МИКРОГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПАПИЛЛЯРНЫХ УЗОРОВ

Д.т.н., профессор В.Р. Женило (Академия управления МВД России)

Рассмотрим задачу спектрального анализа папиллярных узоров с целью выделения в них основных микрогармонических компонентов и синтеза по ним нового папиллярного узора, у которого удаляются такие нерегулярные структурные элементы как – мелкие кожные складки, цепочки пор, располагающихся вдоль папиллярных линий, случайные мелкие помехи и т.п.



Рис. 1. Папиллярный узор, используемый в тексте для пояснений (стрелкой отмечена середина отдельного кадра спектрального анализа).



Рис. 2. Слева отдельный кадр, отмеченный стрелочкой на рисунке 1. Справа результат синтеза папиллярных линий этого кадра по главной спектральной компоненте.

У многих разработчиков автоматизированных методов анализа и обработки папиллярных узоров уже на первой стадии исследования возникает проблема, связанная с чувствительностью методов классификации и распознавания папиллярных узоров ко всякого рода помехам (шумам), всегда присутствующим в изображении анализируемого узора. Почему-то считается, что, устранив эти помехи, будет проще (надежнее) сам алгоритм автоматического распознавания папиллярных узоров. В принципе, не соглашаясь с этим мнением, автор данной работы предлагает один из возможных алгоритмов выделения главных структурных элементов паппилярного узора и последующего синтеза по ним нового папиллярного узора, основанного только лишь на полученной информации об этих главных структурных элементах.

Квазипериодичность линий папиллярных узоров просто-таки заставляет начинающего исследователя в этой области приступить к их анализу с помощью мощного и хорошо зарекомендовавшего себя преобразования Фурье, позволяющего разложить любой сигнал, не только периодический, на спектр гармонических составляющих, сумма которых равна исходному исследуемому сигналу. Но строго обосновать – почему следует использовать именно преобразование Фурье, а не какое-либо иное преобразование, содержательно более подходящее для описания исследуемого явления природы, - очень затруднительно. Поэтому автор данной работы отдает себе отчет в принципиальной некорректности поставленной задачи. Хотя метод ее решения и полученные результаты могут оказаться полезными как для практических, так и для учебных целей.

Почему фурье-анализ может оказаться принципиально некорректным в решении рассматриваемой задачи объясняется просто. С одной стороны, конечно же, главным аргументом обоснованности применения фурье-анализ является проявление в узоре папиллярных линий некоторой квазипериодической структуры. Но этого явно недостаточно. Разложение структуры линий папиллярных узоров было бы более корректно, если бы удалось показать или доказать,

> что основными информационными элементами папиллярных узоров являются именно пространственные гармоники некоторых частот, которые остаются инвариантными ко всем или к большинству реальным искажениям, возникающим в папиллярных узорах при их фиксации на том или ином материальном носителе (информации). Возможно, что большинству исследователей это доказательство покажется просто очевидным, поскольку можно сказать, что индивидуальные признаки того или



Рис. 3. Четыре способа разной глубины прорисовки главных компонентов амплитудного спектра, полученного после фурье-преобразования отдельного кадра с рисунка 2.



Рис. 4. Синтезированный узор, полученный из исходного папиллярного узора с рисунка 1 ($\sigma_x = 8$).

иного папиллярного узора скрываются именно в нарушении периодичности (гармоничности) папиллярных линий. А последние прекрасно выявляются с помощью фурье-анализа.

Затронув это вопрос, мы лишь показали его связь с главной темой данной работы, не претендуя на его полное и корректное решение. А теперь перейдем к изложению основной сути статьи.

Предположим, что у нас есть растровое (дискретное) черно-белое изображение папиллярного узора с разрешающей способностью 500 точек на дюйм и с разрешением яркости – 8 битов. Будем называть это представление цифровым сигналом.

Для разложения этого сигнала на гармонические компоненты поступим следующим образом. Разобьем все изображение папиллярного узора на квадраты с шириной $2\sigma_x$, которые далее будем называть кадрами спектрального анализа-синтеза папиллярных линий или физическими окнами (кадрами) спектрального анализа.

Назовем главной гармонической компонентой текущего кадра такую частотную компоненту амплитудного спектра, которая максимальна среди всех остальных значений спектра текущего кадра.

Для иллюстрации на рисунке 1 показан папиллярный узор, элементы спектрального анализа и синтеза некоторых кадров которого изложены ниже. Стрелочкой на рисунке отмечен центр отдельного вычислительного кадра спектрального анализа, о котором идет речь ниже.

На рисунке 2 показан отдельный кадр, отмеченный стрелочкой на рисунке 1. И там же показан результат синтеза папиллярных линий этого кадра по главной спектральной компоненте.

Чтобы спектральный анализ главных гармонических компонентов сигнала содержал минимальное количество артефактов, фурье-преобразования каждого кадра будем производить примерно на вдвое большем квадрате шириной $2\Sigma_x$. Этот квадрат назовем вычислительным кадром спектрального анализа или вычислительным окном спектрального анализа. Центры соответствующих физических и вычислительных окон совпадают.

Физические окна формируется таким образом, чтобы они не перекрывались, но покрывали собою весь анализируемый папиллярный узор. Разумеется, что вычислительные окна при этом существенно перекрывали друг друга.

В описанном ниже эксперименте использовались такие значения окон: Σ_x - 32 или 64 точки, а σ_x - от 4 до 15 точек.

Перед вычислением фурье-преобразования каждого кадра в отдельности, он сначала взвешивался на всем вычислительном окне двумерной функцией Гаусса, а затем из всех отсчетов полученного дискретного



Логарифм модуля пространственной частоты

Рис. 5. Плотность частоты встречаемости главных спектральных компонентов изображения с рис. 1.



Логарифм модуля пространственной частоты



описания вычислительного кадра вычиталась постоянная составляющая, чтобы в окрестности нулевых частот не возникали мощные мешающие гармонические компоненты.

Взвешивающая двумерная функция Гаусса имеет следующий вид:

$$G(x, y) = e^{\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_x^2}}$$

где (x₀, y₀) - это координата центра соответствующего кадра спектрального анализа папиллярного узора.





Рис. 7. Синтез узора только по низкочастотным компонентам исходного папиллярного узора с рис. 1 (ширина физического окна спектрального оценивания $\sigma_x = 8$).

Рис. 8. Синтез узора только по высокочастотным компонентам исходного папиллярного узора с рис. 1 (ширина физического окна спектрального оценивания $\sigma_x = 8$).

Для упрощения расчетов и графического представления полученного амплитудного двумерного спектра обе пространственные частоты отражались в диапазоне от $-F_N/2$ до $+F_N/2$, где F_N - это частота Найквиста дискретного описания папиллярного узора¹.

У полученного после фурье-преобразования двумерного амплитудного спектра каждого кадра находилась самая мощная частотная компонента, уровень которой условно приравнивался 0 дБ.

Чтобы представить себе как выглядит главная спектральная компонента исходного кадра с рисунка 2, на рисунке 3 показаны 4 способа визуализации его двумерного амплитудного спектра, при разных глубинах прорисовки амплитудного спектра: –10, –20, –30 и –40 дБ. На рисунке хорошо видно, что на глубинах до –40 дБ имеется множество второстепенных гармонических компонентов, которые были отброшены при синтезе нового папиллярного узора.

Синтез новых папиллярных линий в отдельном кадре осуществлялся с помощью гаусс-гармоник, формальное определение которых имеет следующий вид:

$$synthesis(x, y) = G(x, y) \cdot \cos(2\pi (F_x(x - x_0) + F_y(y - y_0)) + \varphi),$$
(1)

где F_x и F_y - это пространственная частота главной гармонической компоненты спектра;

¹ Попутно хотелось бы отметить, что в ходе отладки соответствующего программного обеспечения было обнаружено нарушение корректности перевода некоторыми сканерами аналогового изображения в дискретное. А именно: на искусственных сигналах типа меандра отчетливо проявилось зеркальное отражение высших гармоник от частоты Найквиста, что свидетельствует о том, что использованные в исследовании сканеры не удовлетворяли требованиям теоремы Котельникова о корректном переводе аналогового сигнала в дискретный.

φ - фаза главной гармонической компоненты спектра.

Отметим, что амплитуда в синтезируемом сигнале всегда берется равной 1, что выравнивает яркость всех гармонических компонентов синтезированного папиллярного узора до максимально возможной величины.

На рисунке 4 приведен результат синтеза исходного папиллярного узора с рисунка 1. Этот синтезированный узор равен сумме всех микрогармоник (1) со всех кадров, на которые был разбит исходный папиддярный узор с рис. 1.

Полученный синтезированный рисунок оказывается дополненным ненужными почернениями по краям из-за того, что в синтезе принимают участие главные частотные компоненты спектров со всех кадров, и при этом они все берутся с одинаковой амплитудой, равной 1. Чтобы избежать этого, в синтез следует включать только те кадры, главные частотные компоненты которых близки к возможному диапазону частот реальных папиллярных линий. Найти границу частот, ниже которой располагаются не информативные главные частотные компоненты, можно следующим образом.

Используем для этой цели выборочную функцию плотности распределения модуля пространственных частот папиллярных линий и соответствующую ей выборочную функцию распределения вероятностей.

Модуль пространственных частот (F_x, F_y) определяется как обычно:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$
 (2)

Применительно к показанному на рис. 1 папиллярному узору выборочная функция плотности распределения модуля пространственных частот имеет вид, приведенный на рис. 5.

Соответствующая ей выборочная функция распределения модуля пространственных частот показана на рис. 6. Именно эту функцию удобно использовать для автоматического вычисления границы модуля пространственных частот, соответствующих частотам папиллярных линий. Для этого можно предложить следующий алгоритм: граничной будет та частота, значение которой лежит в диапазоне от 10% до 90% квантиля функции распределения и у которой производная этой же функции распределения принимает минимальное значение. На рис. 6 эта точка обозначена специальной выноской. И производная в указанной точке для исследуемого папиллярного узора оказалась очень близкой к нулю.



Рис. 9. Синтез узора только по высокочастот-296^{ным} компонентам исходного папиллярного узора с рис. 1 (ширина физического окна спек-

трального оценивания $\sigma_x = 4$).

Полученную точку, разделяющую все множество возможных значений модуля пространственных частот главных спектральных компонентов всех кадров исходного узора, назовем границей верхних и нижних частот.

Если теперь синтезировать два новых изображения с только низкими и только высокими частотными компонентами, то получатся результаты, соответственно показанные на рис. 7 и 8.

Из этих рисунков видно, что вся информация о папиллярном узоре сосредоточена в высокочастотной части спектра. А в низкочастотной – информация об изображении, окружающем узор, в котором отсутствуют даже слабые намеки на структуру, напоминающую папиллярные линии.

Интересно было выяснить причину появления двух очень узких и относительно высоких локальных максимумов в распределении частот на рис. 5, расположенный чуть левее найденной границы верхних и нижних частот. Эксперимент с синтезом изображения только лишь по этим локальным максимумам показал, что они соответствуют длинной границе всей исходной картинки, а не каким-то частям папиллярного узора.

Последним принципиально важным вопросом, на котором следовало бы остановиться, является вопрос о выборе ширины физического окна спектрального оценивания для нахождения главных гармонических компонентов папиллярного узора.

Здесь следует учитывать два обстоятельства. Первое – это ограничения, возникающие при оценке частот главных гармонических компонентов в случае применения очень узких физических окон спектрального оценивания. Чем уже физическое окно спектрального оценивания отдельного кадра, тем размытее получается амплитудный спектр, из-за чего надежность и точность оценки главных пространственных частот могут оказаться недо-





Рис. 10. Пример папиллярного узора с сильно выраженными следами пор.

Рис. 11. Синтезированный узор, полученный из исходного папиллярного узора с рисунка 10 ($\sigma_x = 8$).

пустимо низкими. А второе ограничение связано с природой самого папиллярного узора. Если ширину физического окна спектрального оценивания каждого кадра брать предельно (допустимо) малой, то синтезируемый узор оказывается мало отличим от оригинала. Пример результата синтеза в таком случае показан на рис. 9.

А если ширину физического окна спектрального оценивания каждого кадра брать относительно большой, то в синтезированном узоре исчезают нерегулярные элементы, такие как, например, мелкие кожные складки или поры. Последнее – исчезновение пор – хорошо проявляется на синтезированном узоре (см. рис. 11), полученном по оригинальному папиллярному узору с рис. 10.

Возвращаясь к мысли, высказанной в начале статьи, о том, что не следует анализируемый папиллярный узор сначала пытаться «очищать» от шумов и помех (при этом явно или неявно искажая исходные данные), чтобы затем «проще и надежнее» алгоритмически находить индивидуальные особенности того или иного папиллярного узора, хотелось бы сказать следующее.

Да, микрогармоническое описание покадровых фрагментов папиллярного узора оказывается весьма эффектно. Это позволяет четко прорисовать структуру зашумленного отпечатка. Это может быть полезно для всяческих иллюстраций и даже компактного (компрессированного) описания и хранения в базе данных любого папиллярного узора.

Но. Если не забывать главной задачи – найти индивидуальные признаки, то, видимо, не следует решать ее в обход – сначала «вычищая» узор, а потом лишь его анализируя. Лучше (с информационной точки зрения) сразу применить описанные выше методы, но не для того, чтобы найти чисто гармоническую структуру отпечатка, а наоборот – найти те кадры, в которых, во-первых, происходит существенное отклонение от гармонической регулярности, а во-вторых, во всех смежных кадрах эта регулярность проявляется в достаточно высокой мере. Иными словами, лучше сразу искать теми же самыми спектральными методами отклонения от регулярности (минуции) и на их основе строить перечень индивидуальных признаков того или иного папиллярного узора.