

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

## MODERN ULTRAHIGH RESOLUTION IMAGE PROCESSING METHODS AND PRACTICAL APPLICATIONS

**A. Denisjuk**

*Summary.* This article presents a review of image and video processing methods for ultra high resolution (High Resolution, HR, Super Resolution, SR or Super Ultra High Definition, Super UHD) and considers their most significant practical applications in various video production, video surveillance systems, medical diagnostics, remote sensing, astronomical observations, biometric information.

*Keywords:* image reconstruction, ultra high resolution, Super UHD, resolution enhancement, regularized structure, regularized interpolation, applications.

**Денисюк Андрей Юрьевич**

*Инженер, физик, независимый фото-  
и видеохудожник, совладелец компании THN Studio Corp  
thisnight@thisnight.ru*

*Аннотация.* В статье представлен обзор методов обработки изображений и видео для сверхвысокого разрешения (High Resolution, HR, Super Resolution, SR или Super Ultra High Definition, Super UHD) и рассмотрены их наиболее значимые практические применения при создании различной видеопродукции, в системах видеонаблюдения, медицинской диагностике, дистанционном зондировании Земли, астрономических наблюдениях, биометрической информации.

*Ключевые слова:* реконструкция изображений, сверхвысокое разрешение, Super UHD, повышение разрешения, регуляризованная структура, регуляризованная интерполяция, приложения.

**П**ространственное разрешение — это термин, который относится к количеству пикселей, используемых для построения цифрового изображения. Когда мы говорим, что цифровое изображение имеет более высокое пространственное разрешение, чем другое изображение, это означает, что изображение с более высоким пространственным разрешением состоит из большего количества пикселей, чем изображение с более низким пространственным разрешением для тех же размеров элемента изображения. Пространственное разрешение может определять качество изображения и описывать, насколько подробно объект может быть представлен изображением. Это мера, определяющая, насколько маленьким может быть объект, чтобы система визуализации обнаружила его. Ошибки формирования изображения могут включать как проблемы пространственного разрешения (разрешения пикселей) системы визуализации, так и другие систематические ошибки. Пространственное разрешение измеряется в парах линий на сантиметр (line pairs per centimeter, lp/cm) и является мерой неопределенности, возникающей при ошибках формирования изображений.

С развитием приложений для обработки изображений растет спрос на изображения с высоким разрешением (High Resolution, HR), далее HR, поскольку HR-изображения не только дают зрителю приятную картину, но и предлагают дополнительные детали, которые важ-

ны для распознавания и анализа во многих практических приложениях.

В современной цифровой фотовидеокамере для восприятия и фиксации изображения используются полупроводниковые кремниевые микросхемы (чипы) — матрицы, чувствительные сенсоры, предназначенные для поглощения фотонов света и трансформации светового потока в электрический сигнал, и это — важнейшая часть цифровой камеры. Сенсор в цифровых камерах совершил революцию в фотографии и видеографии. Технология улучшается практически каждый день, и в следующие несколько лет могут быть произведены поразительные улучшения в фотографических характеристиках ISO и повышении качества видео изображений.

Современные технологии получения изображений высокого разрешения HR в основном зависят от технологий производства цифровых сенсоров, в которых пытаются увеличить количество пикселей на единицу площади за счет уменьшения размера пикселя. Другой подход к повышению пространственного разрешения заключается в увеличении размера чипа, что приводит к увеличению емкости. Большая емкость затрудняет ускорение скорости передачи заряда, поэтому данный подход не считается эффективным. Кроме того, существует ограничение на уменьшение размера пикселя из-за дробового шума, возникающего в самом сенсоре. По мере уменьшения размера пикселя уменьшается

и количество доступного света. Это приводит к появлению дробового шума, который сильно ухудшает качество изображения. Поэтому существуют ограничения на уменьшение размера пикселя и существует технологически оптимальный размер пикселя, который соотносится с уровнем уменьшения полупроводникового техпроцесса. Например, он составляет около 40 мкм<sup>2</sup> для 0,35 мкм КМОП-процесса, то есть комплементарного процесса металл-оксид-полупроводник. Это набор полупроводниковых технологий построения интегральных микросхем и соответствующая ей схемотехника микросхем.

С технологическим улучшением растут затраты и стоимость высокоточной оптики и сенсоров может оказаться неприемлемой для коммерческих приложений общего назначения. Поэтому подход к повышению разрешения с использованием методов обработки сигналов является перспективным и многообещающим во многих областях и приложениях.

В литературе этот подход называют реконструкцией изображений с суперразрешением (Super Resolution, SR или Super Ultra High Definition, Super UHD), далее SR, иногда его называют HR или просто повышением разрешения. Использование методов обработки сигналов для получения изображения HR из наблюдаемого изображения Low Resolution (LR) или нескольких изображений LR называется повышением разрешения. В последнее время такой подход к повышению разрешения является одним из наиболее активных направлений исследований в области обработки изображений и называется реконструкцией изображений с суперразрешением (SR) (или HR).

В данной работе мы используем термин реконструкция изображений со сверхразрешением для обозначения подхода к обработке сигналов с целью повышения разрешения, поскольку термин «сверх» очень точно отражает характеристику метода, позволяющего преодолеть ограничения разрешения, присущие системам формирования изображений с низким разрешением (LR).

Большинство подходов к сверхразрешению можно разделить на две основные части: регистрация изображения и реконструкция изображения. Однако, эти два основных этапа затем дополняются третьим этапом восстановления изображения для удаления размытия и шума.

В последние десятилетия технологии получения изображений быстро развивались, и разрешение достигло нового высокого уровня. В связи с этим возникает вопрос: требуются ли еще методы повышения разрешения изображений? Дело в том, что хотя дисплеи

высокой четкости в последние годы достигли нового уровня (например, 1920×1080 для HDTV, 3840×2160 для некоторых Super UHD (8K) TV и 2048×1536 для некоторых мобильных устройств), необходимость повышения разрешения нельзя игнорировать во многих приложениях [1]. Например, чтобы гарантировать длительную стабильную работу записывающих устройств, а также соответствующую частоту кадров для динамичных сцен, видеоприемника цифрового видеонаблюдения склонны в некоторой степени жертвовать разрешением. Аналогичная ситуация существует в области дистанционного зондирования: всегда есть компромисс между пространственным, спектральным и временным разрешением. Что касается медицинской визуализации, то в рамках каждой визуализации действуют определенные физические законы, определяющие значение шума и чувствительность процесса визуализации. Как извлечь 3D-модели человеческой структуры с помощью изображений высокого разрешения при снижении уровня излучения до сих пор остается проблемой [2,3]. Исходя из этих фактов, существующие методы пока не могут удовлетворить существующие требования. Поэтому повышение разрешения (SR) по-прежнему необходимо, особенно в таких областях, как видеонаблюдение, медицинская диагностика и дистанционное зондирование. Учитывая высокую стоимость и ограничения повышения разрешения с помощью «аппаратных» методов, особенно для крупномасштабных устройств формирования изображений, методы обработки сигналов, известные как сверхразрешение (SR), стали потенциальным способом получения изображений высокого разрешения (HR). С помощью методов SR мы можем выйти за пределы наблюдений с низким разрешением (LR), а не совершенствовать аппаратные устройства. SR — это метод, который восстанавливает изображение или последовательность изображений с более высоким разрешением из наблюдаемых изображений LR. Технически SR можно разделить на многокадровый и однокадровый на основе входной информации LR [4–8]. Если можно получить несколько изображений одной и той же сцены с субпиксельным смещением, то дополнительная информация между ними может быть использована для реконструкции изображения более высокого разрешения или последовательности изображений. Однако иногда для реконструкции может быть недоступно несколько изображений LR и поэтому нам необходимо восстановить изображение HR, используя ограниченную информацию LR, что определяется как однокадровое SR [9–12].

Методы SR были всесторонне обобщены в нескольких исследованиях [4,6,8,13–15], мы рассмотрим эти технологии с точки зрения методов за последние десятилетия и сделаем обзор современных приложений, использующих методы SR, таких как спутниковое приложение Google Skybox [16] и последовательности изо-

бражений наблюдения с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [17]. Остановимся также на существующих препятствиях для будущих исследований.

Исходя из концепции SR, первая проблема, которую мы должны обсудить — это условия получения изображения HR из нескольких наблюдаемых изображений LR. В общем случае, если среди изображений есть дополнительная информация, то SR выполнимо [18]. То есть, LR-изображения не могут быть получены друг из друга путем преобразования или передискретизации, поэтому они содержат различную информацию, которая может быть использована для SR.

Для реализации SR в реальном конкретном применении исследователи склоняются к тому, чтобы получать изображения для SR с помощью аппаратного управления. Посредством формирования изображений с помощью аппаратных технологий сенсоры могут получать изображения с известными субпиксельными смещениями или несколькими «взглядами» на одну и ту же сцену, что делает SR вполне возможным. Успешные примеры можно найти в различных областях [2,19]. Один из самых известных успешных примеров относится к области дистанционного зондирования. В спутниковой системе SPOT-5 французского космического агентства был использован специально разработанный по технологии «прибор с зарядовой связью» (ПЗС) детектор, в котором объединены две ПЗС-матрицы с разрешением 12 000 пикселей. Они сдвинуты друг относительно друга на половину ширины пикселя [19]. Поскольку два ПЗС-детектора могут получать изображения одновременно, набор данных может быть получен при сдвиге позиции съемки на полпикселя. Используя это устройство и технику SR, мы можем получить изображение HR из двух изображений, сдвинутых на полпикселя. Более того, некоторые пиксели ПЗС состоят из субпикселей различной формы и пространственного расположения и объединив несколько изображений, записанных с различными субпиксельными компонентами, мы можем получить изображение с более высоким разрешением с помощью SR.

В настоящее время SR разрабатывается уже более трех десятилетий, приблизительно с 1985 года, и прогресс SR можно кратко описать следующим образом. В самом начале большинство методов было сосредоточено на частотной области, где алгоритмы могут использовать взаимосвязь между изображением HR и наблюдениями LR на основе простой теоретической базы и обладают высокой вычислительной эффективностью. Однако эти методы имеют очевидные недостатки, такие как чувствительность к ошибкам модели и сложность в обработке более сложных моделей движения, что препятствует их дальнейшему развитию. В связи с недостат-

ками алгоритмов частотной области, методы пространственной области стали основным направлением [4]. Термин пространственная область относится к плоскости изображения как таковой и данная категория соединяет подходы, основанные на прямом манипулировании пикселями изображения. Методы обработки в частотной области основываются на трансформации сигнала, формируемого применением к изображению преобразования Фурье. Соответственно, полезны и технологии, основанные на различных комбинациях методов из данных двух категорий.

Популярные методы пространственной области включают в себя неравномерную интерполяцию, итеративную обратную проекцию (IBP), проекцию на выпуклые множества (POCS), регуляризованные методы и ряд гибридных алгоритмов. Регуляризованные методы являются наиболее популярными благодаря своей эффективности и простоте [1].

Модель визуализации, которая относится к модели наблюдения, имеет важное значение для SR при использовании регуляризованной структуры. Процесс получения изображения неизбежно сталкивается с набором ухудшающих факторов, таких как оптическая дифракция, недостаточная выборка, относительное движение и шум системы. Поэтому обычно предполагают, что процедура деградации во время получения изображения включает искажение, размытие, понижение дискретизации и шум, исходя из чего строят математическую модель наблюдения. И эта модель все еще не является достаточной для хорошего описания всех возможных ситуаций.

Целью регуляризованных методов реконструкции и регуляризованной схемы является реконструкция изображения HR из набора деформированных, размытых, зашумленных и недостаточно дискретизированных изображений на основе модели наблюдения, описанной выше. Поскольку модель обоснована и определена недостаточно хорошо, SR оказывается плохо решаемой обратной задачей. Но ее можно преобразовать в задачу минимизации на основе теории максимального апостериорного приближения (MAP) [20, 21]. Это общая вариационная регуляризованная схема SR. Методы MAP учитывают предварительные ограничения изображения и получают результаты максимизацией функции издержек от постериорной вероятности. Они популярны благодаря своей гибкости при использовании сохраняющих границы приоритетов и совместной оценки параметров.

Далее обратимся к конкретным применениям SR в повседневной жизни, в практических применениях, что является самой главной задачей. За последние три десятилетия были рассмотрены различные области применения SR в значимых областях. Например, улучшение

обычной видеоинформации. Обычные видеоизображения могут быть преобразованы в изображения высокой четкости с помощью методов SR. Компания Hitachi Ltd. добилась преобразования стандартного телевидения (SDTV) в телевидение высокой четкости (HDTV) с использованием технологии SR для видео, где все детали в кадре стали четкие и значительно улучшены, что делает SR особенно интересной и актуальной темой исследования [22]. Другой пример, формат видео Quarter Common Intermediate Format (QCIF) используется только при сетевом мониторинге по низкоскоростным каналам связи с потоком до 56–128 Кбит/с. О качестве изображения можно сказать только то, что «видно какое то движение» и более ничего. Videopоследовательность разрешения QCIF 180×144 была обработана методом 3-D Iterative Steering Kernel Regression (3-D ISKR) [1] и значительно улучшена. Эти типичные примеры демонстрируют эффективность методов SR при работе с искажениями движения, вызванными множеством движущихся объектов, что часто встречается в реальных сценах. Более того, компания Apple Inc. объявила о подаче заявки на патент оптической стабилизации изображения на основе SR. Рано или поздно технологии SR будут использоваться в телефонах, компьютерах и планшетах.

Следующий пример — видеонаблюдение. В настоящее время устройства цифровых видеорегистраторов (DVR) встречаются повсеместно, и они играют важную роль в таких приложениях, как наблюдение за дорожной обстановкой и мониторинг безопасности. Однако на данный момент оснащение крупномасштабных устройств HR не представляется возможным. Поэтому необходимо изучить методы SR видеоизображений. Такие нечеткие изображения, как видеопоследовательности наблюдения с беспилотника (БПЛА) [23] оставляют желать много лучшего. Поэтому, несмотря на прогресс в развитии техники, практическое использование видео SR все еще остается сложной задачей. Наружные видеоустройства уязвимы к воздействию погодных условий. Кроме того, видеопоток обычно содержит огромное количество данных и сложное движение. Некоторые алгоритмы могут справиться с искажениями движения, но вычислительная эффективность ограничивает их применение. Следует отметить, что сжатое видео и его SR обработка также находится в центре внимания [24, 25].

Следующим важным приложением является медицинская диагностика. Различные методы медицинской визуализации могут предоставить как анатомическую информацию о структуре человеческого тела, так и функциональную. Однако ограничения по разрешению всегда снижают ценность медицинских изображений для диагностики. Технологии SR используются в основных направлениях медицинской визуализации, включая магнитно-резонансную томографию (МРТ),

функциональную МРТ и позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) [27]. Цель — увеличение разрешения медицинских изображений при сохранении истинной изотропной трехмерной визуализации. Системы медицинской визуализации могут работать в условиях строго контролируемой среды, и поэтому можно легко получать непрерывные и многоракурсные изображения. Результаты SR на данных МРТ головного мозга человека [2] и синхронизированного с дыханием изображения ПЭТ производят сильное впечатление [28]. SR на основе отдельных кадров изображений также применяется в области медицинской визуализации как сбор похожих изображений для создания базы данных [29, 30]. Следующий пример — это реконструированное изображение МРТ изображения колена, представленное в работе [29]. Для этого учебная база данных была создана с помощью набора пяти стандартных изображений, включая компьютерную томографию (КТ) и МРТ изображения различных частей человеческого тела.

Следующее значимое применение — дистанционное зондирование Земли. Первая идея SR в [31] была мотивирована требованием улучшить разрешение изображений дистанционного зондирования Landsat — наиболее продолжительного проекта по получению спутниковых снимков Земли с 1972 года по настоящее время. Идея применения методов SR для визуализации дистанционного зондирования разрабатывалась в течение десятилетий. Хотя данные, удовлетворяющие требованиям SR, получить нелегко, существует несколько успешных примеров их применения для реальных данных [32–37]. Среди них полученное разрешение панхроматического изображения, выданное спутником SPOT-5, может достигать 2,5 м за счет SR двух 5-метровых изображений, полученных путем сдвига двойной ПЗС-матрицы на половину интервала дискретизации, что было наиболее успешным примером [33,38]. Отличительной особенностью спутника SPOT-5 является режим согласованной съемки одной и той же территории двумя матрицами с разрешением 5 м. Кроме того, Шен и другие [34] предложили алгоритм MAP и протестировали его на изображениях дистанционного зондирования с помощью спектрорадиометра с умеренным разрешением (MODIS). Более того, самые разные спутники могут получать многовременные или многоракурсные изображения на одну и ту же территорию, например, Landsat, CBERS и WorldView-2 и таким образом предоставляют возможность для SR [32, 37].

SR для спектрального смешивания фракционных изображений широко изучается для получения карты с более высоким разрешением меток классов и известно как субпиксельное картографирование [39–41]. Исследователи также пытались применить основанные на примерах методы к SR изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования [42, 43]. Компания Skybox

Imaging запланировала запуск группы из 24 небольших спутников, которые смогут в режиме реального времени предоставлять «видео» с субметровым разрешением, используя методы SR [16, 44]. В настоящее время запущены и введены в эксплуатацию спутники SkySat-1 и SkySat-2. Благодаря включению примерно 20 кадров, наземный дисбаланс (GSD) выходного изображения может быть уменьшен до 4/5 от исходных данных [16]. Это прекрасная возможность внедрить технологии SR в нашу повседневную жизнь. Основными проблемами для SR изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования, являются преодоление изменений сцены из-за временных различий и адаптация существующих методов к огромным объемам ежедневных наблюдений.

Астрономические наблюдения также являются значимой сферой применения методов SR. Физическое разрешение астрономических устройств формирования изображений, ограниченное параметрами системы, также дает шанс методам SR сыграть свою важную роль. Астрономические системы обычно могут собирать серию изображений для SR. Улучшая разрешение астрономических изображений, SR может помочь астрономам в исследовании космического пространства. Конкретный пример решения астрономической задачи приведен в работе [45], где показано SR множественных изображений звезд. В настоящее время в космос также отправляются спутники, например, программа исследования Луны и миссия полета к Марсу (Mars Odyssey). Например, SR лунных изображений китайского аппарата ChangE-1 [46], где результат был реконструирован на основе трех видов изображений. SR может повысить разрешение изображения и тем самым улучшить различимость мелких объектов на поверхности Луны. Кроме того, Хьюз и Рэмси [47] использовали наборы данных теплового инфракрасного и видимого диапазонов системы тепловой эмиссионной визуализации из различных спектральных областей для создания улучшенного теплового инфракрасного изображения поверхности Марса.

SR идентификация биометрической информации также важна для биометрического распознавания, включая повторное улучшение решения для лица [48–50], отпечатков пальцев [51] и изображений радужной оболочки глаза [52, 53]. Разрешение биометрических изображений играет ключевую роль в процессе распознавания и обнаружения. Для работы с LR-наблюдениями распространенным подходом является создание высококачественных изображений из нескольких LR-изображений. Основываясь на избыточности и сходстве структурированных характеристик биометрических изображений, SR на основе одного кадра с внешней базой данных является эффективным способом повышения разрешения [11], что великолепно подтверждается результатами трех случаев реконструкции биометрических изображе-

ний — лица, отпечатка пальца и радужной оболочки глаза [51,54,55]. С помощью SR детали фигур и структурная текстура четко улучшаются, в то время как эффективно сохраняется глобальная структура, что может улучшить способность распознавания в соответствующих приложениях.

В заключение хочется отметить, что проведенный обзор концепции, развития и основных областей применения сверхразрешения (SR) изображений за последние три десятилетия показал, что основной прогресс в технике SR можно разделить на три этапа. В первом десятилетии, приблизительно до 1995 года, исследователи переключили свое внимание с изучения методов частотной области на алгоритмы пространственной области. На втором этапе основное внимание было уделено регуляризированным многокадровым системам SR. Байесовская MAP-методика стала наиболее популярной благодаря своей хорошей производительности и гибким характеристикам. В последние годы, однако, развитие многокадрового SR замедлилось, и исследователи в основном сосредоточились на реконструкции SR в различных практических областях применения.

К сожалению, широкое практическое использование SR все еще остается заметной проблемой. В развитии многокадрового SR существуют отмеченные выше трудности, в то же время SR для отдельных изображений стало актуальной задачей. Однако производительность этих алгоритмов зависит от надежности используемой базы данных. Каковы могут быть направления дальнейших исследований? Желательны более продвинутые, адаптивные и быстрые методы с широкими возможностями применения. Кроме того, методы должны тесно сочетаться с реальными практическими требованиями. Быстрое развитие аппаратных устройств также принесет новые проблемы для применения SR структур. Например, проект Google Skybox позволяет получать в реальном времени HR «видеонаблюдения Земли» с использованием дистанционного зондирования изображений SR. Концепция SR также была распространена на смежные области, такие как флуоресцентная микроскопия [17,56–58] и многобазовая томографическая съемка радаром с синтезированной апертурой (SAR), который позволяет получать радиолокационные изображения объектов [59, 60]. Кроме того, исследователи пытались применить методы однокадровой SR для обработки медицинских изображений и изображений дистанционного зондирования. Однако практическая применимость этих методов все еще ограничена относительно низкой производительностью и значительными временными затратами и для крупномасштабных приложений необходимы методы ускорения. В заключение следует отметить, что развитие и будущее SR вполне осуществимо, доступно для дальнейших исследований и совершенствований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. H. Takeda, P. Milanfar, M. Protter, et al., Super-resolution without explicit subpixel motion estimation, *IEEE Trans. Image Process.*, 18 (2009), p.p. 1958–1975.
2. H. Greenspan, Super-resolution in medical imaging, *Comput. Journal*, 52 (2009), p.p.43–63.
3. J.A. Kennedy, O. Israel, A. Frenkel, et al., Super-resolution in PET imaging, *IEEE Trans. Med. Imaging*, 25 (2006), p.p.137–147.
4. S.C. Park, M.K. Park, M.G. Kang, Super-resolution image reconstruction: a technical overview, *IEEE Signal Process. Mag.* 20 (2003) p.p.21–36.
5. S. Borman, R. Stevenson, Spatial Resolution Enhancement of Low-Resolution Image Sequences: A Comprehensive Review with Directions for Future Research, Laboratory for Image and Signal Analysis (LISA), University of Notre Dame, 1998 (Report, July).
6. S. Farsiu, D. Robinson, M. Elad, et al., Advances and challenges in super-resolution, *Int. J. Imaging Syst. Technol.* 14 (2004) p.p.47–57.
7. M. Elad, A. Feuer, Super-resolution reconstruction of image sequences, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 21 (1999) p.p.817–834.
8. K. Nasrollahi, T.B. Moeslund, Super-resolution: a comprehensive survey, *Mach. Vis. Appl.* 25 (2014) p.p.1423–1468.
9. D. Glasner, S. Bagon, M. Irani, Super-resolution from a single image, in 2009, in: *Proceedings of the IEEE12th International Conference on Computer Vision*, 2009, p.p. 349–356.
10. K.I. Kim, Y. Kwon, Single-image super-resolution using sparse regression and natural image prior, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 32 (2010) p.p. 1127–1133.
11. J. Yang, J. Wright, T.S. Huang, et al., Image super-resolution via sparse representation, *IEEE Trans. Image Process.* 19 (2010) p.p. 2861–2873.
12. W.T. Freeman, T.R. Jones, E.C. Pasztor, Example-based super-resolution, *IEEE Comput. Graph. Appl.* 22 (2002) p.p. 56–65.
13. D. Capel, A. Zisserman, Computer vision applied to super resolution, *IEEE Signal Process. Mag.* 20 (2003) p.p. 75–86.
14. J. Tian, K.K. Ma, A survey on super-resolution imaging, *Signal, Image Video Process.* 2011 (2011) p.p. 329–342.
15. J. Van Ouwerkerk, Image super-resolution survey, *Image Vis. Comput.* 24 (2006) p.p. 1039–1052.
16. K. Murthy, M. Shearn, B.D. Smiley, et al., SkySat-1: very high-resolution imagery from a small satellite, *Sens., Syst., -Gener. Satell.* XVIII (2014) (92411E-1–92411E-12).
17. M.J. Rust, M. Bates, X. Zhuang, Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM), *Nat. Methods* 3 (2006) p.p. 793–796.
18. M. Elad, Y. Hel-Or, A fast super-resolution reconstruction algorithm for pure translational motion and common space-invariant blur, *IEEE Trans. Image Process.* 10 (2001) p.p. 1187–1193.
19. C. Latry, B. Rouge, Super resolution: quincunx sampling and fusion processing, in: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toulouse, France, 2003, p.p. 315–317.
20. H. Shen, L. Zhang, B. Huang, et al., A MAP approach for joint motion estimation, segmentation, and super resolution, *IEEE Trans. Image Process.* 16, (2007), p.p.479–490.
21. C. Bouman, K. Sauer, A generalized Gaussian image model for edge-preserving MAP estimation, *IEEE Trans. Image Process.* 2, (1993), p.p. 296–310.
22. L. Hitachi, Super-resolution technology to convert video of various resolutions to high-definition [Электронный ресурс] URL: <http://www.hitachi.com/New/spnews/080924a.html> (дата обращения 22.05.2022).
23. Y. Wang, R. Fevig, R.R. Schultz, Super-resolution mosaicking of UAV surveillance video, in: *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing*, 2008, p.p. 345–348.
24. X. Zhang, M. Tang, R. Tong, Robust super resolution of compressed video, *Vis. Comput.*, 28, (2012), p.p. 1167–1180.
25. C.A. Segall, R. Molina, A.K. Katsaggelos, High-resolution images from low resolution compressed video, *IEEE Signal Process. Mag.* 20, (2003), p.p. 37–48.
26. M.D. Robinson, S.J. Chiu, J. Lo, et al., *New Applications of Super-resolution in Medical Imaging*, CRC Press, 2010.
27. D. Wallach, F. Lamare, G. Kontaxakis, et al., Super-resolution in respiratory synchronized positron emission tomography, *IEEE Trans. Med. Imaging* 31, (2012), p.p. 438–448.
28. D.-H. Trinh, M. Luong, F. Dibos, et al., Novel example-based method for super resolution and denoising of medical images, *IEEE Trans. Image Process.* 23, (2014), p.p. 1882–1895.
29. Y.-H. Wang, J. Qiao, J.-B. Li, et al., Sparse representation-based MRI super resolution reconstruction, *Measurement* 47, (2014), p.p. 946–953.
30. R.Y. Tsai, T.S. Huang, Multi-frame image restoration and registration, *Adv. Comput. Vis. Image Process.* 1, (1984), 317–339.
31. H. Zhang, Z. Yang, L. Zhang, et al., Super-resolution reconstruction for multiangle remote sensing images considering resolution differences, *Remote Sens.* 6 (2014) 637–657.
32. H. Wang, D. Wen, The progress of sub-pixel imaging methods, in: *Proceedings of the SPIE Conference Series*, 2014, pp. 91420K-1.
33. H. Shen, M.K. Ng, P. Li, et al., Super-resolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images, *Comput. J.* 52 (2009), p.p. 90–100.
34. M.T. Merino, J. Nunez, Super-resolution of remotely sensed images with variable-pixel linear reconstruction, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, (2007), p.p. 1446–1457.
35. M. Elbakary, M. Alam, Superresolution construction of multispectral imagery based on local enhancement, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 5, (2008), p.p. 276–279.
36. J.C.-W. Chan, J. Ma, F. Canters, A comparison of superresolution reconstruction methods for multi-angle CHRIS/Proba images, *SPIE Remote Sens.* (2008), 710904–1–710904–11.
37. K.H. Lim, L.K. Kwok, Super-resolution for SPOT5-Beyond supermode, presented at the 30th Asian Conference on Remote Sensing, Beijing, China, 2009.
38. Y. Zhong, L. Zhang, Remote sensing image subpixel mapping based on adaptive differential evolution, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Part B: Cybern.* 42, (2012), p.p. 1306–1329.
39. D. Vikhamar, R. Solberg, Subpixel mapping of snow cover in forests by optica remote sensing, *Remote Sens. Environ.* 84, (2003), p.p. 69–82.

40. Y. Ge, S. Li, V.C. Lakhan, Development and testing of a subpixel mapping algorithm, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47, (2009), p.p. 2155–2164.
41. R.C. Patel, M. Joshi, Super-resolution of hyperspectral images using compressive sensing based approach, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci.* 7, (2012), p.p. 83–88.
42. F.A. Mianji, Y. Zhang, Y. Gu Resolution enhancement of hyperspectral images using a learning-based super-resolution mapping technique, in: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009, pp. III-813–III-816.
43. P. D'Angelo, G. Kuschik, P. Reinartz, Evaluation of skybox video and still image products, *ISPRS Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XL-1 (2014), p.p. 95–99.
44. R.M. Willett, I. Jermyn, R.D. Nowak et al., Wavelet-based superresolution in astronomy, *Astronomical Data Analysis Software & Systems XIII*, vol. 314, 2004, p.p. 107.
45. L. Li, Q. Yu, Y. Yuan, et al., Super-resolution reconstruction and higher-degree function deformation model based matching for Chang'E-1 lunar images, *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* 52, (2009), p.p. 3468–3476.
46. C.G. Hughes, M.S. Ramsey, Super-resolution of THEMIS thermal infrared data: compositional relationships of surface units below the 100 m scale on Mars, *Icarus*, 208, (2010), p.p. 704–720.
47. Y. Zhuang, J. Zhang, F. Wu, Hallucinating faces: LPH super-resolution and neighbor reconstruction for residue compensation, *Pattern Recognit.* 40, (2007), p.p. 3178–3194.
48. X. Wang, X. Tang, Hallucinating face by eigentransformation, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Part C: Appl. Rev.* 35, (2005), p.p. 425–434.
49. W. Liu, D. Lin, X. Tang, Hallucinating faces: tensorpatch super-resolution and coupled residue compensation, in: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, p.p. 478–484.
50. Z. Yuan, J. Wu, S.-i. Kamata, et al., Fingerprint image enhancement by super resolution with early stopping, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2009, pp. 527–531.
51. Y.-H. Li, *Robust Long Range Iris Recognition from Video Using Super Resolution*, Citeseer, 2010.
52. G. Fahmy, Super-resolution construction of iris images from a visual low resolution face video, in: *Proceedings of the IEEE 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, ISSPA 2007, pp. 1–4.
53. W. Liu, D. Lin, X. Tang, Hallucinating faces: tensorpatch super-resolution and coupled residue compensation, in: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2005, p.p. 478–484.
54. R. Barnard, V. Pauca, T. Torgersen, et al., High-resolution iris image reconstruction from low-resolution imagery, *SPIE Opt. Photonics (2006)* (63130D-1–63130D-13).
55. B. Huang, M. Bates, X. Zhuang, Super resolution fluorescence microscopy, *Annu. Rev. Biochem.* 78, (2009), p.993.
56. M. Bates, B. Huang, G.T. Dempsey, et al., Multicolor super-resolution imaging with photo-switchable fluorescent probes, *Science* 317, (2007), p.p. 1749–1753.
57. G. Shtengel, J.A. Galbraith, C.G. Galbraith, et al., Interferometric fluorescent super-resolution microscopy resolves 3D cellular ultrastructure, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, (2009), p.p. 3125–3130.
58. X.X. Zhu, R. Bamler, Demonstration of super-resolution for tomographic SAR imaging in urban environment, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50 (2012), p.p. 3150–3157.
59. F. Lombardini, M. Pardini, Superresolution differential tomography: experiments on identification of multiple scatterers in spaceborne sar data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, (2012), p.p. 1117–1129.

© Денисюк Андрей Юрьевич (thisnight@thisnight.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»