

УДК 535.8+004.932.4

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОТЕРЬ СИГНАЛА, РЕГИСТРИРУЕМОГО ОДНОПИКСЕЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ, НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

*М. Н. Кулаков, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, П. А. Черёмхин**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Методы реконструкции на основе сжатого зондирования (СЗ) позволяют регистрировать и восстанавливать информацию из её разрежённого или сжатого представления. В работе проведено исследование устойчивости однопиксельного детектирования с использованием метода СЗ к частичной потере интенсивности регистрируемого излучения, пришедшего от объекта, при ограничении площади детектора. Задача решалась экспериментально путём реализации так называемой однопиксельной камеры, а также проведения оптической регистрации излучения от объекта и восстановления его изображения с использованием методов СЗ. Оценена устойчивость метода к пространственным потерям излучения в зависимости от размера и формы апертуры детектора. Получена оценка качества восстановления изображений в зависимости от двух факторов: регистрируемой доли падающего излучения и количества однопиксельных регистраций. Данные результаты могут обеспечить значительно более широкое применение метода при восстановлении информации, как зарегистрированной в динамических и рассеивающих средах, в том числе введением различных апертур и фурье-фильтрации, так и при существенных пространственных потерях излучения.

ВВЕДЕНИЕ

При регистрации изображений объектов, как правило, используются фото- и видеокамеры с числом пикселей от единиц до десятков миллионов. Однако при рассмотрении пространственно-частотного спектра полученных изображений часто оказывается, что вклад значительной части спектральных компонент мал. Этот факт лежит в основе как теории сжатия изображений [1], так и многих методов вычислительной фотографии [2], в том числе сжатого зондирования (СЗ; compressive sensing, также compressing sensing, compressed sensing) [3, 4]. Суть метода СЗ сводится к тому, что сигналы могут быть представлены в разрежённом (sparse) виде в некотором базисе. Делая существенно меньше измерений (регистраций), чем в случае стандартного фотографирования, можно получить изображение объекта уже с приемлемым качеством. Это достигается за счёт представления полученных регистраций как проекций сигнала на другой базис (базис измерений), некогерентный с базисом разрежения [3]. Теория СЗ начала применяться более десяти лет назад [3] и уже нашла многочисленные приложения, такие как томография [5], отображение в терагерцовом диапазоне частот [6], создание камер видимого и инфракрасного спектрального диапазонов [7], цифровая голография [8] и другие [4].

Практическим примером реализации методов СЗ является восстановление изображений при использовании однопиксельного детектирования [9], а также так называемая однопиксельная камера [7, 9, 10]. В ней для регистрации излучения от объекта используются однопиксельный детектор, фокусирующие элементы и прореживание, например скоростным микрозеркальным модулятором света (МЗМ) [11], выполненным на основе технологии цифрового микрозеркального устройства (Digital Micromirror Device) [12]. На МЗМ, позволяющий модулировать излучение за счёт поворота микрозеркал, выводятся бинарные массивы: случайные [4, 9, 13] либо, например, матрицы Адамара [4, 9]. Детектор регистрирует суммарную (по всем пикселям) интенсивность,

* cheremhinpavel@mail.ru

полученную в виде оптической реализации произведения Адамара (покомпонентного произведения) пространственного распределения излучения от объекта и отображённых на МЗМ значений. Количество регистраций составляет несколько сотен или тысяч, что на $4\div 5$ порядков меньше количества пикселей современных цифровых камер. Восстановление изображения объекта осуществляется методами оптимизации [6]. Однако в настоящее время отсутствуют однозначные оценки устойчивости метода однопиксельного детектирования с применением СЗ к пространственным потерям регистрируемого излучения. Например, в статье [14] проведено исследование потерь излучения из-за дифракционных эффектов в зависимости от апертуры маски Адамара при однопиксельном детектировании в миллиметровом диапазоне длин волн. В работе [15] оценивается влияние геометрических трансформаций изображений и разрядности аналого-цифрового преобразования на качество восстановления. В работах [16, 17] рассмотрены случаи добавления неоднородной среды и неоднородных рассеивающих центров, однако используется одна и та же апертура. В работе [18] исследуется влияние шума фотодетектора на качество восстановленных изображений при одной и той же величине апертуры. В работе [19] анализируется качество восстановления при использовании круглых пинголов с различными размерами, поставленных на оси излучения перед детектором. Однако не рассмотрены другие варианты формы апертуры, несоосность положения центров детектора и апертуры, а также связь качества восстановления с количеством регистраций. В работе [20] оценивается качество восстановления при использовании однопиксельной камеры в зависимости от уровней шумов детектора различных типов и его температуры.

Таким образом, в различных работах [7, 14–22] проблема устойчивости метода по отношению к пространственным потерям сигнала почти не затрагивается или упоминается лишь косвенно, хотя это может обеспечить значительно более широкое применение метода в задачах восстановления изображений, включая регистрацию информации в динамических и рассеивающих средах [4, 16, 17, 23], в том числе введением апертур различных форм и размеров и фурье-фильтрации [14, 24, 25]. В связи с этим целью данной работы является исследование устойчивости метода однопиксельного детектирования с применением СЗ к пространственным потерям регистрируемого излучения. Для этого осуществлены экспериментальная реализация однопиксельного детектирования и восстановление изображений из набора оптических регистраций при использовании ограничивающих детектор апертур, имеющих различный размер, форму и соосность положения. Также оценивалось качество восстановленных изображений в зависимости от числа регистраций. В результате ограничение регистрируемой информации (суммарной интенсивности) проводилось как по времени – за счёт снижения числа регистраций, так и в пространстве – снижением вклада различных пространственных частотных составляющих путём уменьшения размера апертуры.

1. ТЕОРИЯ СЖАТОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Применение методов СЗ основывается на том, что сигнал может быть восстановлен из значений, набор которых согласно теореме Котельникова оказывается недостаточным. Например, многие исследуемые и изучаемые сигналы $\mathbf{x}$ являются разрежёнными [3]. Поэтому они имеют множество компонент, имеющих околонулевые или нулевые значения, будучи представленными в некотором базисе (базисе разрежения):

$$\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{s}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор-столбец значений исследуемого сигнала, $\mathbf{B}$ — матрица базиса разрежения, $\mathbf{s}$ — весовые коэффициенты в виде вектора-столбца. Для решения задач СЗ необходимо сконструировать матрицу измерений (sensing matrix или measurement matrix) $\mathbf{A}$, которая позволяет сохранить

все компоненты исходного сигнала $\mathbf{x}$, разложенного в другом базисе (базисе измерений) с небольшим числом ненулевых составляющих. Также необходимо разработать метод восстановления, позволяющий восстановить сигнал $\mathbf{x}$ по набору измерений $\mathbf{y}$:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{s} = \mathbf{C}\mathbf{s}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}$ — полученный набор измерений в виде вектора-столбца, $\mathbf{C}$ — матрица сжатого зондирования. Чтобы матрица $\mathbf{A}$ обеспечивала восстановление изображения из малого числа измерений, налагается условие, называемое свойством ограниченной изометрии (restricted isometry property) [4]. Другое близкое условие — некогерентность (incoherence, очень слабая зависимость) матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$: строки разреженной матрицы $\mathbf{A}$ не должны равняться транспонированным столбцам матрицы $\mathbf{B}$ и наоборот. Оба условия выполняются, если матрица $\mathbf{A}$ состоит из случайных значений, например независимых и одинаково распределённых по функции Гаусса [3].

Полученная система уравнений (2) относительно $\mathbf{x}$ или $\mathbf{s}$ является недоопределённой, т. е. число её уравнений меньше числа неизвестных. Это соответствует, например, случаю, когда число пикселей изображения объекта на порядки больше, чем количество измерений $\mathbf{y}$ при использовании методов СЗ для его восстановления [9]. Поэтому вводится дополнительное ограничение на максимальную разрежённость представления исходного сигнала $\mathbf{x}$.

Для решения системы (2) вводится понятие l_p -нормы вектора $\mathbf{x}$ с элементами $x_1, x_2, \dots, x_p$:

$$\|\mathbf{x}\|_p = \left(\sum_{k=1}^p |x_k|^p \right)^{1/p}. \quad (3)$$

Классическому решению системы (2) соответствует минимизация нормы l_2 . Однако её использование обычно ведёт к неудовлетворительному качеству восстановления сигнала, т. к. представление оказывается недостаточно разреженным. Поэтому в СЗ предложено использовать минимизацию норм l_0 и l_1 [3]. Это приводит к необходимости решить задачу оптимизации, которая соответствует нахождению такого $\mathbf{x}$, при котором минимально выражение [26]

$$\frac{1}{2} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2^2 + \tau\varphi(\mathbf{x}), \quad (4)$$

где $\varphi(\mathbf{x})$ — функция регуляризации и $\tau \geq 0$ — параметр регуляризации.

Методы восстановления на основе сжатого зондирования можно разделить на шесть основных групп [6]:

1) использование выпуклой оптимизации (например, выбор базиса (basis pursuit), полная вариация (total variation), шумоподавление на основе выбора базиса (basis pursuit de-noising), симплексный выбор базиса (basis pursuit simplex algorithm) и другие);

2) последовательный и параллельный «жадные» алгоритмы (serial greedy algorithm, parallel greedy algorithm);

3) пороговые подходы (итеративные методы «жёсткого» и «мягкого» порога, аппроксимированный алгоритм передачи сообщений (approximate message passing algorithm) и другие);

4) комбинаторный подход;

5) невыпуклая оптимизация;

6) байесовые подходы.

К наиболее быстрым и простым относятся методы на основе «жадных» алгоритмов, например выбор подходящего (matching pursuit [4]). Это итеративный пошаговый метод, раскладывающий

сигнал на линейную комбинацию элементов. Алгоритм завершается, когда величина остатка достигнет заданного значения. Более мощными, но и вычислительно ресурсоёмкими являются методы на основе выпуклой оптимизации. Они обеспечивают сходимость решения к глобальному оптимуму. При практически отсутствующем в системе шуме можно использовать метод выбора базиса. Он обеспечивает поиск решения на основе l_1 -нормы (при $\tau \rightarrow \infty$ и $\varphi(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|_1$). Широко используется метод полной вариации с небольшим положительным параметром регуляризации, обычно составляющим величину порядка 10^{-3} .

2. ПРИМЕНЕНИЕ СЖАТОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ОДНОПИКСЕЛЬНОМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ

Серьёзным прорывом в практической реализации методов СЗ стало применение однопиксельных детекторов совместно с МЗМ света [7, 9, 10]. Эти модуляторы [11] позволяют осуществлять амплитудную модуляцию за счёт отражения светового потока от матрицы микрозеркал, обладают высокой скоростью отображения кадров, достигающей 32 кГц, при числе пикселей в несколько миллионов. Благодаря этим достоинствам МЗМ успешно используются для оперативного ввода изображений в оптическую систему, при оптическом кодировании [27], они перспективны при разработке голографических трёхмерных дисплеев, позволяют осуществлять генерацию изображений в инфракрасном диапазоне [28] и так далее. Отдельно можно выделить проблему, связанную с неплоскостью матрицы и защитного стекла МЗМ [29]; продвинутым моделям МЗМ подобный недостаток присущ в меньшей степени. На МЗМ выводится псевдослучайный набор бинарных значений, что обеспечивает некогерентность представления с любым фиксированным базисом [9]. Обычно таким набором являются матрицы со случайными значениями нулей или единиц [4, 9, 13], однако широко используются и матрицы в базисе Адамара [4, 9], Фурье [9, 30] и другие. Излучение, идущее от объекта, отражается от поверхности МЗМ и регистрируется однопиксельным детектором. Далее на МЗМ выводится другая матрица значений и снова регистрируется суммарный сигнал. Количество регистраций составляет несколько сотен или тысяч, что на $4 \div 5$ порядков меньше количества пикселей современных цифровых камер. При этом благодаря высокой скорости отображения МЗМ общее время регистрации может составлять всего лишь единицы или десятки миллисекунд. Восстановление изображения объекта осуществляется на основе методов оптимизации [4]. Помимо МЗМ, в качестве средств модуляции в СЗ [9] также применяются жидкокристаллические модуляторы света [12, 31]. Однако их использование существенно ограничено из-за более низких (на $2 \div 3$ порядка величины) скоростей отображения кадров [12].

Одной из вариаций реализации метода на основе однопиксельного детектора и МЗМ является установка [13], схема которой представлена на рис. 1. Полученный набор (вектор) интенсивностей регистрируемых детектором сигналов можно представить как скалярное произведение распределений сигналов на объекте и на МЗМ:

$$y_m = \mathbf{D}_m \cdot \mathbf{x}, \quad (5)$$

где y_m — интенсивность m -й регистрации, $\mathbf{D}_m$ — матрица положения зеркал МЗМ (элементы которой равны 0 либо 1) при m -й регистрации, представленная не в исходном двумерном виде, а преобразованная в вектор-строку, $\mathbf{x}$ — изображение исходного объекта, также преобразованное из двумерного вида в одномерный вид вектора-столбца. Далее ищется решение системы уравнений, состоящих из выражений (5), на основе выбора базиса разрежения и решения задачи оптимизации [9].

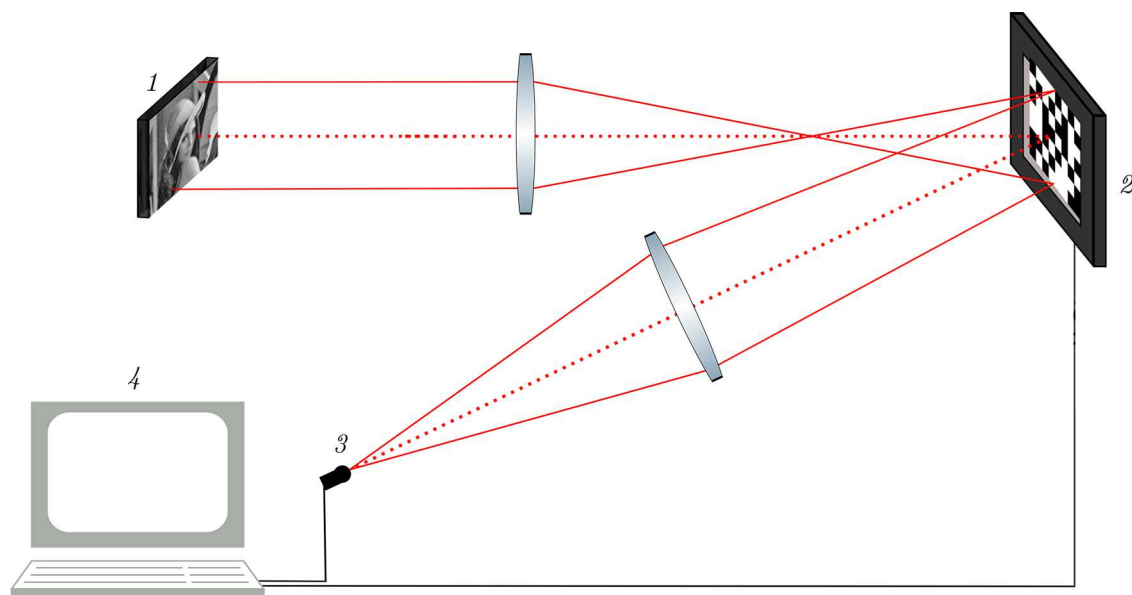


Рис. 1. Схема регистрации излучения однопиксельным детектором 3 с использованием микрозеркального модулятора 2: 1 — объект, 4 — компьютер

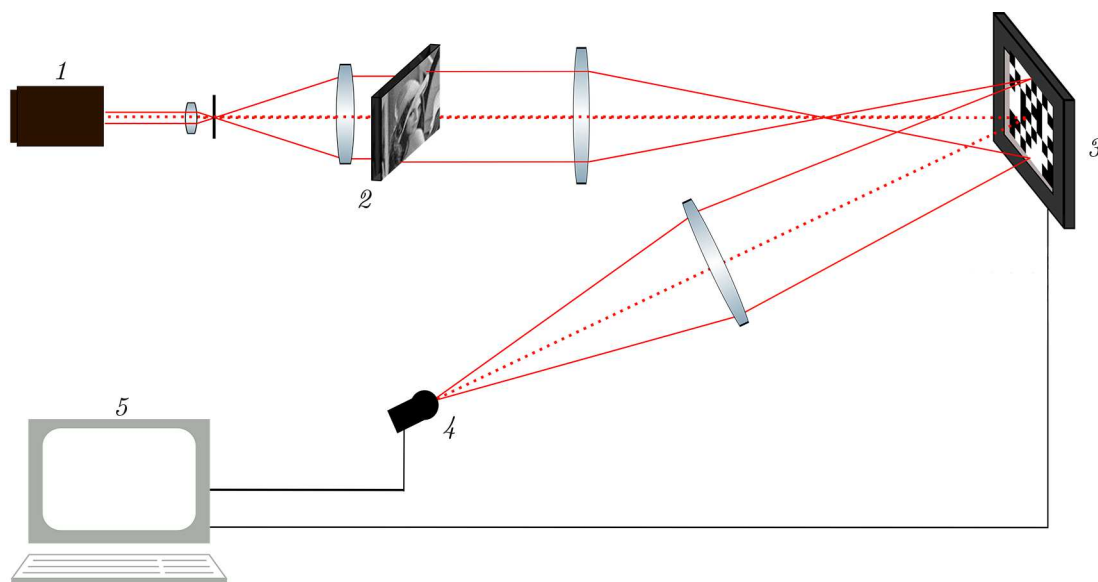


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для регистрации излучения: 1 — лазер, 2 — объект, 3 — МЗМ, 4 — детектор, 5 — компьютер

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СЖАТОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ РЕГИСТРАЦИЙ

Для проведения экспериментов реализована схема так называемой однопиксельной камеры [9, 10], включающей детектор, МЗМ, фокусирующие элементы, и проведены оптические эксперименты по регистрации излучения от объектов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

В установке использовался гелий-неоновый лазер с непрерывным излучением на длине волны

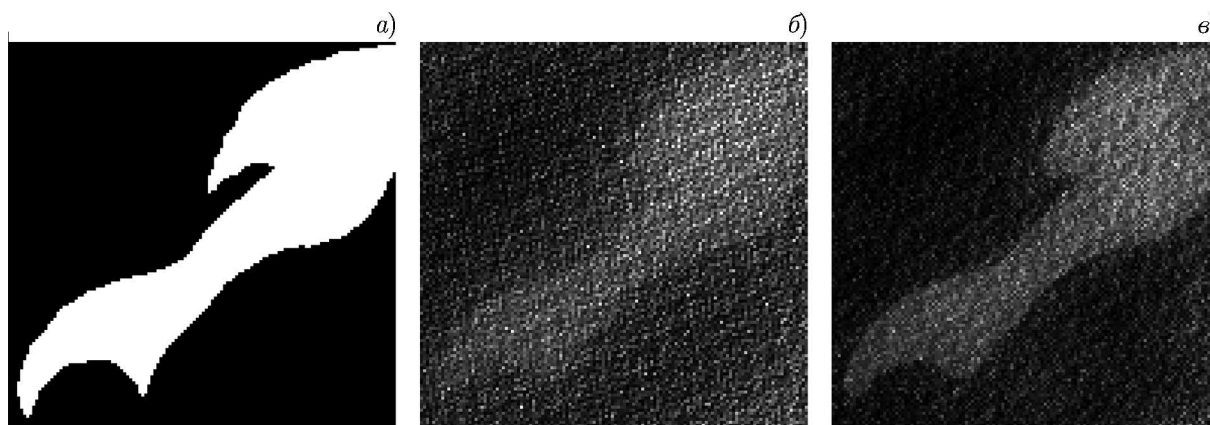


Рис. 3. Изображения объекта: исходное (а) и восстановленные из 200 (б) и 400 (в) регистраций

632,8 нм и мощностью 10 мВт. Данная длина волны излучения практически соответствует максимуму квантовой эффективности используемой цифровой камеры технического зрения PixeLink PL-B781F. Это должно повысить отношение сигнал/шум восстанавливаемых изображений, а также увеличить скорость регистрации до максимально возможной при применяемой яркости излучения. Использовался серийный микрозеркальный модулятор 0.7 XGA DLP7000 (производитель Texas Instruments) с разрешением 1024×768 пикселей. Поскольку подобные устройства обладают достаточной неплоскостностью матрицы и защитного стекла [29], то была выбрана наиболее равномерная область МЗМ. В качестве объекта использовался транспарант бинарного объекта, изображение которого представлено на рис. 3а. Размер исходного объекта 128×128 пикселей, а средняя яркость по объекту равняется 0,3 от максимума. В качестве детектора излучения использовалась цифровая камера, которая действовала по принципу однопиксельного регистратора, т. е. регистрировала только суммарный сигнал всего светового пятна. Она располагалась в фокусе второй линзы. В работе [13] приведены результаты численного моделирования в аналогичных условиях. В данной же работе представлены результаты оптических экспериментов. Оценка качества восстановления проводилась с помощью пикового отношения сигнал/шум (peak signal-to-noise ratio, PSNR) [32]:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right), \quad (6)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\mathbf{L}(i, j) - \mathbf{K}(i, j)]^2, \quad (7)$$

где MAX — максимальная интенсивность пикселя изображения, MSE — среднеквадратичная ошибка для двух изображений $\mathbf{L}(i, j)$ и $\mathbf{K}(i, j)$ с размерами $m \times n$, одно из которых считается зашумлённым приближением другого. В случае исходного бинарного объекта $\text{MAX} = 1$. Для соответствия сигналы в пикселях восстановленного изображения также нормировались на единицу. В области сжатия изображений величины PSNR порядка 25 дБ считаются очень хорошим результатом [32], значения выше 20 дБ — типичными [32], а значения свыше 10 или 15 дБ — удовлетворительным [33]. В качестве минимальной границы удовлетворительного результата восстановления в данной статье было выбрано значение 12,5 дБ, а в качестве стандартного удовлетворительного 15 дБ.

В экспериментах было проведено до 1 600 регистраций суммарного сигнала, что составило менее 10 % нормированного числа регистраций (числа регистраций, нормированного на число пикселей исходного идеального изображения). Полученные значения интенсивности представлялись

в виде вектора, каждое значение которого соответствует заданному случайному распределению на МЗМ (см. выражение (5)). Для восстановления изображения в работе используется метод выпуклой оптимизации — шумоподавление на основе выбора базиса — с применением прямо-двойственного алгоритма (primal-dual algorithm) [4]. Метод является итеративным. Минимизация происходила либо до заданного количества итераций, либо до приближения минимального значения ошибки к заданному значению.

Полученные значения интенсивности y были близки друг к другу. Однако если большая доля более ярких составляющих излучения, пришедшего от объекта, попадала либо на значительную часть отображённых единиц на МЗМ, либо на значительную часть нулей, то тогда появлялись более существенные отклонения значения до более высокого или низкого уровней соответственно.

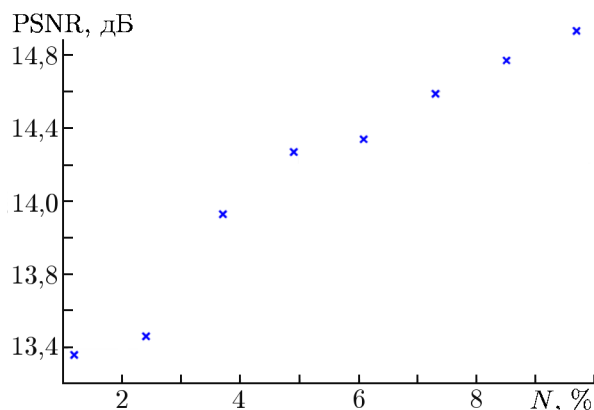


Рис. 4. График зависимости PSNR от нормированного числа регистраций N

нормированное число регистраций было на один порядок меньше. В результате на изображениях присутствует достаточно большое количество шума, однако это обеспечивает увеличение скорости регистрации на такую же величину (на порядок). Можно дополнительно повысить качество восстановленных изображений, зная тип объекта, и применить, например, бинаризацию [34]. График зависимости качества восстановления по величине PSNR от нормированного числа регистраций представлен на рис. 4. Как видно, при нормированном числе регистраций, равном нескольким процентам, качество восстановления уже превышает минимальный удовлетворительный уровень по величине PSNR. При нормированном числе регистраций более 8,5 % величина PSNR становится больше 15 дБ, что соответствует стандартному удовлетворительному уровню (см., например, [33]). Данные результаты согласуются с представленными в работе [13] результатами численных экспериментов. При этом качество восстановленного изображения не выходит на насыщение с увеличением числа регистраций, а продолжает улучшаться.

Полученные результаты демонстрируют работоспособность реализованной экспериментальной установки. Достаточной для восстановления изображения с удовлетворительным качеством по величине PSNR оказывается регистрация набора сигналов, число которых составляет единицы процентов от количества пикселей используемого объекта.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АПЕРТУРЫ

В данном разделе проводится оценка устойчивости метода однопиксельного детектирования с применением методов СЗ по отношению к пространственным потерям сигнала. Решение данной задачи необходимо для оценок возможностей применения метода: при динамически меняющемся

Результаты восстановления изображения из различного числа регистраций интенсивности представлены на рис. 3б и в: 200 регистраций (нормированное число регистраций равно 1,2 %, рис. 3б) и 400 регистраций (нормированное число регистраций 2,4 %, рис. 3в). С визуальной точки зрения получено минимальное удовлетворительное качество восстановления по величине PSNR при нормированном числе регистраций 1,2 %. Однако обычно в подобных экспериментах число регистраций существенно больше и составляет десятки процентов от числа пикселей исходного изображения объекта, иногда доходя до 100 % [9].

В проведённом же в данной работе эксперименте В результате на изображениях присутствует достаточно большое количество шума, однако это обеспечивает увеличение скорости регистрации на такую же величину (на порядок). Можно дополнительно повысить качество восстановленных изображений, зная тип объекта, и применить, например, бинаризацию [34]. График зависимости качества восстановления по величине PSNR от нормированного числа регистраций представлен на рис. 4. Как видно, при нормированном числе регистраций, равном нескольким процентам, качество восстановления уже превышает минимальный удовлетворительный уровень по величине PSNR. При нормированном числе регистраций более 8,5 % величина PSNR становится больше 15 дБ, что соответствует стандартному удовлетворительному уровню (см., например, [33]). Данные результаты согласуются с представленными в работе [13] результатами численных экспериментов. При этом качество восстановленного изображения не выходит на насыщение с увеличением числа регистраций, а продолжает улучшаться.

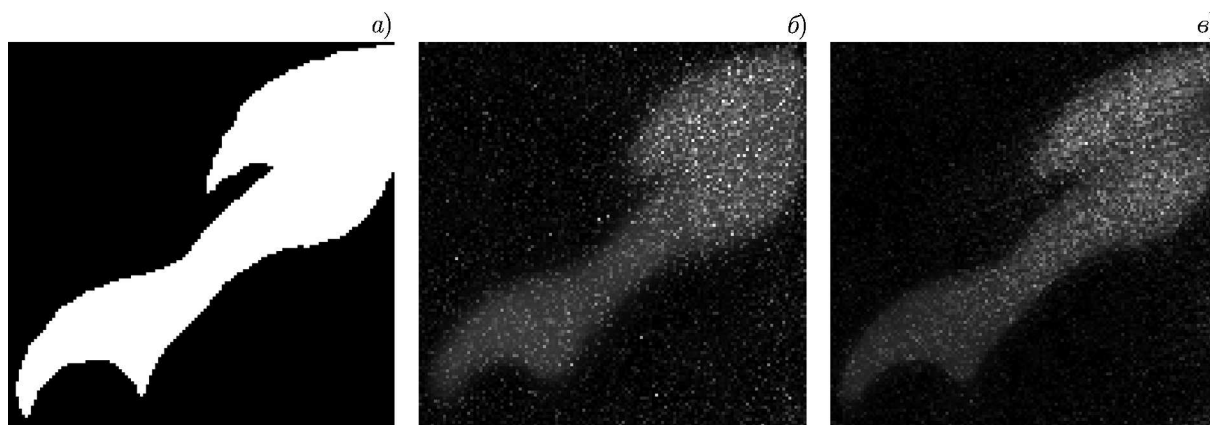


Рис. 5. Изображения объекта: исходное (а) и восстановленные при наличии ограничивающей апертуры, пропускающей 51 % (б) и 70 % (в) интенсивности излучения

положении регистратора излучения (например, вибрационные колебания среды, на которой установлен детектор; наличие эффекта «дрожащей камеры» и прочее), при наличии значительных потерь сигнала между МЗМ и детектором (например, при съёмке не в лабораторных условиях), при наличии динамических и рассеивающих сред между МЗМ и детектором (например, при регистрации скрытых объектов) и так далее.

Проведены оптические эксперименты по регистрации излучения с изменением размера и формы апертуры. Схема экспериментальной установки соответствует представленной на рис. 2. Однако если в опытах, описанных в разделе 3, детектор регистрировал только суммарный сигнал всего светового пятна, то в данном случае регистрировались целые кадры цифровой камерой с возможностью удаления части пикселей. Вырезая часть пикселей кадра, можно отсеять некоторую долю интенсивности, интегрально соответствующей оптической реализации произведения исходного изображения объекта и матрицы, отображённой на МЗМ. Данная цифровая операция удаления части пикселей соответствует введению апертуры перед детектором. Для различных размеров и форм смоделированной таким образом апертуры регистрировались кадры, значения сигналов в каждом зарегистрированном кадре складывались (т. е. находилось одно значение сигнала — среднее по кадру). Для восстановления изображения, аналогично разделу 3, использовался метод выпуклой оптимизации — шумоподавление на основе выбора базиса — с применением прямо-двойственного алгоритма [4].

На рис. 5 приведены некоторые восстановленные изображения для различных апертур. Значение 100 % соответствует интенсивности светового сигнала по полному кадру без введения апертуры. Далее бралась часть кадра, ограниченная апертурой с определённой формой, и оценивалось, какая доля интенсивности ей отвечает. Оставшаяся доля и считалась коэффициентом пространственных потерь (в процентах). Так, значения 51 % и 70 %, указанные в подписи рис. 5, соответствуют использованию долей площади кадра, в которых остаётся 51 % и 70 % интенсивности. При этом доля потерянной интенсивности излучения (в процентах) при ограничении площади в общем случае не соответствует величине сокращения используемой площади детектора (также в процентах), однако в некоторых случаях оказывалась очень близка к ней. Например, сокращение доли излучения до 51 % (см. рис. 5б) соответствовало использованию 51 % площади полного кадра. Нормированное число регистраций в данном случае составляло 3,7 %, а величина PSNR была равна 14,1 дБ (см. рис. 4) при использовании 100 % интенсивности.

Как видно, при 49-процентном уменьшении площади распределения интенсивности излучения в восстановленном изображении наблюдаются очертания объекта и оно визуально сопоставимо

по качеству с рис. 4. В восстановленных изображениях, так же как и на рис. 4, присутствует достаточно большое количество шума из-за малого числа регистраций, что обеспечивает ускорение детектирования излучения, и из-за снижения площади регистрации, что расширяет возможности применения метода в динамически меняющихся средах. График зависимости качества восстановления по величине PSNR от доли интенсивности зарегистрированного излучения представлен на рис. 6. Качество восстановления повышается с увеличением размера апертуры. Это связано с увеличением количества информации в каждом интегральном значении интенсивности, что используется при реконструкции изображения. При снижении доли интенсивности на 40 % относительно максимальной качество восстановления изображения становится сопоставимым по величине PSNR с таковым для объектов, представленных на рис. 4, при нормированном числе регистраций $1 \div 2$ %. При этом рис. 6 содержит значения PSNR для четырёх использовавшихся типов апертур с различными формами: круговые, прямоугольные, овальные и ромбические. Апертура выбиралась произвольно для каждой регистрации, и учитывалось процентное ограничение пропускаемого излучения. Например, в случаях, соответствующих рис. 5б и в, использовались прямоугольные апертуры. Применение другого типа апертуры, но с аналогичной долей интенсивности регистрируемого излучения, практически не влияло на величину PSNR. Поэтому, в отличие от площади, форма и положение апертуры оказывали существенно более слабое влияние на изменение качества восстановления.

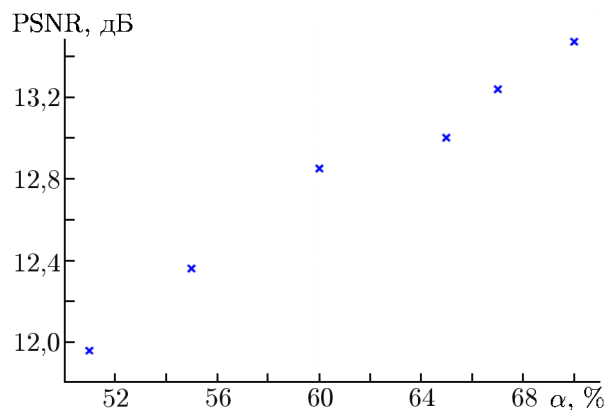


Рис. 6. График зависимости PSNR от доли используемой интенсивности излучения α

Таким образом, даже существенные пространственные потери интенсивности не оказывают значительного влияния на качество восстановленных изображений. Так, при пространственных потерях в 50 % значение PSNR снизилось на 2,2 дБ, а при потерях в 30 % — лишь на 0,7 дБ. Это объясняется тем, что при восстановлении методами СЗ используется только набор интегральных значений интенсивности. Хотя каждое значение содержит информацию о покомпонентном произведении изображения объекта и случайных массивов, отображённых на МЗМ, но также и фиксированная часть суммарной интенсивности в пределах апертуры содержит подобную информацию. Даже регистрация нулевой пространственной частоты фурье-спектра излучения может обеспечить восстановление изображения, т. к. в ней содержится среднее значение получаемой интенсивности (покомпонентного произведения изображения объекта и отображённых на МЗМ массивов). Поэтому в отличие от стандартной многопиксельной регистрации цифровыми камерами однопиксельное детектирование оказывается более устойчивым к пространственным потерям интенсивности, т. к. восстанавливается все изображение, а не его часть. В результате снижение суммарной интенсивности за счёт ограничения как части падающего излучения на детектор, так и его различных частотных составляющих при использовании однопиксельного детектирования не будет приводить к существенному ухудшению качества восстановления отдельных элементов или всего объекта, а главным образом вызовет уменьшение общей интенсивности регистрируемого излучения. Полученные результаты подтверждают данный вывод и показывают устойчивость методов однопиксельного детектирования к пространственным потерям интенсивности излучения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование устойчивости однопиксельного детектирования с применением методов СЗ к пространственным потерям интенсивности регистрируемого излучения. Для этого экспериментально реализована схема так называемой однопиксельной камеры, проведены оптические эксперименты по регистрации излучения от объектов и с использованием методов СЗ восстановлены изображения.

В ходе решения задачи регистрируемая информация ограничивалась одновременно как во времени (по количеству регистраций детектором), так и в пространстве (ограничением апертуры детектора). Результаты демонстрируют достаточно высокую степень надёжности метода по сравнению со стандартной регистрацией многопиксельными цифровыми камерами. Так, качество восстановления изображения снизилось на 1,3 дБ при 40-процентных пространственных потерях интенсивности.

Полученные результаты показывают возможность более широкого использования метода в задачах регистрации информации при наличии динамически меняющихся условий, в том числе с существенной потерей части излучения из-за внешних воздействий, как в видимом, так и в инфракрасном спектральных диапазонах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-07-00829) и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mallat S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way. Burlington : Academic, 2009. 832 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>
2. Lukac R. Computational photography: methods and applications. Boca Raton : CRC Press, 2016. 564 p.
3. Candès E. J., Wakin M. B. // IEEE Signal Proc. Mag. 2008. V. 25, No. 2. P. 21–30. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914731>
4. Rani M., Dhok S. B., Deshmukh R. B. // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 4875–4894. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793851>
5. Zhang F., Liang X., Cheng R., et al. // IEEE Geosci. Remote Sen. Lett. 2020. V. 17, No. 3. P. 446–450. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2926301>
6. Watts C. M., Shrekenhamer D., Montoya J., et al. // Nat. Photon. 2014. V. 8. P. 605–609. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.139>
7. Duarte M. F., Davenport M. A., Takhar D., et al. // IEEE Signal Proc. Mag. 2008. V. 25. P. 83–91. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914730>
8. Zhang W., Cao L., Brady D. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121, No. 9. Art. no. 093902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.093902>
9. Edgar M. P., Gibson G. M., Padgett M. J. // Nat. Photon. 2019. V. 13, No. 1. P. 13–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0300-7>
10. Sun M.-J., Edgar M. P., Gibson G. M., et al. // Nat. Commun. 2016. V. 7, Art. no. 12010. <https://doi.org/10.1038/ncomms12010>
11. Родин В. Г. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 3. С. 347–353. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353>
12. Компанец И. Н., Андреев А. Л. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 4. P. 294–302. <https://doi.org/10.1070/QEL16293>

13. Kulakov M.N., Starikov R.S., Cheremkhin P.A. // *KnE Energy*. 2018. V.3, No. 3. P.509–522. <https://doi.org/10.18502/ken.v3i3.2065>
14. Gopalsami N., Liao S., Elmer T.W., et al. // *Opt. Eng.* 2012. V.51, No. 9. Art. no. 091614. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.9.091614>
15. Kowalski M., Piszczek M., Szustakowski M., Ciurapinski W. // *Proc. 23rd DAAAM Int. Symp. Intelligent Manufacturing Automation 2012. Zadar, Croatia, 24–27 October 2012*. V.1. P.309–312.
16. Tajahuerce E., Duran V., Clemente P., et al. // *Opt. Express*. 2014. V.22. P.16 945–16 955. <https://doi.org/10.1364/OE.22.016945>
17. Duran V., Soldevila F., Irlas E., et al. // *Opt. Express*. 2015. V.23. P.14 424–14 433. <https://doi.org/10.1364/OE.23.014424>
18. Neifeld M.A., Ke J. // *Appl. Opt.* 2007. V.46, No. 22. P.5 293–5 303. <https://doi.org/10.1364/AO.46.005293>
19. Juregui-S'anchez Y., Clemente P., Lancis J., Tajahuerce E. // *Opt. Lett.* 2019. V.44, No. 3. P.679–682. <https://doi.org/10.1364/OL.44.000679>
20. Jauregui-S'anchez Y., Clemente P., Latorre-Carmona P., et al. // *Appl. Opt.* 2018. V.57, No. 7. P.B67–B73. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000B67>
21. Wenwen M., Dongfeng S., Jian H. // *Opt. Express*. 2019. V.27, No. 22. P.31 490–31 503. <https://doi.org/10.1364/OE.27.031490>
22. Huang W., Xiao L., Liu H., Wei Z. // *Sensors*. 2015. V.15, No. 1. P.2 041–2 058. <https://doi.org/10.3390/s150102041>
23. Wijesinghe P., Escobet-Montalbán A., Chen M., et al. // *Opt. Lett.* 2019. V.44, No. 20. P.4 981–4 984. <https://doi.org/10.1364/OL.44.004981>
24. Wang Q.Z., Liang X., Wang L., et al. // *Opt. Lett.* 1995. V.20. P.1 498–1 500. <https://doi.org/10.1364/OL.20.001498>
25. Berrocal E., Pettersson S.G., Kristensson E. // *Opt. Lett.* 2016. V.41. P.5 612–5 615. <https://doi.org/10.1364/OL.41.005612>
26. Afonso M.V., Bioucas-Dias J.M., Figueiredo M.A.T. // *IEEE Trans. Image Proc.* 2010. V.19. P.2 345–2 356. <https://doi.org/10.1109/TIP.2010.2047910>
27. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Кузьмин И.Д. и др. // *Квантовая электроника*. 2020. Т.50, № 2. С.195–196. <https://doi.org/10.1070/QEL17139>
28. Гибин И.С., Козик В.И., Нежевенко Е.С. // *Автометрия*. 2020. Т.56, № 1. С.3–12. <https://doi.org/10.15372/AUT20200101>
29. Molodtsov D.Yu., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. // *J. Phys: Conf. Series*. 2016. V.737. Art. no. 012074. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012074>
30. Zhang Z., Ma X., Zhong J. // *Nat. Commun.* 2015. V.6. P.6 225. <https://doi.org/10.1038/ncomms7225>
31. Шайкин И.А. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т.61, № 12. С.1 140–1 146.
32. Salomon D., Motta G. *Handbook of Data Compression*. London : Springer-Verlag, 2010. 1 198 p.
33. Chen Q., Chen D., Gong J., Ruan J. // *Entropy*. 2020. V.22. P.125. <https://doi.org/10.3390/e22010125>
34. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. // *Opt. Laser. Eng.* 2019. V.115. P.119–130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.019>

Поступила в редакцию 16 апреля 2020 г.; принята в печать 23 июня 2020 г.

**INFLUENCE OF SPATIAL LOSSES OF THE SIGNAL DETECTED
BY A SINGLE-PIXEL DETECTOR ON THE QUALITY OF OBJECT IMAGE
RECONSTRUCTION**

M. N. Kulakov, V. G. Rodin, R. S. Starikov, and P. A. Cheryomkhin

The reconstruction methods, which are based on compressed sensing (CS), make it possible to register and reconstruct information basing on its sparse or compressed representation. In this work, we study resistance of CS-based single-pixel imaging to partial loss of the intensity of the registered radiation from an object with a limited area of the detector. The problem was solved experimentally by implementing the so-called single-pixel camera, as well as detecting optical radiation from the object and reconstructing its image with the use of CS methods. The method resistance to spatial radiation losses is estimated as a function of the size and shape of the detector aperture. The quality of image reconstruction in the dependence of the two following factors is assessed: the share of the intensity of the detected radiation and the quantity of single-pixel detections. The results can ensure significantly wider application of the method to reconstruct data, both detected in dynamic and scattering media (including introduction of various apertures and Fourier filtration), and in the case of significant spatial radiation losses.