаженных окнами различных размеров. При этом бликом считается появление связанной области площадью более 1% от площади лица, в которой все компоненты RGB равны и превышают по амплитуде 250, а признаком затенения является наличие на изображении лица области размером более 10% от площади лица, яркость которой отличается более чем на 10% от яркости симметричной ей области изображения. В связи с тем, что яркостные отличия могут быть вызваны причинами, не связанными с наличием тени, например дефектами лица или небритостью, признак затенения носит рекомендательный характер и не влияет на вывод о соответствии изображения лица требованиям ГОСТа.



Рис. 3 Пример работы алгоритмов обнаружения лица и обнаружения глаз

После проведения основных операций над изображением лица выполняется анализ полученных данных на соответствие ГОСТу. Для этого производится расчет оценок характеристик изображения, производных от геометрических параметров лица, и проверка наличия артефактов на самом изображении. Выполняются следующие операции:

- определение оси симметрии лица;
- определение центровки изображения лица;
- определение угла поворота лица;
- определение угла наклона лица;
- обнаружение очков.

На заключительном этапе интерпретации результатов проводится проверка оцененных параметров изображения на соответствие требованиям стандарта. В случае несоответствия вычисленных параметров изображения требованиям стандарта выдаются рекомендации по изменению условий съемки. В случае формирования условно-фронтальных изображений система выполняет необходимые повороты и перемасштабирование изображения.

4 Конструктивные особенности программно-аппаратного комплекса

Одним из основных приоритетов при выборе конструкции комплекса было требование создания наиболее простой, мобильной и сравнительно дешевой конструкции, состоящей из широкодоступных готовых компонентов.

Программно-аппаратный комплекс включает:

- персональный компьютер;
- цифровой фотоаппарат;
- источник освещения;
- специальный штатив для крепления фотоаппарата и источника освещения;
- планшетный сканер;
- специализированное программное обеспечение.

Комплекс обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- захват (оцифровка) и отображение на мониторе последовательности изображений лица, получаемых от цифрового фотоаппарата в реальном времени;

- сохранение изображений на жестком диске компьютера;
- загрузка и отображение изображений с жесткого диска компьютера;
- обнаружение изображений лиц, близких к фронтальному положению;
- обнаружение глаз, определение контура лица, вычисление осей симметрии;
- определение центровки изображения лица;
- определение размеров изображения головы;
- определение углов наклона и поворота головы;
- обнаружение очков на изображении;
- оценка качества изображения — наличие теней, бликов, оценка цвета, яркости и текстуры фона;
- сравнение измеренных и вычисленных параметров изображения лица с требованиями стандартов;
- индикация результатов сравнения в виде пиктограмм и текстовых сообщений;
- выбор изображения, удовлетворяющего требованиям стандартов (автоматически или вручную);
- вывод изображения на печать в заданном формате.

При установке системы предлагается выбор используемого устройства видеоввода. В качестве такого устройства может использоваться цифровой фотоаппарат, имеющий программный интерфейс с компьютером, или сканер. Кроме этого, в качестве источника данных может использоваться любой внешний носитель информации, содержащий массивы цифровых фотографий в форматах BMP или JPEG. На рис. 4 представлен общий вид комплекса.

Программное обеспечение работает под управлением ОС Windows 2000/XP. Интерфейс программы представляет собой диалоговое окно, в котором помимо изображения текущей фотографии также отображаются результаты проверки требований к изображению лица в виде пиктограмм и текстовой информации. Если полученное изображение имеет отклонения от норм ГОСТа, оператор получает визуальное и звуковое оповещение. При этом изображения на пиктограммах и соответствующие текстовые сообщения подсказывают ему причину ошибки. Каждая из пиктограмм, имеющихся в окне программы, соответствует одному из приведенных выше требований ГОСТа по характеристикам изображения лица и фотографии. Результаты проверки отображаются в виде текстовых сообщений



Рис. 4 Программно-аппаратный комплекс в сборе

в специальном окне. Кроме этого, для каждой обработанной фотографии программа сохраняет результаты всех проверок, выполненных в процессе обработки.

5 Примеры работы комплекса

На рис. 5 показаны примеры нескольких типовых ошибок, возникающих при получении цифровых фотографий для биометрических документов, и результаты обработки этих изображений программным обеспечением комплекса.

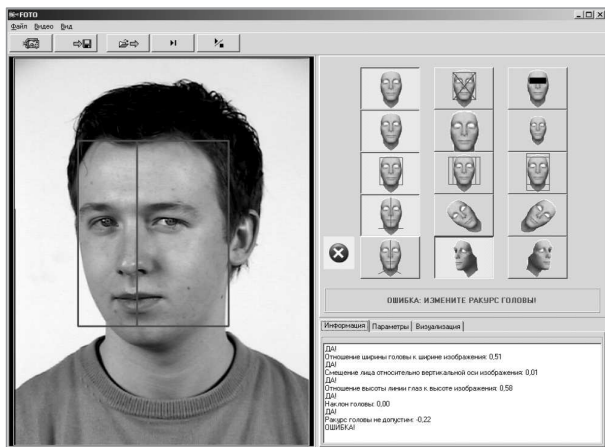
На приведенных рисунках хорошо видны особенности графического интерфейса. При обнаружении отклонений от требований ГОСТа возле ряда пиктограмм, содержащего пиктограмму, соответствующую данному отклонению от требований, появляется информирующий тревожный сигнал красного цвета, сопровождаемый звуковым сигналом. При этом подсвечивается соответствующая пиктограмма и появляется текстовая надпись в информационном окне с указанием ошибки и ее фактического значения (если это возможно). В случае выявления артефактов, неоднозначно трактуемых или нежелательных, но не запрещенных ГОСТом, выводится предупредительная визуальная сигнализация на изображении лица и делается соответствующая запись в информационном окне.

6 Методика оценки точности определения пространственной ориентации головы

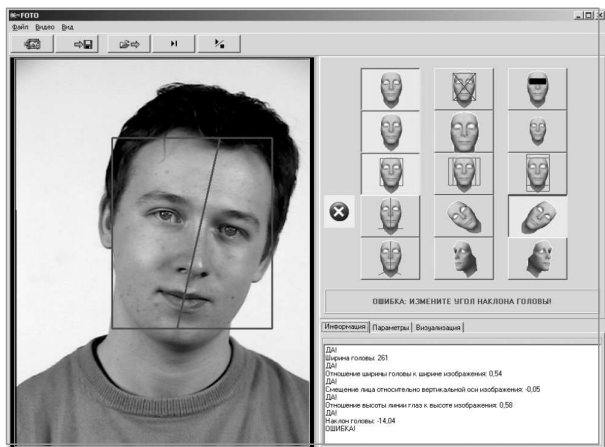
Вообще говоря, построение связанной трехмерной системы координат на основании двухмерного



(а)



(б)



(в)

Рис. 5 Несоответствие требованиям: закрытые глаза (а); поворот головы (б); наклон головы (в)

изображения лица является некорректной обратной задачей. Поэтому в системах подготовки и контроля цифровых фотографий для биометрических документов для определения углов поворота относительно пространственных осей используются косвенные методы оценки углов поворота головы по изменению пропорций лица, как показано на рис. 5, б и в. Вследствие этого важной проблемой является анализ точности определения углов поворота лица, основанного на косвенных методах измерений, и выбор наиболее надежно работающих косвенных методов оценки углов поворота.

Координатная система, рекомендованная в стандарте, представлена на рис. 6. Здесь XYZ — правая система координат с центром в точке, соответствующей кончику носа на изображении лица. Углы поворотов определяются относительно неподвижной системы координат XYZ , соответствующей полнофронтальному изображению лица с углами поворота $(0, 0, 0)$. При этом точного определения фронтального лица в ГОСТе не приводится. Для определения истинных углов поворота изображения необходимо ввести две системы координат: связанную с головой и опорную. Связанная с головой система координат $X_s Y_s Z_s$ определяется двумя ортогональными плоскостями: франкфуртской (или глазнично-ушной) горизонталью — плоскостью $X_s Z_s$, проходящей через верхние края отверстий наружного слухового прохода и нижнюю точку нижнего края левой орбиты, и плоскостью $Y_s Z_s$, перпендикулярной плоскости $X_s Z_s$ и проходящей через ось симметрии лица (центр переносицы, центр губ). Ось Z_s совпадает с линией пересечения плоскостей и направлена от поверхности лица. Опорная система координат XYZ

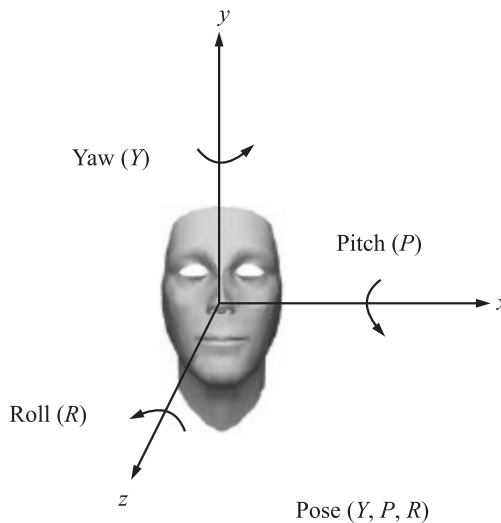


Рис. 6 Система координат для определения углов поворота лица

определяет виртуальную камеру, формирующую двумерное изображение, и представляется следующим образом: ось Y параллельна вертикальной оси плоскости изображения, ось X параллельна горизонтальной оси плоскости изображения, ось Z дополняет до правой системы координат и направлена от модели лица, центр расположен в середине двумерного изображения. Изображение считается фронтальным, когда оси опорной и связанной систем координат коллинеарны.

Для оценки точности определения углов поворота изображения лица была предложена методика, основанная на использовании трехмерных моделей лиц, получаемых путем трехмерного сканирования. Первым шагом в оценке точности является получение трехмерной модели лица человека со строго вертикальным расположением головы. Эта модель считается базовой, и к ней привязывается опорная система координат. На следующих этапах исследования модель поворачивается вокруг осей опорной системы координат на заданные углы и с нее строится проекция на фокальную плоскость. Эта проекция и считается изображением повернутого лица, по которому осуществляются оценки углов поворота изображения. На рис. 7 и 8 показаны трехмерные модели и соответствующие им синтетические изображения фронтального и повернутого лица, созданные по предлагаемой методике.

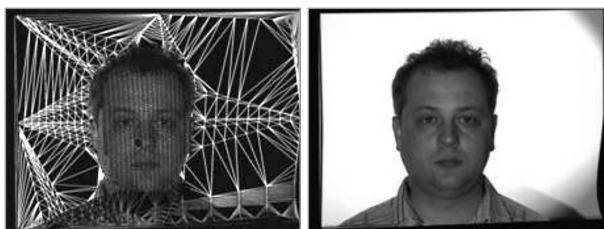


Рис. 7 Трехмерная модель и синтетическое изображение фронтального лица

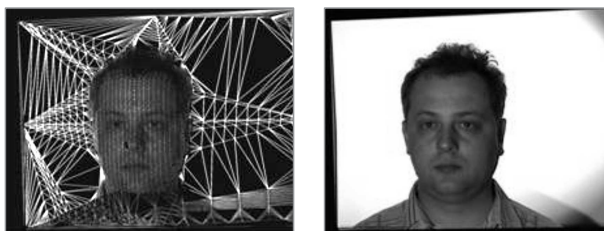


Рис. 8 Трехмерная модель и синтетическое изображение искусственно развернутого лица

Для получения трехмерной модели лица используется специализированный комплекс бескон-

тактных измерений, построенный на фотограмметрических принципах, позволяющих рассчитать координаты заданной точки объекта по двум разноракурсным изображениям объекта, наблюдаемого стереосистемой видеокамер.

Для применения в задачах антропометрии система бесконтактных измерений должна удовлетворять ряду специфических требований, таких как безопасность и комфортность для объекта съемки (человека) и высокая скорость съемки, необходимая для устранения ошибок, вызванных невозможностью долгого сохранения неподвижности человеком. Кроме того, система бесконтактных антропометрических измерений должна измерять координаты поверхности с высоким разрешением и представлять их в форме компьютерной трехмерной модели (предпочтительно текстурированной) для последующего анализа. Изображение специализированного комплекса бесконтактных измерений приведено на рис. 9.



Рис. 9 Специализированный комплекс бесконтактных измерений

Система бесконтактных измерений включает:

- две камеры для технического зрения, предназначенные для захвата черно-белых изображений человека в структурированном свете и расчета трехмерных координат поверхности лица;
- цветную фотокамеру высокого разрешения для получения цветного изображения и фотореалистичного текстурирования трехмерной модели;
- портативный DLP-проектор для создания ПК-управляемого подсвета, обеспечивающего автоматизацию решения задачи стереоотожествления;
- персональный компьютер.

Предварительным этапом работы с фотограмметрическим комплексом бесконтактных измерений является калибровка [5, 6], т. е. оценка параметров модели камер, учитывающих нелинейные

искажения, возникающие при формировании изображений камерой. Калибровка системы позволяет обеспечить высокую точность измерений трехмерных координат объекта.

Внешнее ориентирование системы выполняется для оценки положения и ориентации камер в системе координат, задаваемой специальным тестовым объектом. В результате процедуры ориентирования, выполняемой по снимкам тестового сюжета, определяются координаты и углы поворота камер в заданной системе координат. В дальнейшем координаты точек поверхности объекта рассчитываются в системе координат, заданной ориентированием системы.

Для расчета трехмерных координат поверхности объекта и построения его трехмерной модели необходимо для каждой видимой точки объекта найти ее координаты на левом и правом изображениях (решить задачу стереоотождествления точек левого и правого изображений). Тогда с использованием результатов ориентирования стереосистемы (положения камер) рассчитываются трехмерные координаты точки.

Для автоматизированного решения задачи стереоотождествления соответственных точек изображения с левой и правой камер в системе применяется оригинальный кодированный подсвет объекта, минимизирующий число кадров, использующихся для расчета трехмерных координат поверхности объекта, при сохранении высокой плотности измерений.

Основные технические характеристики системы:

- время сканирования: $\sim 0,5$ с;
- время расчета трехмерной модели: 5 с;
- плотность измерения координат: 10–25 точек на мм^2 ;
- точность измерения пространственных координат: 0,5 мм.

Система выполняет следующие функции:

- сканирование и получение необходимого числа снимков лица для последующего использования при построении трехмерной модели лица;
- построение высокоточной трехмерной модели лица;
- текстурирование полученной трехмерной модели.

Для расчета трехмерных координат поверхности используются последовательности снимков с черно-белых камер, а в качестве текстуры служит цветной снимок высокого разрешения, получаемый с цифрового фотоаппарата. Текстурирование

трехмерной модели выполняется автоматически на основе данных ориентирования цифрового фотоаппарата.

С помощью описанной методики непосредственных трехмерных измерений были получены оценки точности косвенного оценивания параметров трехмерного позиционирования головы человека по монокулярному изображению, осуществляемого в описанной выше системе контроля качества изображений для персональных документов. Полученные оценки точности составляют около 1° для углов поворота относительно осей Z и Y и около 5° для поворотов относительно оси X . Худшая оценка точности при определении угла поворота относительно оси X связана с высокой вариабельностью вертикальных пропорций лица у разных людей.

7 Заключение

В статье представлен программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматизации процесса получения цифровых фотографий, удовлетворяющих основным требованиям и рекомендациям ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006. Комплекс обеспечивает получение как фронтальных, так и условно-фронтальных цифровых фотографий лица, а также оценку в реальном времени основных характеристик изображения и параметров лица, подготовку изображений к печати с заданными размерами и разрешением, формирование изображений в биометрическом формате обмена данными, сохранение изображений в различных графических форматах.

Проведено исследование точности используемых алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица относительно пространственных осей по монокулярному цифровому изображению. Для этого разработана специальная методика, основанная на использовании синтезированных ракурсных изображений реальных лиц, реконструированных по результатам трехмерного сканирования. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования и измерений, собран специализированный комплекс для бесконтактного трехмерного сканирования лиц. С использованием данного комплекса получены трехмерные модели и фотореалистические текстуры тестовых лиц. Полученная в результате оценки точность измерений составляет в среднем около 1° для углов поворота относительно осей Z и Y и около 5° для поворотов относительно оси X . Более низкая оценка точности при определении угла поворота относительно оси X связана с высокой вариабельностью вертикальных пропорций лица у разных людей.

Литература

1. *Freund Y., Schapire R.* A short introduction to boosting // J. of Japanese Society for Artificial Intelligence, 1999. Vol. 14. No. 5. P. 771–780.
2. *Viola P., Jones M.* Robust real time object detection // IEEE ICCV Workshop Statistical and Computational Theories of Vision, July 2001.
3. *Бекетова И. В., Каратеев С. Л., Визильтер Ю. В., Бондаренко А. В., Желтов С. Ю.* Автоматическое обнаружение лиц на цифровых изображениях на основе метода адаптивной классификации AdaBoost // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2007. № 8. С. 2–6.
4. *Albiol A., Torres L., Delp E. J.* Optimum color spaces for skin detection // Conference (International) on Image Processing Proceedings, 2001. Vol. 1. P. 122–124.
5. *Schenk T. F.* Digital photogrammetry. — TerraScience, 1999.
6. *Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I.* Close range photogrammetry, principles, methods and applications. — Whittles, 2006. 510 p.

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛЮДЕЙ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПО ОДЕЖДЕ*

В. С. Конушин¹, Г. Р. Кривовязь², А. С. Конушин³

Аннотация: Предложен новый алгоритм распознавания людей по одежде. Алгоритм основан на классификации случайных регионов с помощью метода случайного леса деревьев (random forest). Главным достоинством предложенного алгоритма является то, что в нем не используется маска человека, поэтому он применим для видеоданных с произвольным сложным фоном. Приведены результаты тестирования алгоритма на собственной выборке видеопоследовательностей, полученных со стационарной камеры видеонаблюдения.

Ключевые слова: распознавание человека по видео; машинное обучение; случайный лес деревьев; вычитание фона

1 Введение

Идентификация личности является одной из самых бурно развивающихся областей компьютерного зрения, что вызвано широкой практической применимостью систем на ее основе. Наиболее надежными методами идентификации личности считаются методы распознавания по отпечаткам пальцев или по радужной оболочке глаза. Однако эти методы относятся к инвазивным — для распознавания человека они требуют его «сотрудничества», например прикладывания пальца к устройству по считыванию отпечатков. Поэтому представляет интерес разработка алгоритма, способного распознавать людей лишь по фотографии/видео.

Для идентификации личности по изображению лица было предложено множество алгоритмов [1]. Однако в связи с тем, что данный подход зачастую не обеспечивает требуемой надежности идентификации, много работ посвящено исследованию дополнительных признаков. В частности, в последнее время все чаще используется информация об одежде, о цвете волос и т.д. Эта информация не является инвариантной для человека — он может перекрасить волосы, сменить одежду. Однако на протяжении небольшого промежутка времени, например одного дня, все эти признаки можно считать неизменными. В данной статье предлагается новый алгоритм распознавания человека по видео, полученному со стационарной камеры (рис. 1).

Статья организована следующим образом. В разд. 2 приведен обзор существующих методов. В разд. 3 описывается предложенный алгоритм. Раздел 4 представляет результаты проведенных экспериментов. Заключение содержит основные результаты статьи.

2 Существующие подходы

Распознавание людей, учитывающее одежду, используется в двух задачах: аннотации изображений/видео и в системах видеонаблюдения.

В алгоритмах аннотации изображений/видео [2, 3] одна из основных проблем — сегментация изображения человека. Современные алгоритмы сегментации не позволяют автоматически получить точную маску объекта на произвольном фоне. Поэтому стандартная схема устроена следующим образом: вначале на изображении находится лицо человека, после чего в качестве области одежды берется прямоугольник под лицом человека. Координаты и размер прямоугольника задаются эвристически. Однако такой прямоугольник содержит лишь небольшую часть от всей области одежды. Более того, в некоторых случаях этот прямоугольник может частично захватить область фона.

В [4] используется более сложный алгоритм сегментации, однако ему тоже для первого приближения необходимо найти лицо человека. Поскольку

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-01-92474-МНКС_а.

¹ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, vadim@graphics.cs.msu.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, gkrivovязь@graphics.cs.msu.ru

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, ktosh@graphics.cs.msu.ru



Рис. 1 Пример роликов из созданной тестовой выборки

современные алгоритмы нахождения лица могут относительно надежно находить лишь фронтальные лица, то в случаях, когда человек ни разу не посмотрит прямо в камеру (или его лицо будет чем-то загорожено), данный подход не работает.

В системах видеонаблюдения [5, 6] маска человека находится с помощью алгоритмов вычитания фона. Однако современные алгоритмы вычитания фона хорошо работают лишь в относительно простых случаях. Например, при установке камеры в хорошо освещенном коридоре. Но, как было обнаружено на нашей тестовой выборке, в более сложных случаях эти алгоритмы могут давать неудовлетворительную маску.

3 Алгоритм

Предлагаемый алгоритм распознавания людей по одежде основан на методе классификации — случайном лесе деревьев [7]. В качестве признаков для классификации используются цвета пикселей набора квадратных регионов, случайным образом выбираемых из кадров видеоролика. В следующих подразделах описываются соответственно процессы обучения классификатора и распознавания людей в видеороликах с помощью обученного классификатора.

3.1 Обучение классификатора

Для обучения алгоритма из всех видеороликов обучающей выборки извлекается большое число (N_{Train}) произвольных квадратных регионов (рис. 2, а). Размер и положение региона, а также номер кадра при этом выбираются абсолютно случайно.

После этого проводится нормализация всех регионов: каждый из них масштабируется до размера $r \times r$, переводится в цветовое пространство HSV и представляется вектором длины $3r^2$.

Так как все видеоролики сняты одной и той же стационарной камерой, становится возможным использование в качестве признаков региона еще и его пространственного положения — сдвига (x, y) и ширины w . Таким образом, получается обучающая выборка из N_{Train} векторов размера $3r^2 + 3$ (рис. 2, б). Каждому элементу выборки ставится в соответствие метка — идентификатор человека с соответствующего видео.

Затем происходит обучение классификатора, который по произвольному региону (развернутому в вектор $3r^2 + 3$) выдает метку человека, присутствующего на видео.

Одним из главных критериев при выборе алгоритма машинного обучения была скорость, так как и размер входной выборки, и длина вектора признаков каждого элемента выборки очень велики.

Поэтому в качестве такого алгоритма был выбран случайный лес деревьев [7]. При его обучении для каждого отдельного дерева выбирается случайная подвыборка из общей обучающей выборки. Используемые в узлах дерева функции — сравнение одной из координат входного вектора с порогом. При этом для скорости выбор координаты и самого порога при обучении происходит абсолютно случайно. Каждое дерево строится до тех пор, пока оно не станет правильно классифицировать свою обучающую подвыборку.

3.2 Распознавание

Для распознавания из тестового видеоролика также извлекается большое число, N_{Test} , случай-

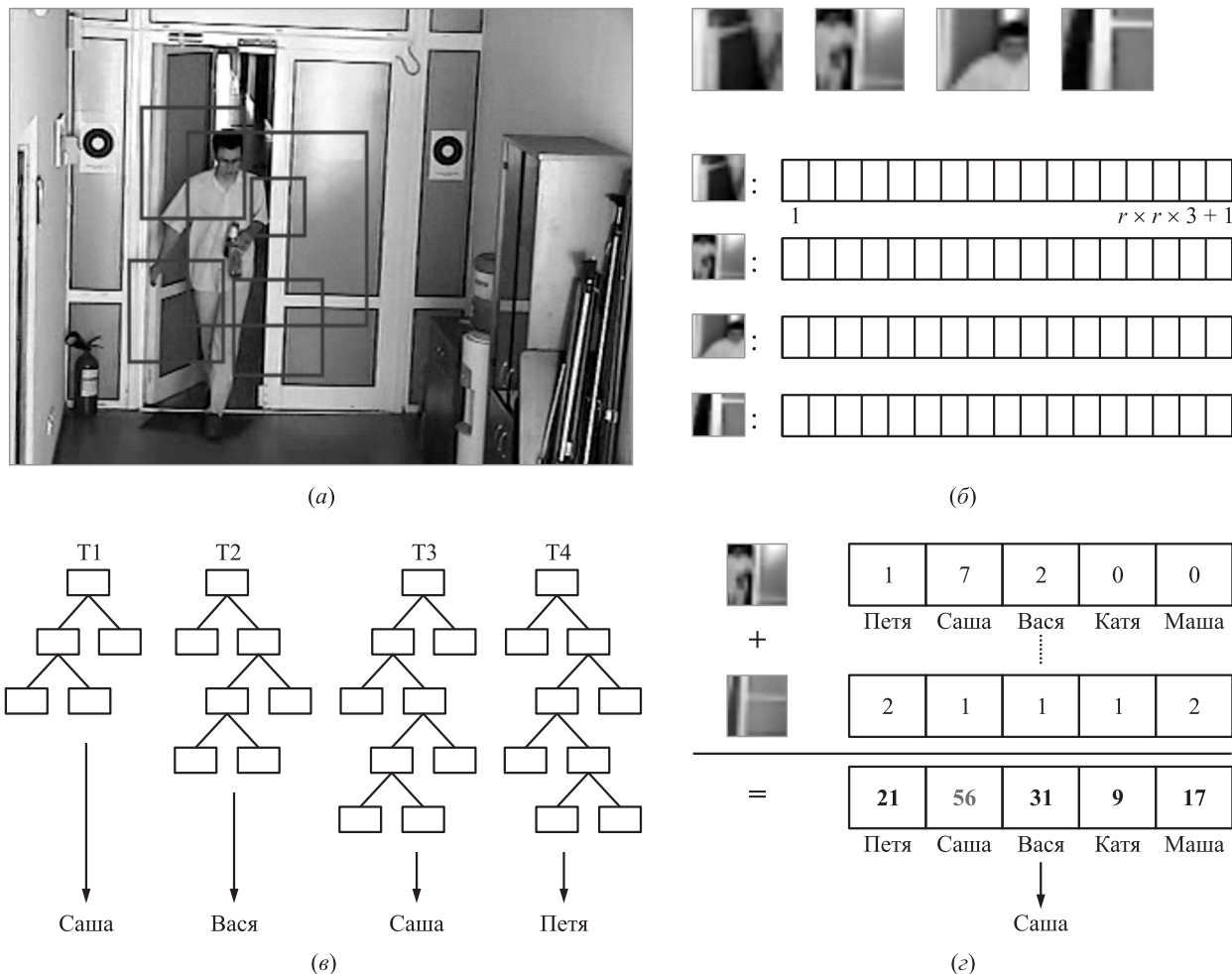


Рис. 2 Схема работы алгоритма: (а) извлечение случайных квадратных регионов из видео; (б) нормализация регионов, вытягивание их в векторы; (в) классификация регионов с помощью случайного леса деревьев; (г) получение финального результата классификации голосованием

но расположенных квадратных регионов, которые проходят описанную выше процедуру нормализации. После этого все они независимо друг от друга подаются на вход обученному классификатору (рис. 2, в). На выходе получается $N_{\text{Test}}K$ меток, где K — число деревьев в обученном классификаторе.

Понятно, что при этом регионы, расположенные полностью в области фона, будут помечены произвольными метками. Распределение неправильных меток в списке будет равномерным. Зато регионы, перекрывающие область объекта (человека), в целом будут классифицированы правильно, поэтому в среднем большинство меток будет соответствовать реальному человеку на видео.

В связи с этим в качестве вероятности каждой метки L можно брать относительное число раз, когда регион из тестового видео был классифицирован как L :

$$p(L) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in X} l(T_k(x_i) = L)}{N_{\text{Test}}K},$$

где X — множество из N_{Test} векторов, а $T_i(x)$ — результат классификации вектора x i -м деревом (рис. 2, г).

4 Эксперименты

4.1 Тестовые данные

Для экспериментов была собрана собственная выборка видеороликов. Эти видеоролики записывались камерой, висящей под потолком и направленной на входную дверь в лабораторию. Запись проводилась в течение 8 дней, всего было собрано 463 видеоролика. Разрешение видео — 352×240 , средняя длительность ролика — около 10 с.

Примеры кадров из собранных видеороликов показаны на рис. 1. Всего на разных видеороликах присутствует 25 разных людей.

Каждый ролик был вручную аннотирован на предмет присутствующих на нем людей (их меток), а также флагом — входит данный человек в комнату или, наоборот, выходит из нее.

Во многих случаях было невозможно разбить общее видео на несколько роликов, в каждом из которых присутствовал бы лишь один человек — например, когда два–три человека одновременно выходят из комнаты. В данной работе такие ролики были удалены из рассмотрения. Стоит отметить, что существующие методы тоже пока не способны обрабатывать такие случаи (надежно сегментировать людей в кадре).

С учетом исключения из рассмотрения таких роликов, в каждый конкретный день людей, появляющихся на двух и более роликах, в среднем было 5–8 человек.

Стоит отметить, что заснятая на видеороликах сцена является очень сложной для алгоритмов вычитания фона. В частности, протестированные алгоритмы [8, 9] давали неудовлетворительные маски объекта. Основными причинами таких результатов были нестабильность фона (открывающаяся дверь, полупрозрачное стекло) и нестабильное освещение. Таким образом, методы, явно опирающиеся на известную маску человека, здесь неприменимы.

4.2 Проведенные эксперименты

При проведении экспериментов использовались следующие параметры: число регионов в обучающей выборке $N_{\text{Train}} = 1\,000\,000$; нормализованный размер региона $r = 16$; число регионов,

извлекаемых из тестового видео $N_{\text{Test}} = 3000$; число деревьев $K = 20$.

Для тестирования использовались два сценария. В первом сценарии задействованы лишь те ролики, на которых человек входит в комнату. В качестве обучающих данных использовались первые два видеоролика каждого человека, остальные попадали в тестовую выборку. Во втором сценарии уже использовались все видеоролики. Обучающими были первые три ролика каждого человека, все остальные — тестовые.

В обоих случаях человек из тестовой выборки присутствовал в обучающих данных.

Результаты работы алгоритма представлены на рис. 3. Демонстрируемые результаты являются суммой результатов за все 8 дней наблюдения.

В качестве метрики качества использовалась метрика « N лучших» (Top N), которая для каждого конкретного n показывала, для какого процента всех роликов правильная метка была среди первых n результатов.

Так как за один день в обучающей выборке могло присутствовать максимум 14 человек, значение метрики при $n \geq 14$ равно 100%.

Для ориентира на графиках приведен результат распознавания в случае, если бы классификация осуществлялась случайно (подбрасыванием монетки).

Из графиков видно, что полученные результаты еще далеки от того, чтобы их можно было надежно использовать в реальной системе. Например, в первом сценарии процент правильно распознанных роликов (т. е. Top $N(1)$) составляет лишь 45%.

Однако следует учитывать сложность входных данных. В частности, человек в один и тот же день

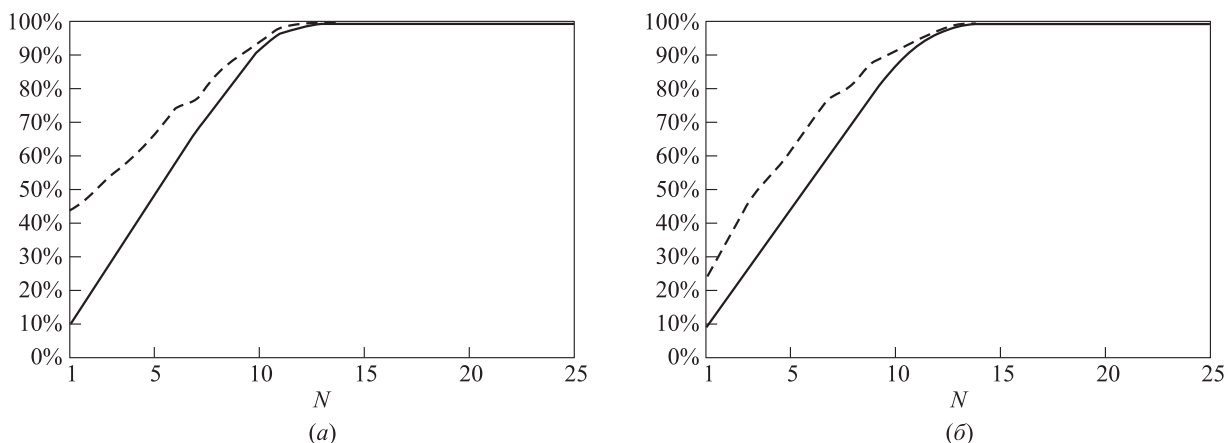


Рис. 3 Результаты работы алгоритма по метрике « N лучших». Штриховой линией отмечен результат работы предложенного алгоритма, сплошной линией — средний результат случайной классификации: (а) учет роликов, на которых человек входит в комнату; (б) учет всех роликов

может появляться на видео как в куртке, так и без нее. А значит, если, скажем, на первых двух (обучающих) роликах он будет в куртке, то распознать его на остальных роликах по используемым признакам будет практически невозможно.

Большую проблему составляет освещение. К концу дня, когда уже темно, но еще не включили свет в комнате, даже человек зачастую не сразу распознает людей на видео.

Во втором сценарии используется тот факт, что во многих случаях цвет и текстура одежды на спине очень похожа на одежду спереди. А значит, есть надежда, что алгоритм, обученный на видео, на котором человек входит, сможет распознавать его же, но когда он выходит, и наоборот. Как видно, пока, к сожалению, при данном сценарии алгоритм сработал значительно хуже, чем в первом.

5 Заключение

В данной статье был предложен новый алгоритм распознавания человека по видео. Основным его преимуществом является то, что он не опирается на маску переднего плана, полученную с помощью алгоритмов вычитания фона, как это делает большинство существующих алгоритмов. Благодаря этому для его обучения достаточно предоставить лишь выборку видеороликов с меткой-идентификатором присутствующего на видео человека. Алгоритм был

протестирован на собственной выборке видеопоследовательностей, полученных с камеры видеонаблюдения.

Литература

1. Zhao W., Chellappa R., Phillips P.J., Rosenfeld A. Face recognition: A literature survey // ACM Computing Surveys, 2003. Vol. 35. No. 4. P. 399–458.
2. Jaffre G., Joly P. Costume: A new feature for automatic video content indexing // RIAO Proceedings, 2004. P. 314–325.
3. Song Y., Leung T. Context-aided human recognition — clustering // ECCV Proceedings, 2006. P. 382–395.
4. Gallagher A., Chen T. Clothing cosegmentation for recognizing people // Proc. of CVPR, 2008. No. 1. P. 1–8.
5. Nakajima C., Pontil M., Heisele B., Poggio T. Full-body person recognition system // Pattern Recognition, 2003. Vol. 36. No. 9. P. 1997–2006.
6. Yoon K., Harwood D., Davis L. Appearance-based person recognition using color/path-length profile // J. Visual Communication Image Representation, 2006. Vol. 17. No. 3. P. 605–622.
7. Geurts P., Ernst D., Wehenkel L. Extremely randomized trees // Machine Learning J., 2006. Vol. 63. No. 1.
8. Wren C., Azarbayejani A., Darrell T., Pentland A. Pfindex: Real-time tracking of the human body // IEEE Trans. PAMI, 1997. Vol. 19. No. 7. P. 780–785.
9. Stauffer C., Grimson W. E. L. Adaptive background mixture models for real-time tracking // CVPR Proceedings, 1999. P. 246–252.

ПОИСК И АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК РАДУЖНОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭРМИТА*

Е. А. Павельева¹, А. С. Крылов²

Аннотация: Предложен алгоритм поиска ключевых точек для распознавания человека по радужной оболочке глаза, основанный на локальном преобразовании Эрмита. Использование для распознавания только ключевых точек радужной оболочки позволяет хранить небольшой объем информации при достаточно хорошем качестве распознавания.

Ключевые слова: биометрия; радужная оболочка глаза; преобразование Эрмита; ключевые точки

1 Введение

Преобразование Эрмита [1] является известным методом, применяющимся для решения биометрических задач [2–4]. Этот локальный метод основан на вычислении сверток функции интенсивности изображения с функциями преобразования Эрмита в каждой точке изображения. При этом в работе [5] показано, что для задачи распознавания по радужной оболочке глаза наиболее информативными являются свертки с двумерной функцией преобразования Эрмита $\varphi_{1,0}$. Также широко известным методом в обработке сигналов является метод моментов Гаусса–Эрмита [2], эквивалентный преобразованию Эрмита с точностью до знаков сверток с нечетными функциями преобразования Эрмита. При этом для решения задач распознавания формируются бинарные матрицы, составленные из знаков сверток в каждой точке, которые затем сравниваются с матрицами из базы данных.

В данной работе на основе преобразования Эрмита предложен метод нахождения ключевых точек текстуры радужной оболочки. Эти точки соответствуют наиболее значимым экстремумам свертки функции интенсивности изображения с функцией $\varphi_{1,0}$.

В разд. 2 дается описание преобразования Эрмита. В разд. 3 приведены некоторые детали использованного метода предобработки изображений радужной оболочки. Раздел 4 описывает алгоритм нахождения ключевых точек радужной оболочки, приведены результаты экспериментов на базе данных CASIA-IrisV3 [6].

2 Преобразование Эрмита

Функции Эрмита определяются как

$$\psi_n(x) = \frac{(-1)^n e^{-x^2/2}}{\sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}} H_n(x),$$

где $H_n(x)$ — полиномы Эрмита:

$$\begin{aligned} H_0(x) &= 1, & H_1(x) &= 2x, \\ H_n(x) &= 2xH_{n-1}(x) - 2(n-1)H_{n-2}(x). \end{aligned}$$

Функции Эрмита являются собственными функциями преобразования Фурье и образуют полную ортонормированную систему функций в пространстве $L_2(-\infty, \infty)$.

Функции преобразования Эрмита (рис. 1) связаны с функциями Эрмита соотношением

$$\varphi_n(x) = \psi_0(x)\psi_n(x) = \frac{(-1)^n e^{-x^2}}{\sqrt{2^n n! \pi}} H_n(x).$$

При вычислениях они являются одновременно локализованными в координатном и частотном пространствах. Так как ψ_n — ортонормированная система функций, то

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_0(x)\psi_n(x) dx = 0 \quad \forall n > 0,$$

т. е. функции $\varphi_n(x)$ имеют среднее нулевое значение для номеров $n > 0$. Это свойство очень важно

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-07-00433-а).

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, paveljeva@yandex.ru

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, kryl@cs.msu.ru

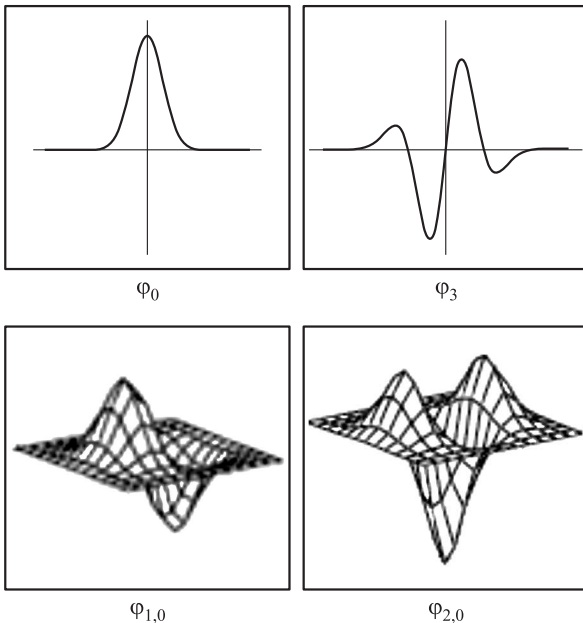


Рис. 1 Примеры функций преобразования Эрмита

для методов, использующих знаки сверток с такими функциями.

Двумерные функции преобразования Эрмита являются произведением одномерных функций:

$$\varphi_{n,m}(x, y) = \varphi_n(x)\varphi_m(y).$$

Преобразование Эрмита для изображения определяется в каждой точке (x_0, y_0) значениями сверток функции интенсивности изображения $I(x, y)$ с функциями преобразования Эрмита $\varphi_{m,n}(x, y)$ для выбранного конечного набора индексов (m, n) [1, 4]:

$$\begin{aligned} M_{m,n}(x_0, y_0) &= (I(x, y) * \varphi_{m,n}(x, y))(x_0, y_0) = \\ &= \iint_G I(x, y)\varphi_{m,n}(x_0 - x, y_0 - y) dx dy, \end{aligned}$$

где G — область сосредоточения функции $\varphi_{m,n}$.

3 Предобработка изображений и контроль наличия века в области параметризации

Алгоритм нахождения радужной оболочки на изображении глаза описан в [5, 7] и основывается на поиске максимального скачка средней интенсивности вдоль круговых контуров изображения. После локализации радужная оболочка глаза переводится в прямоугольное нормализованное изобра-



Рис. 2 Нормализация радужной оболочки

жение. Для дальнейшей параметризации в работе используется только область, включающая правую верхнюю четверть нормализованного изображения, на которую, как правило, не попадают ресницы и веки [5] (рис. 2).

Тем не менее для определения наличия века в этой области параметризации используется специальный алгоритм. Ищется максимум вертикальной производной яркости изображения

$$\max_y \sum_x \left| \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right|$$

в области $[x_p - r/2, x_p + r/2][y_p + r, y_p + (R + r)/2]$, выделенной на рис. 3. Здесь (x_p, y_p) — центр зрачка, r и R — радиусы границ радужной оболочки. Если это значение больше порогового, то считается, что нижнее веко попало в область параметризации.

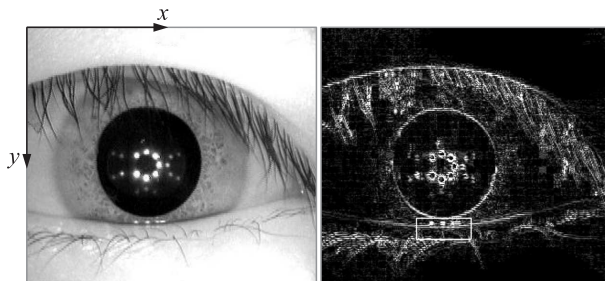


Рис. 3 Изображения $I(x, y)$ и $I'_y(x, y)$

4 Метод ключевых точек параметризации радужной оболочки

В работе [5] показано, что наиболее информативными номерами двумерных функций преобразования Эрмита $\varphi_{m,n}(x, y)$ для задачи идентификации по радужной оболочке являются номера (1, 0), (1, 1), (2, 0) в указанном порядке. Поэтому для параметризации данных радужной оболочки в данной работе была выбрана функция преобразования Эрмита $\varphi_{1,0}(x, y)$.

Рассмотрим в каждой точке области параметризации величину $F_1 = M_{1,0}$. В качестве кода радужной оболочки (ключевых точек) рассматри-



Рис. 4 Область параметризации радужной оболочки с кодом радужной оболочки

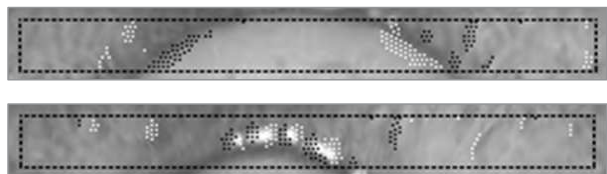


Рис. 5 Примеры работы алгоритма выделения ключевых точек для изображений с наложением века и бликов на область параметризации

ваются N ($N = 50, 100, 150, 200$) точек, разбитых на две группы: $N/2$ точек с максимальными значениями F_1 , удаленных друг от друга не менее чем на 2 пикселя, и аналогично $N/2$ — с минимальными значениями F_1 . Пример кода радужной оболочки для $N = 150$ ключевых точек приведен на рис. 4. Черными точками обозначены ключевые точки с максимальными значениями F_1 , белыми — с минимальными. На рис. 4 также обозначена граница возможных значений точек кода, отстоящая от краев области параметризации на полуширину области сосредоточения функции φ_1 .

Отметим, что этот метод эффективен только для изображений без наложения века на область параметризации, так как в области века и бликов большинство детектируемых точек не является точками радужной оболочки (рис. 5).

При идентификации по радужной оболочке используются матрицы сравнения ключевых точек. Для построения матрицы сравнения область параметризации разбивается на непересекающиеся блоки размера 3×3 . Если в блок не попадает ни одной точки кода, то ему соответствует значение 0. Если в блок попадает хотя бы одна черная (белая) точка кода, то соответствующее значение матрицы сравнения равняется 1 (–1), если и черная, и белая, то значение равняется 2. При сравнении двух матриц считается, что соответствующие блоки равны, если в них попали точки одного цвета (табл. 1).

Чтобы алгоритм был устойчив к поворотам глаза (поворот глаза соответствует циклическому сдвигу всего нормализованного изображения), сравниваются матрицы точек уменьшенного размера. Границы такой урезанной матрицы показаны на рис. 6 и сдвигаются у исследуемого изображения в обе стороны до границ возможных значений точек ко-

Таблица 1 Сопоставление значений матриц сравнения: «+» означает, что блоки считаются равными, «–» — различными

	0	1	–1	2
0	+	–	–	–
1	–	+	–	+
–1	–	–	+	+
2	–	+	+	+



Рис. 6 Области сравнения матриц кодов радужных оболочек

да. В данной работе учитываются углы поворота от -10° до 10° .

Алгоритм параметризации радужной оболочки по ключевым точкам протестирован на базе данных CASIA-IrisV3 [6], содержащей 2655 изображений глаз. Результаты работы алгоритма приведены в табл. 2 и на рис. 7. Здесь CRR (Correct Recognition Rate) — вероятность верного распознавания.

Таблица 2 Результаты работы алгоритма ключевых точек

Число ключевых точек N	Число неверных ближайших изображений (из 2655)	Неверные из-за наложения века и бликов	CRR, %
200	23 = 18 + 5	18	99.81
150	36 = 30 + 6	30	99.77
100	58 = 41 + 17	41	99.35
50	135 = 65 + 70	65	97.36

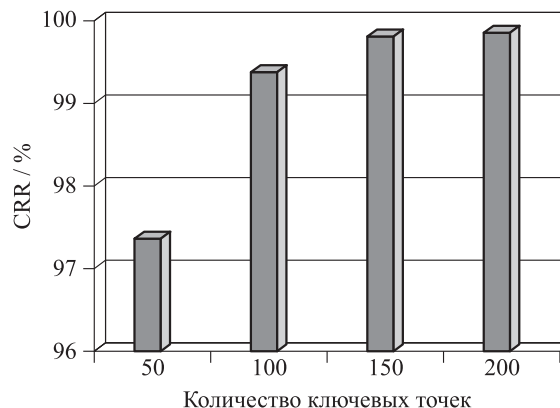


Рис. 7 График зависимости CRR от числа взятых ключевых точек

5 Заключение

В работе предложен алгоритм идентификации человека, использующий ключевые точки радужной оболочки глаза, найденные локальным методом преобразования Эрмита. Этот алгоритм позволяет получать достаточно хорошие результаты распознавания даже при небольшом объеме хранимой информации. Он достаточно перспективен для использования в мультибиометрических системах распознавания.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Литература

1. *Martens J. B.* The Hermite transform-theory // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1595–1606.
2. *Ma L., Tan T., Zhang D., Wang Y.* Local intensity variation analysis for iris recognition // Pattern Recognition, 2004. Vol. 37. No. 6. P. 1287–1298.
3. *Wang L., Dai M.* Extraction of singular points in fingerprints by the distribution of Gaussian–Hermite moment // IEEE 1st Conference (International) DFMA Proceedings, 2005. P. 206–209.
4. *Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B.* The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // LNCS, 2008. No. 5197. P. 86–93.
5. *Павельева Е. А., Крылов А. С., Уимаев О. С.* Развитие информационной технологии идентификации человека по радужной оболочке глаза на основе преобразования Эрмита // Системы высокой доступности, 2009. № 1. С. 36–42.
6. База данных CASIA-IrisV3. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>.
7. *Krylov A. S., Pavelyeva E. A.* Iris data parametrization by Hermite projection method // GraphiCon'2007 Conference Proceedings, 2007. P. 147–149.

СОСТАВЛЕНИЕ СУБЪЕКТИВНОГО ПОРТРЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННОГО МОРФИНГА И КВАЛИМЕТРИЯ МЕТОДА*

В. И. Протасов¹

Аннотация: Приведено описание нового метода составления субъективного портрета группой свидетелей, базирующегося на генетических алгоритмах. На основе модели «виртуального свидетеля» определяется точность составления субъективного портрета. Образ лица, «вспоминаемого» виртуальным свидетелем, моделируется набором компонент вектора, определяющего трехмерное изображение лица. Модель описывает художественные способности человека к рисованию лиц и способности к сравнению разных лиц по степени их похожести на оригинал. Введена характеристика, описывающая утомляемость свидетеля при длительной работе по распознаванию и сравнению лиц. Полученная таким образом модель позволяет производить настройку сетевого метода эволюционного морфинга для получения оптимального результата и его квалиметрию.

Ключевые слова: субъективный портрет; эволюционный морфинг; генетические алгоритмы; принятие решений; квалиметрия

1 Введение

Одна из наиболее сложных задач в современной криминалистике — составление субъективного портрета (фоторобота) человека, увиденного и запомненного с разной степенью точности одним или несколькими свидетелями. Развитие современных информационно-коммуникационных технологий привело к принципиально новым возможностям решения этой проблемы.

«Согласно теории отражения, мысленный образ предмета формируется в сознании под воздействием самого предмета. Человеческий мозг обладает способностью воспринимать внешнюю информацию о предметах через органы чувств (в нашем случае предмет — это некий человек, его внешний облик, а орган восприятия — глаза), и длительное время удерживать в памяти представление о нем. . . В связи с тем, что мысленный образ может забываться и он имеет место только в сознании ограниченного числа лиц (свидетели, очевидцы или потерпевшие), необходимо как можно быстрее закрепить его с помощью других средств и методов — «актуализировать» в материальной форме» [1]. Известно, что существующие методы составления субъективного портрета с использованием компьютерных технологий или с помощью полицейских художников не всегда дают удовлетворительные результаты.

В настоящей работе представлена новая информационная технология генетического консилиума

(ГК) [2–8], предназначенная для составления субъективного портрета коллективом свидетелей или одиночным свидетелем с использованием эволюционного морфинга лица. В основу технологии положены генетические алгоритмы. Для составления объемных фотороботов используется программа FaceGen Modeller [9].

Технологию ГК можно представить следующим образом. Свидетели, основываясь на своих воспоминаниях, составляют в первом приближении свои варианты фотороботов и отправляют их на сервер. Сетевая программа предъявляет каждому свидетелю по два варианта фотороботов, полученных на первой итерации его коллегами. Свидетели с помощью специальной процедуры скрещивают эти портреты, получая варианты-потомки. Далее они подвергают мутации лучший из них и выбирают из нескольких мутированных вариантов один, наиболее похожий на оригинал. Эти варианты вновь отправляются на сервер, и цикл итераций повторяется до тех пор, пока в эволюционирующей популяции не окажутся варианты-близнецы, в наибольшей степени похожие на оригинал.

Описанные в [3–8] эксперименты показали принципиальную работоспособность нового метода составления субъективного портрета с использованием трехмерного морфинга лица группой свидетелей и одиночным свидетелем. Было показано, что итерационные процессы получения консоли-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-07-00447-а.

¹ Институт физико-технической информатики, Протвино, protonus@yandex.ru

дированного решения сходятся достаточно быстро и качество составления фоторобота на заключительной итерации существенно лучше качества вариантов первой итерации. Аналогичные результаты были получены независимо от этих работ группой шотландских исследователей [10]. Они предложили и использовали технологию эволюционного морфинга, в значительной степени повторяющую технологию ГК.

Недостатками существующих методов составления субъективных портретов является то, что неизвестно, с какой точностью коллектив свидетелей или одиночный свидетель могут восстановить исходный портрет. Даже в случае, когда свидетели имеют достаточно времени для запоминания лица некоего человека, неясно, с какой точностью они смогут сделать это.

В настоящей работе впервые предпринята попытка осуществить квалиметрию процесса составления субъективного портрета коллективом или одиночным свидетелем с использованием технологии эволюционного морфинга. Для достижения этой цели было необходимо разработать модель виртуального свидетеля. Модель должна полностью замещать реального свидетеля, так чтобы результаты деятельности виртуального свидетеля были неотличимы от результатов деятельности реального свидетеля с такими же параметрами.

2 Модель виртуального свидетеля

Виртуальный свидетель представляет собой программу, содержащую ряд параметров, характеризующих основные свойства реального свидетеля, пытающегося восстановить и зафиксировать портрет ранее виденного им человека. В первом приближении эти свойства можно описать тремя параметрами. К ним относятся величина K_a , характеризующая способности свидетеля как художника, и величины K_0 и α , описанные ниже и характеризующие способности свидетеля к распознаванию лиц. Образ лица, «вспоминаемого» виртуальным свидетелем, моделируется набором n относительных величин некоторого вектора G_i , $i = 1, 2, \dots, n$. Эти величины однозначно определяют трехмерное изображение лица в виде полигональной модели. Так, в программе FaceGen Modeller для описания симметричного лица без текстуры $n = 50$. Если ставить перед виртуальным свидетелем задачу по хранящемуся у него образу восстановить трехмерный портрет лица, характеризующегося вектором G_i , то программа, моделирующая виртуального свидетеля, восстановит искаженный вектор-образ U_i этого лица

$$U_i = G_i [1 + K_a \chi (1 - 2\xi)], \quad (1)$$

где χ и ξ — случайные числа от 0 до 1. Случайное число χ отражает особенность свидетеля каждый раз рисовать разные портреты, отличающиеся от оригинала, но с постоянным, характеризующим данного свидетеля коэффициентом сходства.

Эксперименты показали, что такая модель достаточно реалистично описывает художественные способности человека. Коэффициент $K_a = 0$ соответствует идеальному художнику, с уменьшением изобразительных способностей величина коэффициента растет.

Для оценки качества «нарисованного» портрета введем два коэффициента K_R и K_S следующим образом:

$$K_R = \frac{1}{n(G_{\max} - G_{\min})} \sum_{i=1}^n |U_i - G_i|; \quad (2)$$

$$K_S = 1 - K_R. \quad (3)$$

Здесь K_R — коэффициент различия двух портретов, G_{\max} — максимальное и G_{\min} — минимальное из возможных значений вектора G_i , K_S — коэффициент сходства.

По аналогии с коэффициентом художественных способностей вводится коэффициент способности к распознаванию лиц K_0 . Этот коэффициент определяется из эксперимента по распознаванию свидетелем ряда сгенерированных программой лиц, в разной степени похожих на искомое.

При длительных экспериментах, когда перед свидетелем проходит длинная череда распознаваемых лиц, он начинает ошибаться и его способность к распознаванию снижается. Эту способность свидетеля можно охарактеризовать величиной «утомляемости» α , определяемой из выражения

$$\alpha = -\frac{1}{N} \ln \frac{K_{0N}}{K_0}, \quad (4)$$

где K_{0N} — значение коэффициента K_0 после предъявления N портретов в течение одного сеанса экспериментов.

Типичные значения величин коэффициентов K_a , K_0 и α , полученные из экспериментов с разными людьми, приведены в табл. 1.

Таблица 1 Значения коэффициентов K_a , K_0 и α

Коэффициент	Минимальное значение	Максимальное значение
K_a	0,02	0,3
K_0	0,92	0,99
α	0,00003	0,00009

3 Метод настройки параметров генетического консилиума

Наряду с получением аппарата для измерения способностей свидетелей к процессу составления субъективного портрета создание модели виртуального свидетеля преследует еще одну цель. Это разработка механизма настройки параметров ГК, реализующего эволюционный морфинг, на достижение наилучшего результата при работе конкретной группой свидетелей.

На первом этапе свидетели тестируются на предмет их способностей к составлению субъективного портрета. Им предъявляются тестовые примеры, при работе над которыми измеряются значения их художественных и распознавательных способностей. Определяются также значения параметров утомляемости. Эти цифры вводятся в программу настройки параметров эволюционного морфинга, и программа при настройке параметров метода на оптимальные значения работает с виртуальными свидетелями, обладающими свойствами реальных. На втором этапе, отделенном от первого временем отдыха, свидетели приступают к работе по составлению искомого портрета.

Анализ задачи получения оптимальных параметров ГК при работе группы свидетелей показывает, что оптимизируемая величина (степень соответствия составленного экспертами портрета

исходному) в пространстве поиска оптимальных параметров не может быть выражена через них в явном виде. Поэтому для проведения оптимизации были выбраны генетические алгоритмы. Параметрами настройки эволюционного морфинга являются величины КРМ — число «прогонов» программы для получения установившихся значений коэффициентов сходства, NC — количество скрещенных портретов, выдаваемых программой виртуальному свидетелю для выбора, NM — число мутированных портретов из одного выбранного портрета после скрещивания, PM — параметр мутации, или относительная величина изменения генов выбранного портрета. На рис. 1 приведена блок-схема программы настройки этих параметров.

Данный подход позволяет существенно сократить время работы коллектива свидетелей по составлению субъективного портрета, поскольку генетическая процедура настройки параметров эволюционного морфинга (нахождения оптимальной стратегии генетического консилиума) приспособливает этот метод к конкретным особенностям реальных свидетелей.

4 Экспериментальная часть

Для проверки предложенного метода настройки параметров ГК с использованием модели вир-

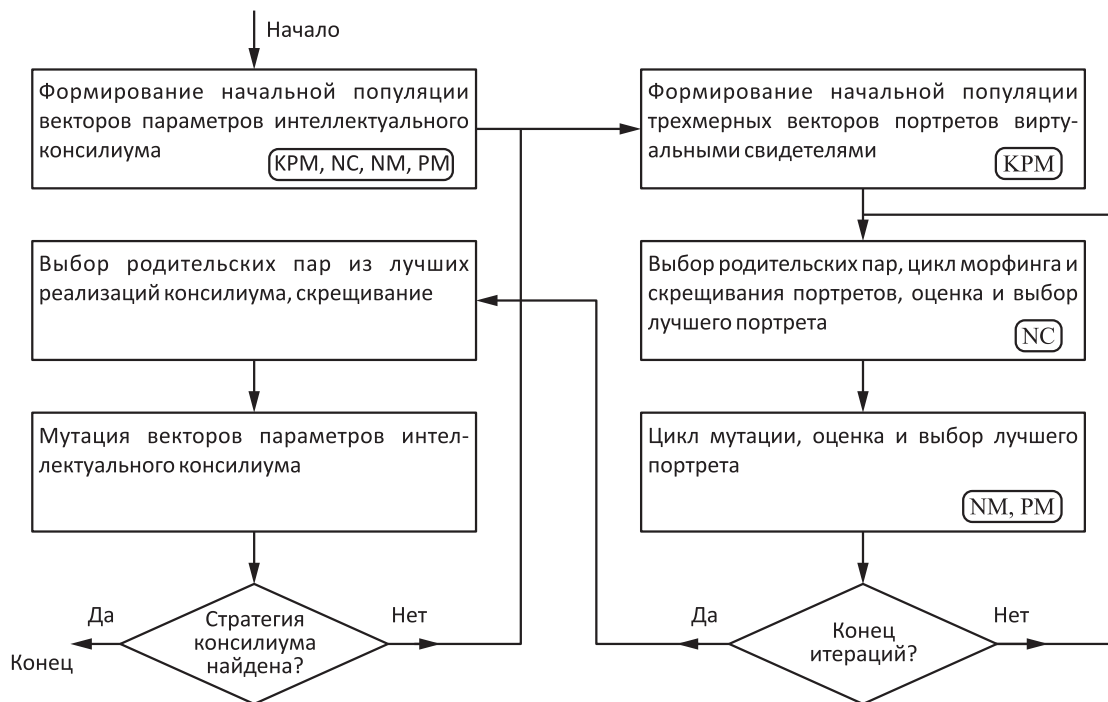


Рис. 1 Блок-схема настройки параметров эволюционного морфинга

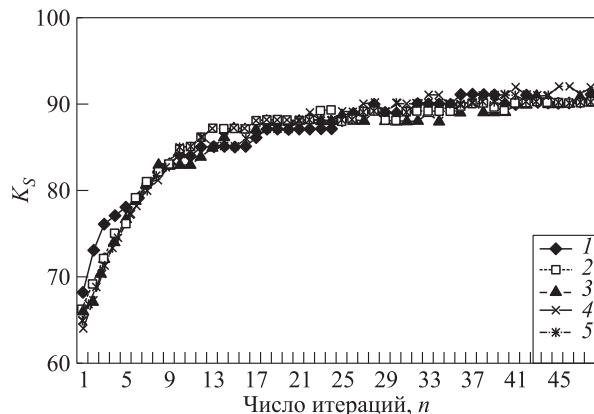


Рис. 2 Сходимость метода эволюционного морфинга при пяти различных начальных приближениях

туального свидетеля были проведены три группы экспериментов.

В первой группе экспериментов проверялась сходимость результатов составления субъективного портрета с использованием ГК независимо от начальных условий — виртуальным свидетелям были заданы низкие коэффициенты художественных способностей. На рис. 2 приведены результаты сходимости метода для группы из девяти виртуальных свидетелей при пяти различных начальных приближениях. Несмотря на то что коллективы виртуальных свидетелей «стартовали» исходя из популяций портретов с низкими значениями K_S , они неизменно получали лучшие результаты.

Во второй группе экспериментов с виртуальными свидетелями осуществлялась проверка влияния параметров настройки ГК на качество восстанавливаемого портрета.

Для коллектива из девяти виртуальных свидетелей с известными параметрами K_a , K_0 и α было испытано большое число вариантов составления портретов для разных наборов параметров эволюционного морфинга КРМ, NS, NM и PM. Наблюдалось значительное влияние параметров ГК на конечный результат.

Из анализа этих экспериментов был сделан вывод о том, что настройка параметров ГК может существенно повысить качество составления субъективного портрета.

В третьей группе экспериментов проверялась работоспособность метода настройки ГК и качество его работы с реальными свидетелями. В одном из экспериментов, результаты которого приведены ниже, были предварительно измерены способности пяти свидетелей. Способности свидетелей характеризовались коэффициентами $0,03 < K_a < 0,12$,

$0,93 < K_0 < 0,98$ и $4 \cdot 10^{-5} < \alpha < 7 \cdot 10^{-5}$. С использованием полученных значений была проведена настройка метода ГК.

Затем реальным свидетелям на непродолжительное время были предъявлены фотографии в фас и в профиль неизвестного им лица (рис. 3, а). Далее свидетели с использованием ГК, настроенного на их способности, составляли субъективный портрет. Усредненный результат по пяти свидетелям после первой итерации с $K_S = 0,77$ приведен на рис. 3, б. На рис. 3, в приведены результаты составления субъективного портрета этой группой. Для составления субъективного портрета с $K_S = 0,92$ потребовалось всего 6 итераций.

Метод эволюционного морфинга, применяемый шотландскими исследователями в [10], отличается тем, что свидетели при проведении эволюционного морфинга работают поодиночке. При этом в качестве окончательного результата используется усредненный портрет. В предложенном же методе свидетели работают в составе ГК совместно, в результате чего возникает синергетический эффект усиления интеллекта [4], а составленные субъективные портреты обладают большей схожестью с оригиналом.

С использованием коллектива виртуальных свидетелей была проведена сравнительная проверка метода ГК и шотландского метода. Для приведенного выше случая величина коэффициента сходства K_S составила, как было показано, 0,92, в то время как для метода, описанного в [10], $K_S = 0,86$.

Эксперименты с различными коллективами виртуальных свидетелей и исходными портретами показали, что коэффициенты сходства у шотландского метода лучше, как и следовало ожидать, чем усредненные коэффициенты после первой итерации, но всегда хуже, чем в ГК после шести итераций.

Здесь следует отметить, что метод шотландских исследователей принят на вооружение английской полицией. Было бы интересно провести сравнительный анализ двух методов в реальных условиях криминалистической практики.

5 Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- разработан и исследован новый метод составления субъективного портрета, основанный на применении эволюционного морфинга и модели виртуального свидетеля;

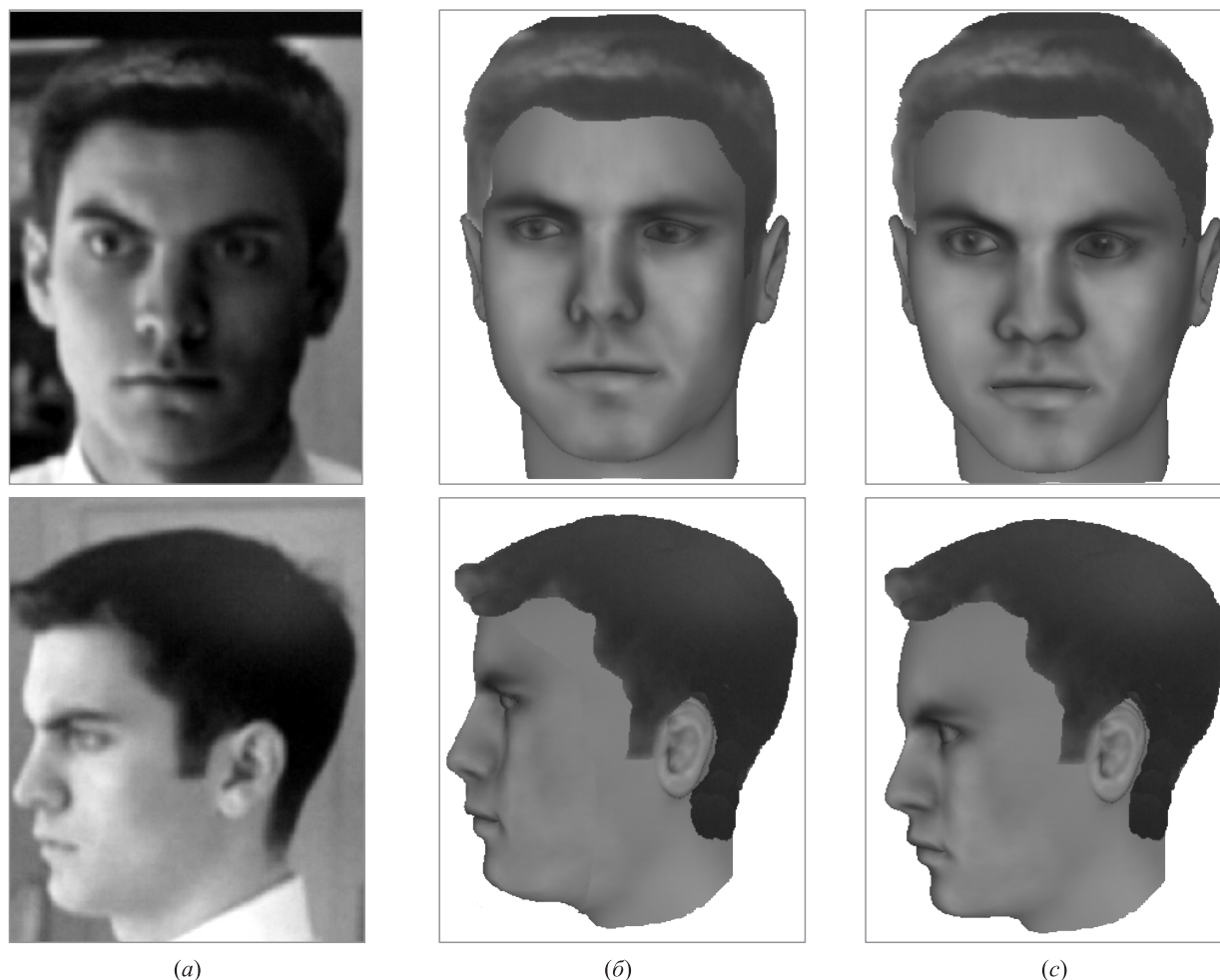


Рис. 3 Результаты составления субъективного портрета группой из пяти свидетелей методом настраиваемого эволюционного морфинга

- использование модели виртуального свидетеля позволяет проводить тестирование способностей свидетелей к составлению субъективного портрета, настраивать параметры метода на получение оптимальных результатов и осуществлять квалиметрию метода;
- показано, что настройка этих параметров для конкретного состава свидетелей позволяет улучшить качество субъективного портрета и определить точность его составления;
- использование модели виртуальных свидетелей позволяет сравнивать методы составления субъективных портретов, применяемые разными авторами.

Направлением дальнейших исследований является апробация метода эволюционного морфинга в реальных условиях криминалистической практики.

Литература

1. *Муравев-Витковский А. В.* Габитоскопия. <http://www.expert.aaanet.ru/rabota/gabito.htm>.
2. *Протасов В. И., Панфилов Д. С., Здоровеюцев Ю. Ю.* Генерация фоторобота с помощью сетевого человеко-машинного интеллекта // Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные многопроцессорные системы ИМС-99». — Таганрог, 1999. С. 106–107.
3. *Протасов В. И.* Генерация новых знаний сетевым человеко-машинным интеллектом. Постановка проблемы // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение, 2001. № 7–8.
4. *Протасов В. И.* Метасистемный эффект самоорганизации интеллекта более высокого уровня из искусственных и естественных компонентов // Сб. научных трудов IV Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2002». — М., 2002. С. 33–40.

5. *Протасов В. И.* Тестирование гибридного человеко-машинного интеллекта на шахматных задачах // Материалы международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект 2002». — Казивели, Крым, 2002. С. 348–353.
6. *Шустов Е. В., Протасов В. И., Витуска Н. И.* Решение задачи формирования инвестиционного портфеля кластером компьютеров с использованием метода «двухступенчатого усиления интеллекта» // Российский экономический Интернет-журнал, 2003. <http://www.e-rej.ru/Articles/2003/Invest.pdf>.
7. *Протасов В. И., Витуска Н. И., Шустов Е. В.* Решение многокритериальной задачи назначений методом генетического консилиума // Российский экономический Интернет-журнал, 2003. <http://www.e-rej.ru/Articles/2003/Council.pdf>.
8. *Протасов В. И., Дружинин А. А., Михайлов Л. В.* Методика восстановления субъективного портрета коллективом свидетелей с использованием 3D-морфинга // Программные продукты и системы, 2007. № 1(77). С. 21–24.
9. FaceGen Modeller 3.1. <http://www.facegen.com/modeller.htm>.
10. *Frowd C. D., Hancock P. J. B., Carson D.* EvoFIT: A holistic, evolutionary facial identification technique for creating composites // Association for Computing Machinery Transactions on Applied Psychology, 2004. Vol. 1. P. 1–21.

ON-LINE INFORMATION MODEL BUILDING OF THE EARTH POLE MOTION BY LINEAR AND LINEARIZED FILTERS

I. N. Sinitsyn¹, V. I. Sinitsyn², E. R. Korepanov³, V. V. Belousov⁴, and N. N. Semendyaev⁵

¹IPI RAN, sinitsin@dol.ru

²IPI RAN, vsinitsin@ipiran.ru

³IPI RAN, ekorepanov@ipiran.ru

⁴IPI RAN, vbelousov@ipiran.ru

⁵IPI RAN, nsemendyaev@ipiran.ru

Practical problems of on-line continuous and discrete filtering (estimation of state and parameters) of the Earth pole motion by linear and linearized filters are considered. Instrumental algorithms and software tools in MATLAB are discussed. Test examples and computer experiments based on astronomical measurements are presented.

Keywords: astronomical measurements; instrumental algorithms; software tools; information model; linear and linearized filters; generalized Kalman filters; on-line filtering; Kalman–Bucy filters; Pugachev filters; fluctuations of the Earth pole

ASYMPTOTIC DISTRIBUTIONS OF BASIC STATISTICS IN GEOMETRIC REPRESENTATION FOR HIGH-DIMENSIONAL DATA AND THEIR ERROR BOUNDS

Y. Kawaguchi¹, V. V. Ulyanov², and Y. Fujikoshi³

¹Department of Mathematics, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, n15007@gug.math.chuo-u.ac.jp

²Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, vulyan@gmail.com

³Department of Mathematics, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, fuji@math.sci.hiroshima-u.ac.jp

In geometric representation of n observations on p variables, it is necessary to examine asymptotic behaviors of the three statistics; the length of a p -dimensional observation vector, the distance between two independent observation vectors, and the angle between these observation vectors. Hall *et al.* (2005) found the asymptotic values of these three statistics in high-dimensional framework when the dimension p tends to infinity, while the sample size n is fixed. In this paper, their results are extended by deriving asymptotic expansions of the distributions of the three statistics. Further, computable error bounds for the limiting distributions of the length and the distance were obtained. These results will be useful to obtain statistical insights in middle- as well as in high-dimensional data sets.

Keywords: asymptotic expansions; error bounds; high-dimensional data; geometric representation

ASYMPTOTIC EXPANSION FOR THE POWER OF TEST BASED ON SAMPLE MEDIAN IN THE CASE OF LAPLACE DISTRIBUTION

V. E. Bening¹ and A. V. Sipina²

¹Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, bening@yandex.ru

²Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, anna@sipin.ru

Using asymptotic expansions, the formula for the limit of the difference between the powers of the test based on the sample median and the most powerful test for the case of Laplace distribution was obtained.

Keywords: sample median; asymptotic expansion; power function; Laplace distribution

ORGANIZATION OF USERS' MANAGEABLE ACCESS TO HETEROGENEOUS DEPARTMENTAL INFORMATIONAL RESOURCES

G. Y. Ilyushin¹ and I. A. Sokolov²¹IPI RAN, ilushin@ipiran.ru²IPI RAN, isokolov@ipiran.ru

The paper is devoted to the realization issues of application interoperability and user access to data repositories management during IT-infrastructure renovation in large enterprises. For the governed evolution of the legacy management information systems and data repositories without interruption of existing systems operation, a technology is proposed for creating the middleware infrastructure based on hybrid software/hardware solutions. The middleware based on the service-oriented architecture and Web Services technologies solves the problem of interoperability of heterogeneous applications as well as the problem of providing a centralized model of management of user access to heterogeneous data repositories on the basis of formalized roles. Besides interoperability issues, the middleware infrastructure enables to solve a broad spectrum of problems related to a provision of information security of the required level.

Keywords: interoperability; access management; middleware; Web Services; legacy systems; metadata

PETROLEUM AS A CARRIER OF INFORMATION ON ITS ORIGIN, STRUCTURE, AND EVOLUTION

R. B. Seiful-Mulukov

IPI RAN, rust@ipiran.ru

One of the most complicated and still unambiguously unresolved problems concerning the origin of petroleum parent substance is considered. It is proved that the information on petroleum is contained in the petroleum itself and the petroleum as a complex system can be treated within the frame of the laws of informatics.

Keywords: petroleum; petroleum geneses; petroleum information carrier; petroleum information content; information content evaluation

MODELING OF ELASTIC DEFORMATIONS IMPACT ON FINGERPRINT RECOGNITION PERFORMANCE

A. R. Arutyunyan

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, artem@ibrae.ac.ru

The problem of registration and modeling of distortions in biometric systems is considered. A biometric system performance is measured by false acceptance and false rejection rate which can be calculated from score distributions in genuine and impostor matches. The statistical moments are used to describe these score distributions with few parameters. Distortions shift the distributions and, consequently, moments. Based on it, an arbitrary distortion is modeled as shifts in score distribution. Finally, the experiments with modeling of impact of elastic deformation on fingerprint recognition were carried out.

Keywords: biometrics; operational testing; nonlinear fingerprint deformations

MATHEMATICAL MODELS OF FINGERPRINT IMAGE ON THE BASIS OF LINES DESCRIPTION

V. Yu. Gudkov

Chelyabinsk State University, Department of Applied Mathematics, diana@sonda.ru

The mathematical models of fingerprint based on the lines as topological vectors and ridge count are presented. They are stored in the template with the list of minutiae. The templates are used to identify the fingerprint.

Keywords: fingerprint; minutiae; topology; event detector; ridge count

AUTOMATED QUALITY TESTING OF DIGITAL IMAGERY FOR PERSONAL DOCUMENTS

S. L. Karateev¹, I. V. Beketova², M. V. Ososkov³, V. A. Knyaz³, Yu. V. Vizilter³,
A. V. Bondarenko³, and S. Yu. Zheltov³

¹FGUP "GosNIIAS," goga@gosniias.ru

²FGUP "GosNIIAS," irus@gosniias.ru

³FGUP "GosNIIAS"

The software-hardware system for digital face imagery acquisition and testing for requirements of ISO/IEC FCD 19794-5 standard is described. System contains the following algorithmic modules: face detector; color and intensity characteristics estimator; opened/closed eyes detector; glasses detector, reflexes, shines, and shadows detector; face features detector (nose, brows, mouth); face slope/rotation detector. The precision of face orientation estimation based on monocular digital imagery is addressed. The approach for precision estimation is developed based on comparison of synthesized facial two-dimensional images and scanned face three-dimensional model.

Keywords: biometrics; personal documents; face imagery; face detection; boosting; three-dimensional reconstruction; three-dimensional modeling

AN ALGORITHM FOR CLOTHES-BASED HUMAN RECOGNITION IN VIDEO

V. S. Konushin¹, G. R. Krivovoyaz², and A. S. Konushin³

¹M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences; M. V. Lomonosov Moscow State University, vadim@graphics.cs.msu.ru

²M. V. Lomonosov Moscow State University, gkrivovoyaz@graphics.cs.msu.ru

³M. V. Lomonosov Moscow State University, ktosh@graphics.cs.msu.ru

The new algorithm for clothes-based human recognition in video is presented. The algorithm is based on random patches classification with a random forest. The main advantage of the algorithm is the fact that it does not rely on human mask; therefore, it is able to work with video with arbitrary complex background. Experimental results are reported for a test set, which was acquired using authors' video surveillance system.

Keywords: video-based human recognition; machine learning; random forest; background subtraction

HERMITE TRANSFORM BASED IRIS KEY POINTS SELECTION AND ANALYSIS

E. A. Pavelyeva¹ and A. S. Krylov²

¹Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, paveljeva@yandex.ru

²Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, kryl@cs.msu.ru

Key points selection method based on local Hermite transform for iris recognition has been designed. Use of iris key points enables to obtain good recognition results with small storage capacity.

Keywords: biometrics; iris; Hermite transform; key points

DRAWING UP OF AN IDENTIKIT USING EVOLUTIONARY MORPHING AND QUALIMETRY METHOD

V. Protasov

Russian Center of Computing for Physics and Technology, Protvino, protonus@yandex.ru

The new information technology for drawing up of an identikit is resulted. It is based on genetic algorithms and work of group of witnesses. The model of “the virtual witness” has been developed. The model is intended for calculation of accuracy of drawing up of an identikit. It includes ability of the person to drawing persons and the ability to compare different individuals according to their similarity to the original. The fatigue of a witness after a long work on the recognition and comparison of individuals is counted. The model provides setting method and qualimetry of evolutionary morphing.

Keywords: identikit; evolutionary morphing; genetic algorithms; decision making; qualimetry

Об авторах

Арутюнян Артём Рафаэлевич (р. 1980) — научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН)

Бекетова Ирина Валентиновна (р. 1958) — ведущий инженер ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Белоусов Василий Владимирович (р. 1977) — кандидат технических наук, заведующий сектором ИПИ РАН

Бенинг Владимир Евгеньевич (р. 1954) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник ИПИ РАН

Бондаренко Александр Викторович (р. 1953) — кандидат физико-математических наук, начальник отделения ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Визильтер Юрий Валентинович (р. 1970) — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Гудков Владимир Юльевич (р. 1959) — кандидат технических наук, кафедра прикладной математики Челябинского государственного университета

Желтов Сергей Юрьевич (р. 1956) — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, генеральный директор ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Илюшин Геннадий Яковлевич (р. 1947) — кандидат технических наук, заведующий лабораторией ИПИ РАН

Кавагучи Ютака (р. 1984) — аспирант кафедры математики Высшей научной и инженерной школы университета Чуо, Токио

Каратеев Сергей Львович (р. 1956) — начальник сектора ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Князь Владимир Александрович (р. 1957) — начальник лаборатории ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Конушин Антон Сергеевич (р. 1980) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Конушин Вадим Сергеевич (р. 1985) — аспирант ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

Корепанов Эдуард Рудольфович (р. 1966) — кандидат технических наук, заведующий сектором ИПИ РАН

Кривовязь Глеб Робертович (р. 1987) — аспирант кафедры автоматизации систем вычислительных комплексов факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Крылов Андрей Серджевич (р. 1956) — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией математических методов обработки изображений факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Осоков Михаил Владимирович (р. 1969) — начальник сектора ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Павельева Елена Александровна (р. 1986) — аспирантка факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Протасов Владислав Иванович (р. 1946) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физико-технической информатики

Сейфуль-Мулюков Рустем Бадриевич (р. 1928) — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией ИПИ РАН

Семендяев Николай Николаевич (р. 1983) — программист ИПИ РАН

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом ИПИ РАН

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заведующий отделом ИПИ РАН

Сипина Анна Владимировна (р. 1976) — аспирантка кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Соколов Игорь Анатольевич (р. 1954) — академик (действительный член) Российской академии наук, доктор технических наук, директор ИПИ РАН

Ульянов Владимир Васильевич (р. 1953) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова

Фуджикоши Ясунори (р. 1941) — профессор кафедры математики Высшей научной и инженерной школы университета Чуо, Токио

About Authors

Arutyunyan Artem R. (b. 1980) — researcher, Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences

Beketova Irina V. (b. 1958) — leading specialist, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Belousov Vasily V. (b. 1977) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Bening Vladimir E. (b. 1954) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Bondarenko Alexander V. (b. 1953) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Fujikoshi Yasunori (b. 1941) — professor, Department of Mathematics, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, Tokyo, Japan

Gudkov Vladimir Yu. (b. 1959) — Candidate of Science (PhD) in technology, Department of Applied Mathematics, Chelyabinsk State University

Ilyushin Gennadiy Y. (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Karateev Sergey L. (b. 1956) — Head of Group, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Kawaguchi Yutaka (b. 1984) — PhD student, Department of Mathematics, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, Tokyo, Japan

Knyaz Vladimir A. (b. 1957) — Chief of Laboratory, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Konushin Anton S. (b. 1980) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, researcher, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Konushin Vadim S. (b. 1985) — PhD student, M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics

Korepanov Eduard R. (b. 1966) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Krivovyyaz Gleb R. (b. 1987) — PhD student, Computer Systems Department, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Krylov Andrey S. (b. 1956) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate profes-

sor, Head of the Laboratory of Mathematical Methods of Image Processing, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Ososkov Michail V. (b. 1969) — Head of Group, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Paveleyeva Elena A. (b. 1986) — PhD student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Protasov Vladislav I. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, Russian Center of Computing for Physics and Technology

Seiful-Mulukov Rustem B. (b. 1928) — Doctor of Science in geology, professor, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Semendyaev Nikolay N. (b. 1983) — programmer, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, honored scientist of RF, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Sinitsyn Vladimir I. (b. 1968) — Doctor of Science in physics and mathematics, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Sipina Anna V. (b. 1976) — PhD student, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Sokolov Igor A. (b. 1954) — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science in technology, Director, Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

Ulyanov Vladimir V. (b. 1953) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Vizilter Yuri V. (b. 1970) — Doctor of Science in physics and mathematics, senior researcher, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Zheltoev Sergey Yu. (b. 1956) — Doctor of Science in technology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation State Research Center — State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS)

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Информатика и её применения»

Журнал «Информатика и её применения» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информатики и ее приложений. Журнал издается на русском языке. Тематика журнала охватывает следующие направления:

- теоретические основы информатики;
- математические методы исследования сложных систем и процессов;
- информационные системы и сети;
- информационные технологии;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей.

1. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушать закон об авторских правах. Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии неисключительные права на издание данной статьи на русском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В связи с этим авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме: Соглашение о передаче права на публикацию:

«Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи « _____ », передаем учредителям и редколлегии журнала «Информатика и её применения» неисключительное право опубликовать данную рукопись статьи на русском языке как в печатной, так и в электронной версиях журнала. Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает авторского права других лиц или организаций. Подписи авторов: (ф. и. о., дата, адрес)».

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности опубликования представленной статьи в открытой печати.

2. Статья подписывается всеми авторами. На отдельном листе представляются данные автора (или всех авторов): фамилия, полное имя и отчество, телефон, факс, e-mail, почтовый адрес. Если работа выполнена несколькими авторами, указывается фамилия одного из них, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет самостоятельную экспертизу присланных статей. Возвращение рукописи на доработку не означает, что статья уже принята к печати. Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.
4. Решение редакционной коллегии о принятии статьи к печати или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия не обязуется направлять рецензию авторам отклоненной статьи.
5. Корректурa статей высылается авторам для просмотра. Редакция просит авторов присылать свои замечания в кратчайшие сроки.
6. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки. Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху — 2, снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3. Основной текст: стиль — «Обычный»: шрифт Times New Roman, размер 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине. Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 25 страниц указанного формата. Ознакомиться с шаблонами, содержащими примеры оформления, можно по адресу в Интернете: <http://www.ipiran.ru/journal/template.doc>.
7. К рукописи, предоставляемой в 2-х экземплярах, обязательно прилагается электронная версия статьи (как правило, в форматах MS WORD (.doc) или LaTeX (.tex), а также — дополнительно — в формате .pdf) на дискете, лазерном диске или по электронной почте. Сокращения слов, кроме стандартных, не применяются. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.
8. Статья должна содержать следующую информацию на русском и английском языках: название, Ф.И.О. авторов, места работы авторов и их электронные адреса, аннотация (не более 100 слов), ключевые слова. Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в порядке их первого упоминания. Все фамилии авторов, заглавия статей, названия книг, конференций и т. п. даются на языке оригинала, если этот язык использует кириллический или латинский алфавит.

9. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
10. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ZIP, RAR);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
11. Журнал «Информатика и её применения» является некоммерческим изданием, и гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции: Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ИПИ РАН
Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05 E-mail: rust@ipiran.ru

Выпускающий редактор Т. Торжкова
Технический редактор Л. Кокушкина
Художественный редактор М. Седакова
Сдано в набор 15.01.10. Подписано в печать 03.03.10. Формат 60 x 84 / 8
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл.-печ. л. 12. Уч.-изд. л. 10,4. Тираж 200 экз.

Заказ №

Издательство «ТОРУС ПРЕСС», Москва 121614, ул. Крылатская, 29-1-43
torus@torus-press.ru; <http://www.torus-press.ru>

Отпечатано в ППП «Типография «Наука» с готовых файлов
Москва 121099, Шубинский пер., д. 6.