

УДК 621.391.2

И. С. Грузман

(Новосибирск)

**ПРИМЕНЕНИЕ УЗКОПОЛОСНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ
В ЗАДАЧЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАПИЛЛЯРНЫХ ЛИНИЙ
НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

Рассмотрена задача обработки полутоновых изображений отпечатков пальцев на основе использования узкополосных случайных полей в качестве модели реальных изображений. Для подавления мешающих полей аддитивной помехи и огибающей используется двухэтапный метод фильтрации многомерных сигналов. Предложенный метод квазиоптимальной нелинейной фильтрации позволяет существенно повысить качество полутоновых изображений отпечатков пальцев и является эффективным даже при достаточно высоких уровнях шума. Приводятся примеры обработки реальных изображений отпечатков пальцев.

Основными методами обработки изображений отпечатков пальцев являются бинаризация и скелетизация, позволяющие, во-первых, существенно сократить объем хранимых изображений, во-вторых, повысить скорость автоматической идентификации за счет редукции данных. Однако при бинарной обработке и скелетизации могут пропадать мелкие фрагменты с пониженным контрастом, межпапиллярные включения, форма края папиллярных линий — все то, что зачастую и является решающим фактором при проведении экспертом идентификации изображений невысокого качества. Кроме того, бинарное изображение вызывает повышенную утомляемость глаз эксперта при просмотре отпечатков. К недостаткам полутоновых изображений, сохраняющих практически всю информацию об исходном отпечатке, можно отнести непостоянный контраст изображения и наличие помех, обусловленных фактурой поверхности, с которой снимается отпечаток, шумами устройств регистрации изображений и т. п. В данной работе предлагается двухэтапный метод повышения качества полутоновых изображений отпечатков на основе использования узкополосных случайных полей в качестве модели реальных изображений.

Узкополосные случайные процессы широко применяются в радиотехнических задачах [1, 2]. Вместе с тем они могут оказаться полезными при построении статистических моделей изображений, например, для описания папиллярных линий изображения отпечатка пальца, типичная строчная реализация которого приведена на рис. 1. Характерный вид строчной реализации свидетельствует о том, что изменения функции яркости изображения могут быть описаны двумерными квазигармоническими колебаниями вида

$$S = \{s(i, j) = A(i, j)\cos(\omega_0(i + j) + \varphi(i, j)) = \\ = \lambda_1(i, j)\cos(\omega_0(i + j)) + \lambda_2(i, j)\sin(\omega_0(i + j)), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}\},$$

у которых как огибающая $A(\cdot) = \sqrt{\lambda_1^2(\cdot) + \lambda_2^2(\cdot)}$, так и начальная фаза $\varphi(\cdot) = \arctg(\lambda_2(\cdot)/\lambda_1(\cdot))$ являются двумерными случайными полями, медленно изменяющимися по сравнению с гармоническими колебаниями на частоте ω_0 , где (i, j) — пространственные координаты точки на плоскости; $\lambda_1(\cdot)$ и $\lambda_2(\cdot)$ — квадратурные составляющие [1, 2]. Начальная фаза $\varphi(\cdot)$ определяет

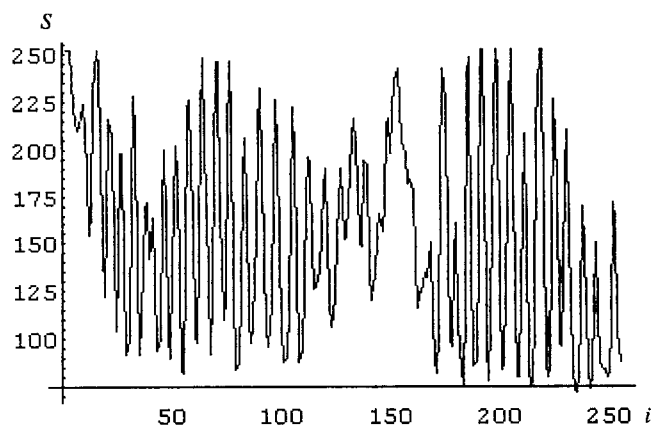


Рис. 1

вид пальцевого узора, а огибающая $A(\cdot)$ — мгновенные значения амплитуды квазигармонического колебания, от которого в конечном счете зависит контраст изображения.

Задача улучшения качества полутонового изображения отпечатка может быть сформулирована следующим образом. Пусть наблюдается аддитивная смесь

$$Y = \{y(i, j) = s(i, j) + x(i, j), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}\} \quad (1)$$

узкополосного случайного поля S и дискретного гауссова белого шума $X = \{x(i, j), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}\}$ с дисперсией σ_x^2 . Квадратурные составляющие $\lambda_1(\cdot)$ и $\lambda_2(\cdot)$ являются статистически независимыми гауссовыми марковскими полями с нулевыми математическими ожиданиями, которые образуют векторное поле

$$\Lambda = \{\lambda^T(i, j) = \{\lambda_1(i, j), \lambda_2(i, j)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}\}$$

с ковариационной матрицей

$$V\{\lambda(i, j), \lambda^T(l, m)\} = E\{\lambda(i, j)\lambda^T(l, m)\} = \sigma_\lambda^2 \Phi^{|1-i|+|m-j|} I,$$

где σ_λ^2 — дисперсия компонент поля квадратурных составляющих Λ ; $0 \leq \Phi \leq 1$ — коэффициент одношаговой корреляции; I — единичная матрица; T и E — символы транспонирования и математического ожидания соответственно. Следует отметить, что ковариационные функции компонент векторного поля Λ разделимы по пространственным координатам [3], а его одномерные сечения образуют двухкомпонентную векторную марковскую последовательность.

Задача состоит в оценке двумерного поля

$$U = \{u(i, j) = \cos(\omega_0(i + j) + \varphi(i, j)), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}\}$$

по наблюдениям (1). В качестве критерия оптимальности примем критерий максимума апостериорного распределения вероятности (АРВ) [1, 2].

Отличительной особенностью данной задачи является то, что сигналы носят принципиально двумерный характер. Кроме того, в радиотехнических задачах обычно оценивается огибающая $A(\cdot)$ или фаза $\varphi(\cdot)$ одномерных узкополосных случайных процессов [2]. Суть же оценки двумерного случайного поля U состоит в подавлении аддитивной помехи X и флуктуаций случайного поля огибающей.

Огибающая $A(\cdot)$ и начальная фаза $\varphi(\cdot)$ входят в (1) нелинейно. Однако квадратурные составляющие $\lambda_1(\cdot)$ и $\lambda_2(\cdot)$ присутствуют в Y линейным образом. Поэтому АРВ отсчетов $\lambda(\cdot)$ поля Λ является гауссовым, а его оценка — линейной. Между отсчетами полей Λ и U существует функциональная связь:

$$u(\cdot) = s(\cdot) / \sqrt{\lambda_1^2(\cdot) + \lambda_2^2(\cdot)}. \quad (2)$$

Следовательно, линейная оценка отсчетов поля Λ обладает свойством достаточности, и нелинейная оценка $u^*(\cdot)$ отсчетов поля U может быть получена в результате ее нелинейного преобразования. Этот прием, позволяющий свести задачу нелинейного оценивания к векторной линейной оценке квадратурных составляющих с последующим нелинейным преобразованием, описан в [2].

Вычисление статистически оптимальных векторных оценок двумерных полей наталкивается на неприемлемо высокую реализационную сложность. Поэтому при определении АРВ вектора $\lambda(\cdot)$ воспользуемся квазиоптимальным байесовским двухэтапным методом фильтрации изображений [4—6], который для образования оценки поля в произвольной точке растра использует ограниченные данные и позволяет свести двумерную обработку изображений к совокупности одномерных независимых процедур. Иными словами, при вычислении АРВ вектора $\lambda(\cdot)$ используются не все наблюдения Y , а лишь данные строки и столбца, проходящих через текущую точку фильтрации с координатами (\cdot) .

Поскольку векторное поле Λ обладает свойством условной независимости [4, 7], то АРВ

$$w(\lambda(\cdot) | Y(\cdot)) = (w(\lambda(\cdot) | y(\cdot)))^{-3} \prod_{k=1}^4 w(\lambda(\cdot) | Y_k(\cdot)), \quad (3)$$

где $Y(\cdot) = \left\{ \bigcup_{k=1}^4 Y_k(\cdot) \right\}$ — данные вертикальных и горизонтальных лучей, образующих строку и столбец наблюдаемого изображения и выходящих из текущей точки фильтрации с координатами (\cdot) ; $y(\cdot)$ — отсчет, лежащий на их пересечении. Частные АРВ $w(\lambda(\cdot) | Y_k(\cdot))$ и $w(\lambda(\cdot) | y(\cdot))$ так же, как и $w(\lambda(\cdot) | Y(\cdot))$, гауссовы. С учетом того, что одномерные сечения векторного поля Λ образуют одномерные векторные марковские последовательности, для определения частных АРВ можно использовать обычный алгоритм Калмана — Бьюси [8]. Параметры гауссова АРВ (3) — среднее $\lambda^*(\cdot)$ и дисперсионная матрица $\sigma_{\lambda^*}^2(\cdot)$, как нетрудно убедиться, определяются соотношениями

$$\lambda^*(\cdot) = \sigma_{\lambda^*}^2 \left(\sum_{k=1}^4 \sigma_{\lambda^* | Y_k}^{-2} E\{\lambda(\cdot) | Y_k(\cdot)\} - 3\sigma_{\lambda^* | y}^{-2} E\{\lambda(\cdot) | y(\cdot)\} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_{\lambda^*}^2 = \left(\sum_{k=1}^4 \sigma_{\lambda^* | Y_k}^{-2} - 3\sigma_{\lambda^* | y}^{-2} \right)^{-1},$$

где $E\{\lambda(\cdot) | Y_k(\cdot)\}$ и $E\{\lambda(\cdot) | y(\cdot)\}$ — апостериорные средние частных АРВ, получаемые при независимой обработке данных лучей $\{Y_k(\cdot), k = \overline{1, 4}\}$ и отсчета $y(\cdot)$; $\sigma_{\lambda^* | Y_k}^2$ и $\sigma_{\lambda^* | y}^2$ — дисперсионные матрицы частных АРВ. Отметим, что апостериорные средние $\lambda^*(\cdot)$, $E\{\lambda(\cdot) | Y_k(\cdot)\}$ и $E\{\lambda(\cdot) | y(\cdot)\}$ являются оптимальными линейными оценками вектора $\lambda(\cdot)$ по наблюдаемым двумерным $Y(\cdot)$, одномерным $\{Y_k(\cdot), k = \overline{1, 4}\}$ и одноточечным $y(\cdot)$ данным соответственно.

Оценка $u^*(\cdot)$ по максимуму АРВ $w(u(\cdot) | Y(\cdot))$ является корнем нелинейного уравнения [1]. Аналитическое решение этого уравнения наталкивается

на непреодолимые трудности. Поэтому воспользуемся квазиоптимальной оценкой

$$u^*(\cdot) = \frac{s^*(\cdot)}{\sqrt{(\lambda_1^*(\cdot))^2 + (\lambda_2^*(\cdot))^2}}, \quad (5)$$

где $s^*(i, j) = \lambda_1^*(i, j)\cos(\omega_0(i + j)) + \lambda_2^*(i, j)\sin(\omega_0(i + j))$ — линейная оценка узкополосного поля S ; $\lambda_1^*(\cdot)$ и $\lambda_2^*(\cdot)$ — компоненты линейной векторной оценки (4). В [2] показано, что нелинейные квазиоптимальные оценки, подобные (5), по своей эффективности близки к оптимальным.

Результаты обработки реального изображения отпечатка пальца (рис. 2) предложенным нелинейным двумерным методом даны на рис. 3. Параметры сигнала и помехи были определены опытным путем и соответственно равны: $\omega_0 = 1,1$, $\Phi = 0,9$, $q^2 = \sigma_\lambda^2 / \sigma_x^2 = 10$. Для проверки помехоустойчивости оценки (5) исходное изображение (см. рис. 2) искажалось дополнительным аддитивным гауссовым шумом. Дисперсия шума выбиралась из условия $q^2 = 2$. Результат обработки искаженного изображения (рис. 4) дан на рис. 5.

Из приведенных данных следует, что квазиоптимальная двумерная нелинейная обработка дает возможность существенно повысить качество полутоновых изображений отпечатков пальцев. Предложенный метод нелинейной фильтрации оказывается эффективным и при достаточно высоких уровнях шума. Кроме того, подавление флуктуаций огибающей позволяет квантовать обработанные полутоновые изображения на относительно малое число уровней яркости практически без ухудшения (как показали экспериментальные исследования) качества проквантованных изображений. Таким образом, предложенная обработка может обеспечить разумный компромисс между хранением бинарных и полутоновых изображений, имеющих 256 уровней серого.



Рис. 2



Рис. 3

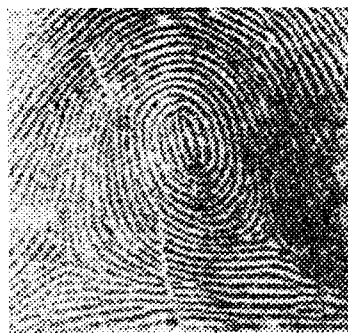


Рис. 4



Рис. 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1989.
2. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
3. Витгих В. А., Сергеев В. В., Соيفер В. А. Обработка изображений в автоматизированных научных исследованиях. М.: Наука, 1982.
4. Грузман И. С., Микерин В. И., Спектор А. А. Двухэтапная фильтрация изображений на основе использования ограниченных данных // Радиотехника и электроника. 1995. № 5.
5. Грузман И. С. Рекуррентная двухэтапная фильтрация изображений // Оборонная техника. 1996. № 3.
6. Грузман И. С. Двухэтапное восстановление дефокусированных изображений // Автометрия. 1997. № 2. С. 93.
7. Грузман И. С. Теорема Дуба для векторных гауссовских полей // Радиотехника, электроника и физика. Новосибирск: НГТУ, 1996.
8. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976.

Поступила в редакцию 4 февраля 1997 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!