

## Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных

А. Л. Тимофеев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org / 0000-0003-2137-803X](https://orcid.org/0000-0003-2137-803X), [a\\_l\\_t@inbox.ru](mailto:a_l_t@inbox.ru)

А. Х. Султанов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org / 0000-0002-2830-3498](https://orcid.org/0000-0002-2830-3498)

И. К. Мешков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org / 0000-0003-3479-3072](https://orcid.org/0000-0003-3479-3072)

А. Р. Гизатулин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org / 0000-0002-0753-0608](https://orcid.org/0000-0002-0753-0608)

<sup>а</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, К. Маркса ул., 12, Уфа, 450008, РФ

**Введение:** рассматривается перенос операций обработки изображений в спектральную область. В силу дуальности представления информации кодирование, фильтрация, сжатие и другие преобразования возможны как в пространстве объекта, так и в области пространственных частот применительно к его пространственному спектру. **Цель:** оценить эффективность выполнения операций обработки изображений и произвольной цифровой информации в спектральной области. **Результаты:** предложен способ спектрального голографического кодирования, обеспечивающий выигрыш в помехоустойчивости на 7–8 дБ, обладающий меньшей вычислительной сложностью при изменении скорости кода в широких пределах. В процессе кодирования блок исходных данных заменяется кодовым словом, представляющим собой линейную одномерную голограмму виртуального точечного источника. Для передачи по каналу связи синтезируется сигнал с заданным спектром, форма которого является одномерной голограммой, значения которой округлены до одного бита, и представляет она собой последовательность нулей и единиц: единица означает наличие в спектре соответствующей гармоники, ноль – отсутствие. Для создания сигнала с таким линейчатым спектром достаточно сложить набор гармоник равной амплитуды с номерами, соответствующими номерам позиций единиц в голограмме. Эта операция является одним из видов мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, отличающимся тем, что частоты ортогональных поднесущих находятся в кратном отношении, а в качестве цифровой модуляции используется амплитудная манипуляция. Предложен спектральный метод сжатия изображений, основанный на детальном анализе пространственного спектра изображения и удалении из него большого количества малозначимых участков. **Практическая значимость:** сокращение объема информации, а соответственно, и размера изображения может составить 4–8 раз и более при незначительном снижении качества изображения.

**Ключевые слова** – голографическое кодирование, спектральная фильтрация, спектральное сжатие.

**Для цитирования:** Тимофеев А. Л., Султанов А. Х., Мешков И. К., Гизатулин А. Р. Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 4, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2022-4-2-11

**For citation:** Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. Using the spectral approach in image and arbitrary data processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-4-2-11

### Введение

При обработке информации все шире применяются голографические методы, включающие как использование собственно голограмм, так и методы обработки цифровых массивов, не являющихся изображениями. При этом все виды цифровых голограмм образуют большие объемы данных, особенно если фиксируют большие углы обзора и объекты со значительной глубиной. И если голографические данные подлежат передаче или хранению, высокую важность приобретают средства кодирования и сжатия информации.

Существует большое число стандартов сжатия голографических изображений, в том числе JPEG, JPEG2000, Vp9 и HEVC/H.265 [1]. Во многих случаях методы сжатия изображений используют сходство между различными частями изображения во временной и частотной областях и сохраняют фрагменты похожих данных для уменьшения размера конечного файла с мини-

мальным ущербом для качества. Кроме того, современные методы сжатия используют различные математические операции для коррекции ошибок. В работе [2] представлен гибридный алгоритм сжатия HEVC-Wavelet, который использует центральное ядро HEVC и канал 2D-вейвлета для прогнозирования ошибки сжатия.

В работе [3] рассмотрено современное состояние голографического кодирования данных и предложен вариант метода HEVC на основе направленного преобразования для повышения эффективности сжатия и кодирования. В [4] исследованы комбинации методов, состоящих из частотной фильтрации голограммы, разделения спектра Фурье отфильтрованной голограммы на действительно/мнимую и амплитудно-фазовую части, получения его вейвлет-разложения различными преобразованиями и дополнительной обработки вейвлет-коэффициентов.

Для эффективной обработки информации кроме задачи сжать голограммы необходимо обе-

спечить их надежную передачу по каналам связи и (или) хранение. Интересные возможности в этом плане предоставляет тот факт, что внутреннюю информационную избыточность голограмм можно использовать и для сжатия, и для повышения помехоустойчивости, причем в регулируемых соотношениях.

В статьях [5–7] рассмотрено использование голографического кодирования произвольных цифровых данных для повышения помехоустойчивости и надежности передачи информации. Дальнейшим расширением области применения голографических методов обработки информации является переход в спектральную область, спектральная голография. Непосредственная обработка пространственного спектра изображения представляет интерес для задач фильтрации, модуляции и кодирования. Одним из методов решения этих задач является введение дополнительной спектральной модуляции [8]. Поскольку речь идет об амплитудной и фазовой информации, решение таких задач для сигналов, изменяющихся во времени, обычно проводится с помощью голографических методов, в том числе с помощью спектральной голографии [9]. Спектральная модуляция применима, например, в беспроводных системах передачи информации, использующих сверхширокополосные шумоподобные сигналы [10].

В работе [11] предложено модулировать спектр цифровой информационной последовательности, представляющей сверхширокополосный шумоподобный сигнал, и восстанавливать информацию в приемнике с помощью спектральной обработки.

В статье [7] описано голографическое помехоустойчивое кодирование в пространстве виртуального объекта, носителя информации. Однако в силу дуальности представления информации аналогичные преобразования возможны и в частотной области, применительно к пространственному спектру объекта. Объединение двух методов — голографического кодирования и непосредственной обработки спектра — в метод спектрального голографического кодирования дает еще более высокий результат в повышении помехоустойчивости систем передачи и хранения как изображений, так и произвольной информации.

Спектральный подход позволяет повысить не только помехоустойчивость, но и эффективность сжатия изображений. Несмотря на наличие большого числа методов сжатия изображений [12–16], остается актуальной задача поиска специальных методов, обладающих большей совместимостью с методами помехоустойчивого кодирования. Переход из пространства изображения

в область пространственных частот может дать возможность ее решить.

При рассмотрении сигналов, используемых как носители изображений, в алгоритмах сжатия с потерями для выбора оптимального набора параметров алгоритма для минимизации потерь необходимо учитывать характеристики изображений как в пространственной, так и в частотной области. Для этого можно использовать частотную декомпозицию (Фурье, вейвлет и др.) либо геометрическую интерпретацию [13]. Один из таких подходов — сжатие фазовых голограмм с использованием глубокого обучения нейросети — рассмотрен в работе [17].

Высокую эффективность с регулируемым уровнем вносимых искажений обеспечивает широко распространенный метод сжатия JPEG, использующий дискретное косинусное преобразование, реализуемое матрицей

$$DCT - 2_n = [\cos(k(l + 1/2)\pi/n)]_{0 \leq k, l < n}.$$

Для этого варианта дискретного косинусного преобразования с фиксированной размерностью вектора существуют алгоритмы, позволяющие свести количество операций умножения к минимуму.

Использование вейвлет-преобразований позволяет получить более высокую степень сжатия за счет удаления малозаметных деталей изображения. Большое значение имеет выбор метода пространственно-частотного разбиения спектра вейвлет-преобразования, например путем дальнейшей декомпозиции высокочастотных поддиапазонов для получения оптимального базиса [14]. Для повышения эффективности декомпозиции может быть использована адаптация базиса к содержанию изображения с количественной оценкой энтропии сигнала по базису вейвлет-пакетов  $y_k$  [15]:

$$H = - \sum_k y_k^2 \ln(y_k^2).$$

Кроме того, дополнительно повысить эффективность систем формирования и передачи цифровых изображений по каналам связи можно за счет комплексного использования алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования [18–20].

Таким образом, представляет интерес задача разработки методов помехоустойчивого кодирования и сжатия сигналов для повышения эффективности использования ресурсов канала связи (частотного ресурса, энергетика) при передаче голографических изображений путем частичного сокращения избыточности, содержащейся в голограмме, и использования оставшейся доли

избыточности для повышения помехоустойчивости. Далее рассматривается один из путей подхода к решению этой задачи — использование спектрального голографического кодирования и спектрального сжатия голограммы.

### Спектральное кодирование произвольной цифровой информации

В описанном [7] методе голографического помехоустойчивого кодирования двоичный  $k$ -разрядный блок исходных данных заменяется  $N$ -разрядным ( $N = 2^k$ ) кодовым словом, представляющим собой линейную одномерную голограмму виртуального точечного источника, позиция которого в виртуальном пространстве определяется значением кодируемого блока. В результате по цифровому каналу связи передается голограмма длиной  $N$  бит. В отличие от этого метода при спектральном голографическом кодировании используется передача по аналоговому каналу сигнала, форма спектра которого является той же цифровой одномерной голограммой, представляющей собой последовательность нулей и единиц — единица в  $i$ -й позиции означает наличие в спектре  $i$ -й гармоники, ноль — отсутствие.

Для создания сигнала  $y(mT)$  с таким линейчатым спектром достаточно сложить набор гармоник равной амплитуды с номерами, соответствующими номерам позиций единиц в голограмме:

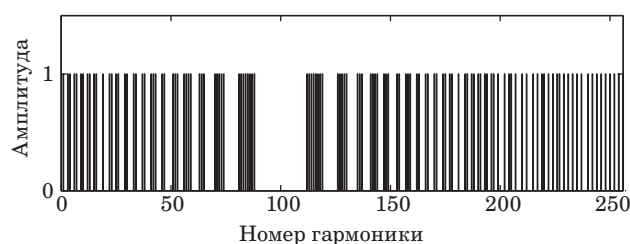
$$y(mT) = \sum_{i=1}^N (G(i) \times \sin(2\pi(m/M) \cdot i + r(i) \cdot 2\pi)),$$

где  $N$  — число гармоник;  $G(i)$  — линейный массив голограммы;  $M$  — число отсчетов в сигнале;  $r(i)$  — случайное число в диапазоне  $0 \dots 1$ .

Гармоники с номерами, соответствующими позициям нулей, в образовании сигнала  $y(mT)$  не участвуют. Эта операция является одним из видов мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), отличающимся тем, что частоты  $N$  ортогональных поднесущих находятся в кратном отношении, а в качестве цифровой модуляции используется амплитудная манипуляция.

В результате синтезируется сигнал  $y(mT)$  с линейчатым спектром  $S(f)$ , форма которого соответствует голограмме виртуального источника, порождаемого входным блоком данных (рис. 1). В данном примере число разрядов входного блока  $k = 8$ , закодированный сигнал  $y(mT)$  содержит  $N = 256$  гармоник, часть которых равна нулю.

Процедура синтеза сигнала  $y(mT)$  аппаратно может быть реализована в аналоговой форме,



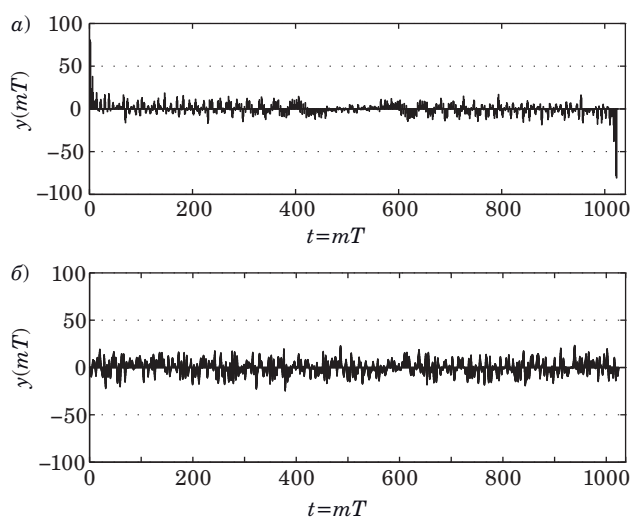
■ **Рис. 1.** Спектр-голограмма  
■ **Fig. 1.** Spectrum-hologram

если будет жестко выдержано целочисленное отношение всех частот к первой гармонике. Однако во многих случаях точнее и проще проводить цифровой синтез, который может быть реализован двумя способами. Первый способ — алгебраическое сложение  $N$  гармоник, образующих спектр-голограмму, второй — обратное быстрое преобразование Фурье (БПФ) синтезированного спектра.

К длительности сигнала  $y(mT)$  предъявляется одно требование — она должна быть не менее одного периода первой гармоники. Длительность большей величины не влияет на помехоустойчивость кодирования, но пропорционально увеличивает объем обрабатываемой информации.

Важной характеристикой является пик-фактор сигнала  $y(mT)$ , который достигает максимума при синфазности гармоник (рис. 2, а).

Повышенное значение пик-фактора предъявляет более высокие требования к линейности усилителя во избежание увеличения внеполосных излучений и снижения помехоустойчивости



■ **Рис. 2.** Форма сигнала: а — при синфазности гармоник; б — при случайной фазе гармоник  
■ **Fig. 2.** Waveform: а — with common mode harmonics; б — at random phase of harmonics

канала связи [21–23]. Наилучший результат достигается при распределении фаз гармоник по случайному закону. Сигнал  $y(mT)$  в этом случае имеет шумоподобную форму (рис. 2, б).

Таким образом, алгоритм спектрального кодирования заключается в следующем:

- по  $k$ -разрядному входному блоку данных формируется цифровая одномерная  $N$ -разрядная голограмма по алгоритму, приведенному в [7];
- синтезируется сигнал  $y(mT)$  с линейчатым спектром  $S(f)$ , форма которого соответствует полученной голограмме;
- для синтеза сигнала используются  $N$  ортогональных гармоник со случайными фазами;
- длительность сигнала устанавливается равной периоду нижней гармоники;
- синтезированный сигнал используется для передачи по каналу связи.

Структурная схема кодера приведена на рис. 3.

Для проведения обратного преобразования и восстановления исходного блока данных в приемнике сигнал оцифровывается и вычисляется его спектр. Выбор частоты дискретизации сигнала при наличии шума проводится с учетом не только ширины спектра, но и уровня шума в канале [24].

При этом для построения спектра используется нормированный по длительности фрагмент принятого сигнала, содержащий целое число периодов каждой гармоники: один период первой гармоники, два – второй и т. д. до  $N$  периодов гармоники с номером  $N(f_N)$ . Выполнение этого требования позволяет получить линейчатый спектр, не содержащий побочных гармоник. Данное требование ограничивает длительность

сигнала  $y(mT)$  снизу, но не устанавливает ограничения сверху.

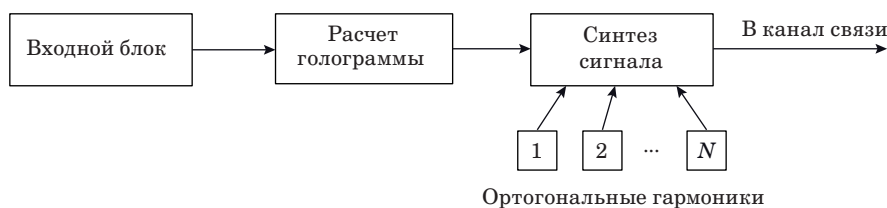
Цифровой массив, представляющий спектр, рассматривается как одномерная голограмма исходного цифрового блока, и декодируется описанным в [7] голографическим методом – производится восстановление исходного блока данных по цифровой голограмме.

Алгоритм декодирования состоит в следующем:

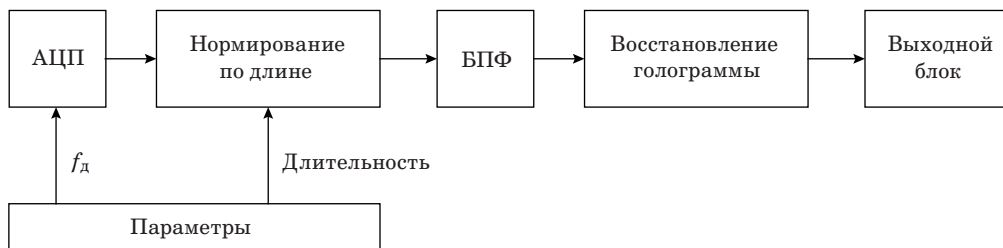
- производится аналого-цифровое преобразование (АЦП) с частотой дискретизации  $f_d \geq 4f_N$ ;
- принятый сигнал нормируется по длине (выбирается фрагмент, строго равный длительности периода первой гармоники) и подвергается БПФ, в результате чего формируется голограмма передаваемого блока данных;
- проводится восстановление исходного блока по полученной голограмме по алгоритму, приведенному в [7].

Структурная схема спектрального декодера представлена на рис. 4.

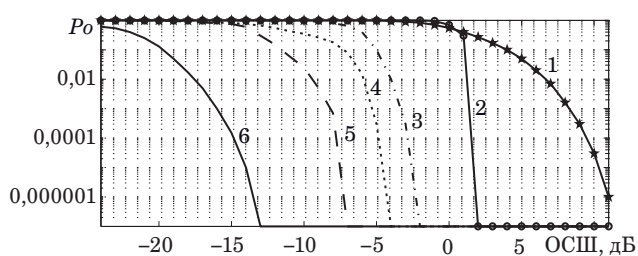
Перевод голографического кодирования из области времени в частотную область дает дополнительный выигрыш в помехоустойчивости. Моделирование в среде MATLAB процесса кодирования/декодирования в условиях наложения на сигнал аддитивного белого гауссова шума показало, что спектральный голографический код при размере блока данных  $k = 8$  и использовании  $N = 256$  гармоник в спектре сигнала обеспечивает вероятность ошибки декодирования  $10^{-6}$  при отношении сигнал/шум (ОСШ)  $-13$  дБ. Измеренные таким образом значения вероятности  $P_o$  ошибки декодирования спектральным



■ **Рис. 3.** Структурная схема спектрального кодера  
 ■ **Fig. 3.** Structural diagram of a spectral coder



■ **Рис. 4.** Структурная схема спектрального декодера  
 ■ **Fig. 4.** Structural diagram of a spectral decoder



■ **Рис. 5.** Зависимость вероятности ошибки декодирования  $P_o$  от ОСШ: 1 – без кодирования; 2 – РС-код; 3 – РМ-код; 4 – мажоритарный код; 5 – голографический код; 6 – спектральный код

■ **Fig. 5.** Dependence of decoding error probability  $P_o$  on signal-to-noise ratio: 1 – no coding; 2 – PC code; 3 – PM code; 4 – majority code; 5 – holographic code; 6 – spectral code

кодом сопоставлены с полученными [7] зависимостями вероятности ошибки декодирования от ОСШ для кода Рида – Соломона (РС-кода), кода Рида – Маллера (РМ-кода), мажоритарного кода и голографического кода. Моделирование проводилось для 8-разрядного слова исходных данных при длине кодового слова 256 бит (скорость всех кодов  $R = 1/32$ ) (рис. 5).

Из графиков видно, что спектральное голографическое кодирование обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости 7–8 дБ по сравнению с кодированием во времени.

Другим преимуществом спектрального кода является меньшая вычислительная сложность для широкого диапазона скоростей кода. Декодирование широко применяемого кода Рида – Соломона представляет собой довольно сложную задачу, для решения которой разработано несколько видов алгоритмов. Например, алгоритм Питерсона – Горенштейна – Цирлера сводит задачу нахождения позиций и значений  $t$  ошибок к решению двух систем линейных уравнений порядка  $t$ . Для решения можно воспользоваться методом Гаусса, и тогда сложность вычислений будет иметь порядок  $t^3$  [7]. Декодирование голографического кода в области времени состоит в  $N^2$ -кратном вычислении целочисленных сумм, что существенно проще алгоритмически и требует меньших вычислительных ресурсов. Для декодирования спектрального кода к этим операциям добавляется выполняемое один раз БПФ.

### Спектральная обработка изображений

Операции с пространственным спектром изображений позволяют проводить фильтрацию и коррекцию изображений (размытие, повышение резкости, регулировку яркости и контрастно-

сти и т. д.), а также алгоритмически более сложные операции, такие как сжатие изображений.

Наиболее просто реализуется фильтрация узкополосных помех – необходимо провести дискретное преобразование Фурье, в полученном цифровом спектре обнулить частоты, на которых присутствуют помехи, и выполнить обратное преобразование Фурье. Если задачу решать цифровыми фильтрами, при необходимости удалить несколько гармоник в разных частях спектра, суммарный порядок фильтров пропорционально возрастает, а вычислительные затраты для реализации спектральной фильтрации остаются теми же – прямое и обратное преобразование Фурье.

Спектральный метод сжатия изображений, основанный на анализе пространственного спектра изображения, отличается от существующих методов тем, что отсчеты спектра, подлежащие удалению, выбираются по структурным признакам – определенная часть регулярных интервалов спектра. Это позволяет при сжатии снизить объем вычислений практически до однократного вычисления спектра линейного массива.

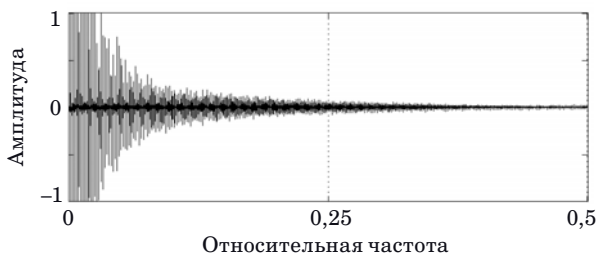
Спектральное сжатие как голограмм, так и изображений удобнее оценивать на примере изображений. Для проведения спектральной обработки тестовое изображение размером  $512 \times 512$  (рис. 6) путем построчной развертки преобразовано в линейный массив, спектр которого показан на рис. 7. Исследование изображения и его спектра, моделирование спектрального сжатия проведено в среде MATLAB.

Очевидный способ сокращения объема записанной информации, используемый практиче-



■ **Рис. 6.** Исходное изображение

■ **Fig. 6.** Original image

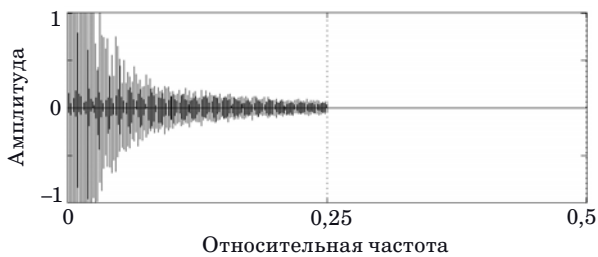


■ **Рис. 7.** Спектр линейного массива изображения  
 ■ **Fig. 7.** Line array spectrum image

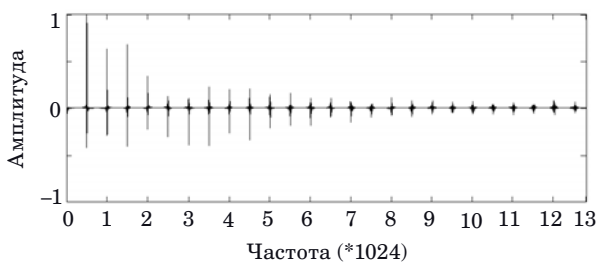
ски во всех кодеках, — стирание наименее значимой части спектра (в данном случае — высокочастотной), например, как показано на рис. 8, удаление высокочастотной половины спектра в диапазоне частот от  $f_d/4$  до  $f_d/2$ .

Более подробное рассмотрение структуры спектра может дать дополнительные возможности по сокращению объема информации. При достаточно большом увеличении заметно, что наиболее значимые гармоники группируются по краям регулярных интервалов вокруг значений, кратных числу строк изображения (512) (рис. 9).

В каждом интервале из 512 частот центральная часть имеет низкий уровень, слабо влияет на качество полного изображения и поэтому может быть сокращена — на рис. 10 удалены две трети каждого интервала.



■ **Рис. 8.** Удаление высокочастотной части спектра  
 ■ **Fig. 8.** Removal of the high-frequency part of the spectrum



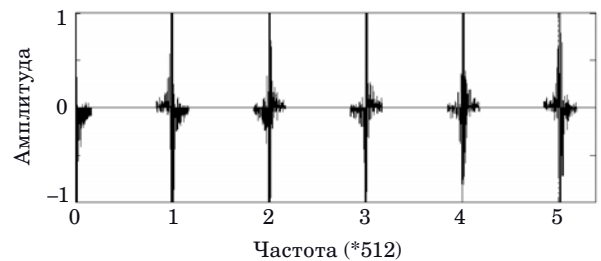
■ **Рис. 9.** Увеличенная структура спектра  
 ■ **Fig. 9.** Increased spectrum structure

Таким образом, удаление высокочастотной половины полного спектра и двух третей каждого интервала дает общее сокращение объема информации в изображении в 6 раз. При этом качество изображения практически не снижается (рис. 11).

Для формирования файла сжатого изображения необходимо после удаления фрагментов спектра уплотнить оставшиеся фрагменты и записать их единым массивом.

Таким образом, алгоритм спектрального сжатия включает в себя следующие операции:

- выбор коэффициента сжатия;
- преобразование матрицы изображения в линейный массив;
- прямое БПФ;
- обнуление высокочастотной части спектра;
- обнуление средней части регулярных интервалов спектра. Размер удаляемой части определяется заданным коэффициентом сжатия;



■ **Рис. 10.** Удаления внутри регулярных интервалов спектра  
 ■ **Fig. 10.** Deletes within regular intervals of the spectrum



■ **Рис. 11.** Сжатое в 6 раз изображение  
 ■ **Fig. 11.** 6x compressed image

- удаление из массива обнуленных элементов, сокращение длины массива;
- запись в служебное поле массива параметров сжатия.

Алгоритм восстановления изображения:

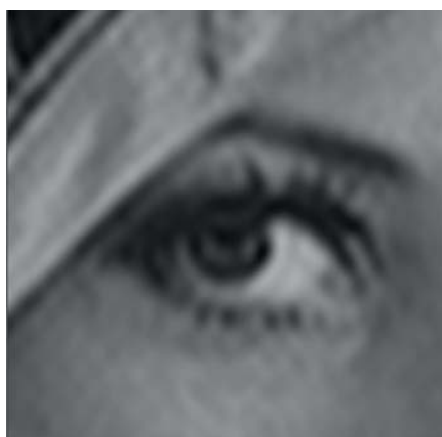
- вставка нулевых значений массива по числу удаленных значений спектра;
- отражение спектра из диапазона относительных частот  $0...0,5$  в диапазон  $0,5...1$  (восстановление инверсной копии спектра);
- обратное БПФ;
- преобразование линейного массива в матрицу изображения.

Для проведения сравнительной оценки эффективности спектрального сжатия выполнено сжатие тестового изображения методом JPEG при коэффициенте сжатия 4,5. Искажение изображения, видимое при большом увеличении



■ **Рис. 12.** Сжатие JPEG в 4,5 раза (увеличенный фрагмент)

■ **Fig. 12.** JPEG compression 4.5 times (enlarged fragment)



■ **Рис. 13.** Спектральное сжатие в 6 раз (увеличенный фрагмент)

■ **Fig. 13.** Spectral compression by 6 times (enlarged fragment)

(рис. 12), оказалось больше, чем при спектральном сжатии с коэффициентом сжатия 6 (рис. 13).

Для оценки искажений, вносимых при сжатии, вычислена с помощью встроенной функции пакета MATLAB среднеквадратическая ошибка  $\varepsilon = \text{mse}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , где  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  – матрицы исходного и сжатого изображений. Расчет показал, что среднеквадратическая ошибка при сжатии тестового изображения кодеком JPEG в 4,5 раза составила  $\varepsilon_J = 16,4$ , при спектральном сжатии в 6 раз среднеквадратическая ошибка  $\varepsilon_S = 11,4$ .

### Заключение

При передаче изображений и произвольных цифровых данных по каналам связи большое значение имеет помехоустойчивое кодирование для защиты от широкополосного шума и узкополосных помех. Спектральный подход к кодированию и сжатию информации позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам и использовать выигрыш от сокращения объема передаваемой информации для введения избыточности при помехоустойчивом кодировании и существенно повысить надежность передачи информации. Метод спектрального голографического кодирования, использующий цифровую голограмму для формирования спектра сигнала, в отличие от формирования сигнала, имеющего форму голограммы во временной области, обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости 7–8 дБ. Метод спектрального сжатия, основанный на удалении регулярных фрагментов спектра, обеспечивает в ряде случаев сравнимую степень сжатия при внесении меньших искажений, чем кодек JPEG. Спектральный метод сжатия не является универсальным способом сжатия изображений. Он предназначен в первую очередь для сжатия голограмм, передаваемых по цифровым каналам связи. Специфика этой задачи заключается в том, что любая голограмма обладает высокой избыточностью, и для повышения скорости передачи информации необходимо сократить избыточность. Однако при сокращении избыточности уменьшается запас помехоустойчивости, поэтому алгоритм сжатия должен быть согласован с алгоритмом помехоустойчивого кодирования при ясном понимании того, что происходит со спектром сигнала. Поэтому и является эффективным совместное использование спектрального кодирования и спектрального сжатия.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00041, <https://rscf.ru/project/22-29-00041/>.

## Литература

1. **Dufaux F., Xin Y., Pesquet-Popescu B., Schelkens P.** Compression of digital holographic data: An overview. *Proc. SPIE 9599, Applications of Digital Image Processing XXXVIII*, 95990I. doi:10.1117/12.2190997
2. **Hajihashemi V., Najafabadi H. E., Gharahbagh A. A., Leung H., Yousefan M. Y., Tavares J. M.** A novel high-efficiency holography image compression method, based on HEVC, Wavelet, and nearest-neighbor interpolation. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, no. 80, pp. 31953–31966. doi:10.1007/s11042-021-11232-0
3. **Peixeiro J. P., Brites C., Ascenso J. A., Pereira F.** Holographic data coding: benchmarking and extending HEVC with adapted transforms. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 282–297. doi:10.1109/TMM.2017.2742701
4. **Cheremkhin P. A., Kurbatova E. A.** Wavelet compression of off-axis digital holograms using real/imaginary and amplitude/phase parts. *Scientific Reports*, 2019, no. 9, pp. 7561. doi:10.1038/s41598-019-44119-0
5. **Timofeev A. L., Sultanov A. Kh.** Holographic method of error-correcting coding. *Proc. SPIE 11146. Optical Technologies for Telecommunications 2018*, Proc., 2019, vol. 11146, 111461A. doi:10.1117/12.2526922
6. **Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E.** Holographic method for storage of digital information. *Proc. SPIE 11516. Optical Technologies for Telecommunications 2019*, 1151604, N.Y., SPIE, 2020. doi:10.1117/12.2566329
7. **Тимофеев А. Л., Султанов А. Х.** Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации. *Компьютерная оптика*, 2020, т. 44, № 6, с. 978–984. doi:10.18287/2412-6179-CO-739
8. **Зубов В. А.** Анализ изменяющихся во времени оптических сигналов и передаточных функций с использованием спектральной модуляции. *Квантовая электроника*, 1999, т. 29, № 2, с. 173–176.
9. **Mazurenko Yu. T.** Spectral holography. *Journal of Optical Technology*, 1994, vol. 61, no. 1, pp. 31–41.
10. **Narayanan R. M., Chuang J.** *Electron. Lett.*, 2007, vol. 43, no. 22, pp. 1211.
11. **Калинин В. И., Чапурский В. В.** Передача данных на основе шумовых сигналов со спектральной модуляцией. *Радиотехника и электроника*, 2015, т. 60, № 10, с. 1072–1082.
12. **Сэлмон Д.** *Сжатие данных, изображений и звука*. М., Техносфера, 2006. 368 с.
13. **Гришенцев А. Ю.** Эффективное сжатие изображений на базе дифференциального анализа. *Журнал радиоэлектроники*, 2012, № 11. <http://jre.cplire.ru/iso/nov12/1/text.html> (дата обращения: 17.09.2018).
14. **Coifman R. R., Wickerhauser M. V.** Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Trans. Inform. Theory, Special Issue on Wavelet Transforms and Multires. Signal Anal.*, 1992, no. 38, pp. 713–718.
15. **Умняшкин С. В., Гизатуллин Р. Р.** Сжатие изображений на основе блочной декомпозиции в области пакетного вейвлет-преобразования. *Цифровая обработка сигналов*, 2014, № 1, с. 46–51.
16. **Saupe D., Hamzaoui R., Hartenstein H.** Fractal image compression — An introductory overview. *Fractal Models for Image Synthesis, Compression, and Analysis*. D. Saupe, J. Hart (eds). ACM, New Orleans, SIGGRAPH'96 Course Notes 27. 66 p.
17. **Jiao S.** Compression of phase-only holograms with JPEG standard and deep learning. *Appl. Sci.*, 2018, no. 8, p. 1258.
18. **Глумов Н. И.** Комплексный подход при выборе алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования для передачи цифровых изображений по каналам связи. *Компьютерная оптика*, 2004, № 26, с. 106–109.
19. **Гашников М. В., Глумов Н. И.** Повышение степени сжатия и визуального качества при иерархической компрессии изображений за счет предварительной фильтрации. *Компьютерная оптика*, 2005, № 28, с. 108–111.
20. **Демин В. В., Козлова А. В.** Методы кодирования-декодирования цифровых голограмм частиц. *Изв. вузов. Физика*, 2013, т. 5, № 10, с. 368–371.
21. **Fadeev D. K., Rashich A. V.** Optimal input power backoff of a nonlinear power amplifier for SEFDM-system. *Proc. of the NEW2AN, 2015 and 8th Conf.*, 2015, pp. 669–678.
22. **Tom A., Sahin A., Arslan H.** Suppressing alignment: Joint PAPR and out-of-band power leakage reduction for OFDM-based systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, vol. 64, no. 3, pp. 1100–1109.
23. **Isam S., Darwazeh I.** Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM systems. *Proc. of the 18th Intern. Conf. on Telecommunications*, 2011. doi:10.1109/CTS.2011.5898951
24. **Тимофеев А. Л., Султанов А. Х.** Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 5, с. 33–39. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39



UDC 621.391.01

doi:10.31799/1684-8853-2022-4-2-11

**Using the spectral approach in image and arbitrary data processing**A. L. Timofeev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org / 0000-0003-2137-803X, a\_l\_t@inbox.ruA. Kh. Sultanov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org / 0000-0002-2830-3498I. K. Meshkov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org / 0000-0003-3479-3072A. R. Gizatulin<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org / 0000-0002-0753-0608<sup>a</sup>Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks St., Ufa, 450008, Russian Federation

**Introduction:** The transfer of image processing operations to the spectral region is considered. Due to the duality of information representation, coding, filtering, compression and other transformations are possible both in the space of an object and in the region of spatial frequencies, in relation to its spatial spectrum. **Purpose:** To evaluate the efficiency of performing image processing operations and arbitrary digital information in the spectral domain. **Results:** A method for spectral holographic coding is proposed, which provides a gain in noise immunity by 7–8 dB and has less complexity of coding and decoding when changing redundancy over a wide range. During the coding process, the source data block is replaced by a code word, which is a linear one-dimensional hologram of a virtual point source. For transmission over a communication channel, we synthesize a signal with a given spectrum, the shape of which is a one-dimensional hologram, with its values rounded to one bit and the hologram itself being a sequence of zeros and ones – one means the presence of the corresponding harmonic in the spectrum, zero means the absence. To create a signal with such a line spectrum, it suffices to add a set of harmonics of equal amplitude with numbers corresponding to the position numbers of the units in the hologram. This operation is one of the types of orthogonal frequency division multiplexing, characterized in that the frequencies of the orthogonal subcarriers are in a multiple ratio, and amplitude shift keying is used as digital modulation. We propose a spectral method for image compression based on a detailed analysis of the spatial spectrum of an image and the removal of a large number of insignificant areas from it. **Practical relevance:** The reduction in the amount of information and, accordingly, the size of the image can be 4–8 times or more with a slight decrease in image quality.

**Keywords** – holographic coding, spectral filtering, spectral compression.

**For citation:** Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. Using the spectral approach in image and arbitrary data processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-4-2-11

**Financial support**

This work was supported by the grant of Russian Science Foundation No. 22-29-00041.

**References**

- Dufaux F., Xin Y., Pesquet-Popescu B., Schelkens P. Compression of digital holographic data: An overview. *Proc. SPIE 9599, Applications of Digital Image Processing XXXVIII*, 95990I. doi:10.1117/12.2190997
- Hajhashemi V., Najafabadi H. E., Gharahbagh A. A., Leung H., Yousefan M. Y., Tavares J. M. A novel high-efficiency holography image compression method, based on HEVC, Wavelet, and nearest-neighbor interpolation. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, no. 80, p. 31953–31966. doi:10.1007/s11042-021-11232-0
- Peixeiro J. P., Brites C., Ascenso J. A., Pereira F. Holographic data coding: benchmarking and extending HEVC with adapted transforms. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 282–297. doi:10.1109/TMM.2017.2742701
- Cheremkhin P. A., Kurbatova E. A. Wavelet compression of off-axis digital holograms using real/imaginary and amplitude/phase parts. *Scientific Reports*, 2019, no. 9, pp. 7561. doi:10.1038/s41598-019-44119-0
- Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding. *Proc. SPIE 11146, Optical Technologies for Telecommunications 2018*, Proceedings Volume 11146, 111461A, 2019. doi:10.1117/12.2526922
- Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E. Holographic method for storage of digital information. *Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications 2019*, 1151604, N.Y., SPIE, 2020. doi:10.1117/12.2566329
- Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 6, pp. 978–984 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-CO-739
- Zubov V. A. Analysis of time-varying optical signals and transfer functions using spectral modulation. *Quantum Electronics*, 1999, vol. 29, no. 2, pp. 173–176 (In Russian).
- Mazurenko Yu. T. Spectral holography. *Journal of Optical Technology*, 1994, vol. 61, no. 1, pp. 31–41.
- Narayanan R. M., Chuang J. *Electron. Lett.*, 2007, vol. 43, no. 22, pp. 1211.
- Kalinin V. I., Chapurski V. V. Data transmission on the basis of noise signals with spectral modulation. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1072–1082 (In Russian).
- Salomon D. *Compression of data, images and sound*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 368 p. (In Russian).
- Grishentsev A. U. Efficient Image Compression Based on Differential Analysis. *Journal of Radio Electronics*, 2012, no. 11. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/nov12/1/text.html> (accessed 17 September 2018) (In Russian).
- Coifman R. R., Wickerhauser M. V. Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Trans. Inform. Theory, Special Issue on Wavelet Transforms and Multires. Signal Anal.*, 1992, no. 38, pp. 713–718.
- Umniashkin S. V., Gisiatullin R. R. Compression of images based on block decomposition in the field of batch wavelet transform. *Digital Signal Processing*, 2014, no. 1, pp. 46–51 (In Russian).
- Saupe D., Hamzaoui R., Hartenstein H. *Fractal image compression – An introductory overview*. In: *Fractal Models for Image Synthesis, Compression, and Analysis*. D. Saupe, J. Hart (eds). ACM, New Orleans, SIGGRAPH'96 Course Notes 27. 66 p.
- Jiao S. Compression of phase-only holograms with JPEG standard and deep learning. *Appl. Sci.*, 2018, no. 8, p. 1258.
- Glumov N. I. An integrated approach to the selection of compression algorithms and error-correcting coding for the transmission of digital images via communication channels. *Computer Optics*, 2004, no. 26, pp. 106–109 (In Russian).
- Gashnikov M. V., Glumov N. I. Improving the compression ratio and visual quality with hierarchical image compression due to pre-filtering. *Computer Optics*, 2005, no. 28, pp. 108–111 (In Russian).
- Demin V. V., Kozlova A. V. Techniques of coding-decoding of particle digital holograms. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 10, pp. 368–371 (In Russian).

21. Fadeev D. K., Rashich A. V. Optimal input power backoff of a nonlinear power amplifier for SEFDM-system. *Proc. of the NEW2AN, 2015 and 8th Conf.*, 2015, pp. 669–678.
22. Tom A., Sahin A., Arslan H. Suppressing alignment: Joint PAPR and out-of-band power leakage reduction for OFDM-based systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, vol. 64, no. 3, pp. 1100–1109.
23. Isam S., Darwazeh I. Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM systems. *Proc. of the 18th Intern. Conf. on Telecommunications*, 2011. doi:10.1109/CTS.2011.5898951
24. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Influence of noise and sampling rate on the discrete image representation error. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 5, pp. 33–39 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-5-33-39

---

#### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

---