

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.8>

УДК: 621.391

## ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЗАШУМЛЕННЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин

Уфимский университет науки и технологий  
450076, Уфа, ул. З. Валиди, 32

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2024 г.

**Аннотация.** Рассмотрены два варианта использования разработанного ранее метода голографического кодирования для повышения надежности передачи информации в канале связи – кодирование цифрового канала и спектральное кодирование. Показано, что голографический код имеет высокую помехоустойчивость и обеспечивает вероятность правильного декодирования более 0,9999 при вероятности ошибки в канале 0,34. Спектральное голографическое кодирование позволяет обеспечить надежную связь в условиях наличия шума и помех, мощность которых на 10 дБ превышает мощность сигнала, что в свою очередь обеспечивает скрытность канала связи. Дополнительным преимуществом спектрального кодирования является повышение устойчивости к межсимвольной интерференции, что дает возможность отказаться от введения защитных интервалов и повысить спектральную эффективность, и снижение требований к стабильности частоты дискретизации при проведении БПФ в демодуляторе приемника.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, голографическое кодирование, спектральное кодирование, межсимвольная интерференция.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

**Автор для переписки:** Тимофеев Александр Леонидович, [a\\_1\\_t@inbox.ru](mailto:a_1_t@inbox.ru)

## Введение

Передача информации по радиоканалу всегда сопровождается воздействием шумов и помех. Для уменьшения их влияния на надежность передачи разработано большое число методов, однако ни один из них не является оптимальным и не может гарантировать заданную помехоустойчивость, особенно при наличии преднамеренных помех [1]. Поэтому на практике применяются подоптимальные способы защиты от активных помех, такие как перестройка несущей частоты, изменение частоты следования импульсов, их длительности и формы и т. д. Предложенный в [1] способ случайной смены кода фазовой модуляции от импульса к импульсу обеспечивает снижение флуктуационных составляющих ошибок на 20-30%. Достаточно широко используемым способом повышения устойчивости к воздействию помех разного вида является метод передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [2]. В [3] предложен метод передачи данных с внутрисимвольной ППРЧ, при которой передача информации осуществляется путем разделения каждого информационного символа на независимые элементы (субсимволы). В [4] подчеркнута эффективность прямого расширения спектра и псевдослучайной перестройки рабочих частот для решения задачи устранения эффекта замирания, вызванного многолучевым распространением сигналов, а также работы в условиях преднамеренных помех.

Для организации помехоустойчивых каналов активно используются сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием (orthogonal frequency division multiplexing – OFDM-сигналы) и их разновидность – COFDM (Coded OFDM), сочетающая канальное кодирование и OFDM [5]. COFDM-сигналы обладают высокой помехоустойчивостью и относительно простой аппаратной реализацией. К недостаткам можно отнести

необходимость точной синхронизации приемника и повышенные требования к линейности усилителей передатчиков, обусловленные высоким пик-фактором COFDM-сигналов. Дополнительным достоинством технологии COFDM является возможность применения различных помехоустойчивых кодов, в том числе широко используемых каскадных кодов BCH и LDPC, применяемых, например, в форматах цифрового телевидения DVB-S2, DVB-T2. В [4] описан механизм эффективного сочетания кодов Рида-Соломона и LDPC-кода для кодирования канала радиосвязи, работающий при отношении сигнал/шум около 2 дБ.

Одним из новых направлений цифровой обработки сигнала в радиоканалах является применение нейронных сетей. В [6, 7] показано, что пока не удастся обеспечить вероятность битовой ошибки у приемника на основе нейронной сети ниже, чем у оптимального приемника, но приемник на основе нейронной сети сохраняет работоспособность при значительных уровнях помех.

## **1. Использование голографического кодирования для повышения надежности канала связи**

Для дальнейшего повышения помехоустойчивости необходимы другие методы, обладающие более высокой устойчивостью к активным помехам всех видов. Таким методом является голографическое кодирование [8, 9]. Повышенная помехоустойчивость и корректирующая способность голографического кода объясняется использованием базового свойства голограммы – делимости, которое обеспечивает возможность восстановления полного изображения по небольшому фрагменту голограммы. Для использования этого свойства кодируемый блок данных представляется в виде виртуального оптического объекта, для которого вычисляется цифровая голограмма и передается по каналу связи. В приемнике происходит успешное восстановление блока данных даже по сильно искаженной помехами всех видов и случайным шумом голограмме. Рассмотрим два

способа использования голографического кодирования: в цифровом канале и спектральное кодирование в аналоговом канале.

## 2. Голографическое кодирование цифрового канала

В данном случае рассматривается цифровой канал связи, по которому передаются кодовые слова, полученные путем голографического кодирования. Способ организации цифрового канала (вид и параметры модуляции, частотный диапазон и другие параметры аналогового канала) не рассматривается и не изменяется. Все процессы, происходящие в аналоговом канале и приводящие к искажению передаваемой информации (помехи всех видов, случайный шум, межсимвольная интерференция, потери сигнала и т.д.) в конечном итоге проявляются в цифровом канале в виде битовых ошибок. Поэтому для интегральной оценки степени искажений, вызванных любыми причинами, будем использовать интенсивность битовых ошибок (BER – Bit Error Rate).

Голографическое кодирование заключается в вычислении для  $k$ -разрядного блока данных  $X$  его цифровой голограммы и осуществляется в два этапа [8]. На первом этапе блок  $X$  преобразуется во вторичный блок  $A$ , состоящий из  $n = 2^k$  точек  $A(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , значение одной из которых равно 1, остальных – нули:  $A(i) = 1$  при  $i = X$ ,  $A(i) = 0$  при  $i \neq X$ . При этом блок  $A$  интерпретируется как точечный источник с координатой  $X$  на черном фоне одномерного массива  $A$ . Для этого виртуального оптического объекта вычисляется одномерная голограмма – одномерный массив  $H(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  – как результат интерференции волнового фронта на виртуальном экране. Значения полученной голограммы округляются до одного бита – положительные принимаются за 1, отрицательные – за 0, в результате чего формируется  $n$ -битный одномерный массив  $H_o(j)$ , представляющий из себя кодовую комбинацию, соответствующую  $k$ -разрядному входному блоку данных  $X$ . Округление значений голограммы не вносит цифрового шума округления, так как информация заложена не в значениях точек (яркости)

голограммы  $H(j)$ , а в номере позиции ее центра. Одномерная  $n$ -битная голограмма (массив  $H_o(j)$ ) передается по каналу связи и в приемнике осуществляется обратное преобразование (декодирование) – определяется координата точки с максимальной яркостью в изображении, восстановленном по голограмме, и эта координата образует  $k$ -разрядный выходной блок данных.

Оценка эффективности голографического кодирования проведена путем моделирования в среде MATLAB процесса передачи информации по каналу связи с ошибками.

На рисунке 1 приведены графики зависимости вероятности безошибочного декодирования  $P$  от вероятности ошибки в канале BER для кода Рида-Соломона (РС-кода), кода Рида-Маллера (РМ-кода), мажоритарного и голографического кодов, полученные при одинаковой скорости кода  $R = 1/32$ . Моделирование показало, что голографическое кодирование обеспечивает наибольшую помехоустойчивость – вероятность правильного декодирования более 0,9999 при вероятности ошибки в канале до уровня BER = 0,34.

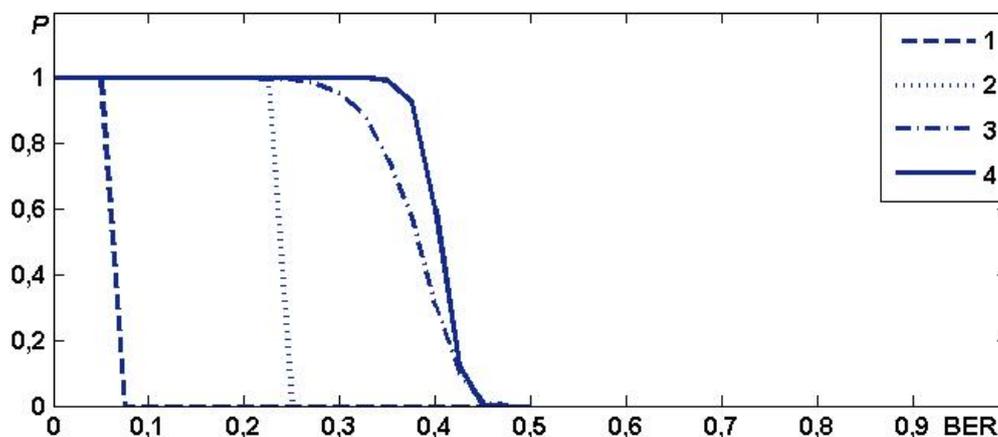


Рис. 1. Зависимость вероятности безошибочного декодирования  $P$  от вероятности ошибки на бит BER: 1 – РС-код, 2 – РМ-код, 3 – мажоритарный код, 4 – голографический код.

### 3. Спектральное голографическое кодирование в аналоговом канале

Термин «кодирование» обычно применяется по отношению к цифровому сигналу, но в данном случае он использован для аналогового сигнала, над которым производится бинарная операция – амплитудная манипуляция.

Спектральное голографическое кодирование заключается в синтезе аналогового сигнала, форма спектра которого совпадает с одномерной цифровой голограммой кодируемого блока данных [10, 11]. Одномерная голограмма представляет собой двоичную последовательность определенной длины, как и в первом способе (Рис. 2).

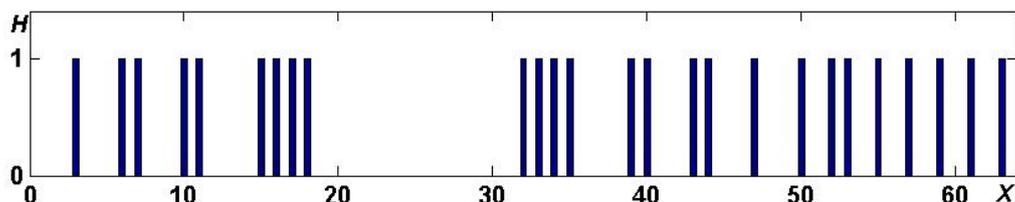


Рис. 2. Форма спектра – линейная голограмма длиной  $n = 64$ .

Сигнал с таким спектром формируется путем сложения гармоник равной амплитуды с частотами, присутствующими в спектре, изображенном на рисунке 2. Фазы гармоник не имеют значения, поэтому целесообразно разнести их по псевдослучайному закону, чтобы минимизировать пик-фактор сигнала. Форма такого сигнала со спектром, соответствующим рисунку 2, приведена на рисунке 3.

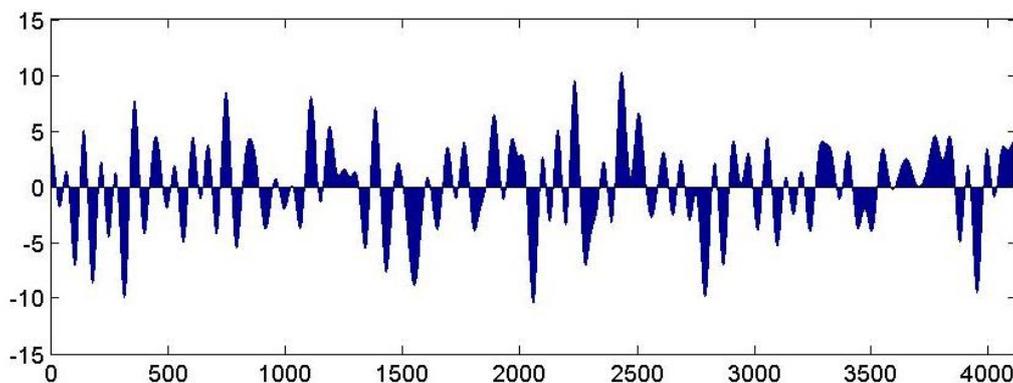


Рис. 3. Форма сигнала со случайными фазами гармоник.

Для того, чтобы принятый по каналу связи аналоговый сигнал после аналого-цифрового преобразования в приемнике имел неискаженный цифровой линейчатый спектр как на рис. 2, необходимо, чтобы окно анализа  $T_s$  (длительность сигнала, подвергаемого быстрому преобразованию Фурье (БПФ)), содержало целое число периодов всех имеющихся в сигнале гармоник. Отвечающие этому правилу гармоники являются ортогональными

в интервале анализа, поэтому формируемый таким образом сигнал относится к OFDM-сигналам. Способы формирования сигнала со спектральным кодированием описаны в [12] в разделе «Спектральное кодирование». Время передачи каждого кодируемого символа может быть несколько больше  $T_s$ , но длительность сигнала, вырезанного окном анализа и подвергаемого БПФ, должна быть строго равна  $T_s$ .

Полученный в результате БПФ спектр имеет форму голограммы и подвергается процедуре восстановления голограммы, в результате чего формируется одномерный массив восстановленного сигнала с ярко выраженным пиком, номер позиции которого соответствует значению переданного символа (Рис. 4).

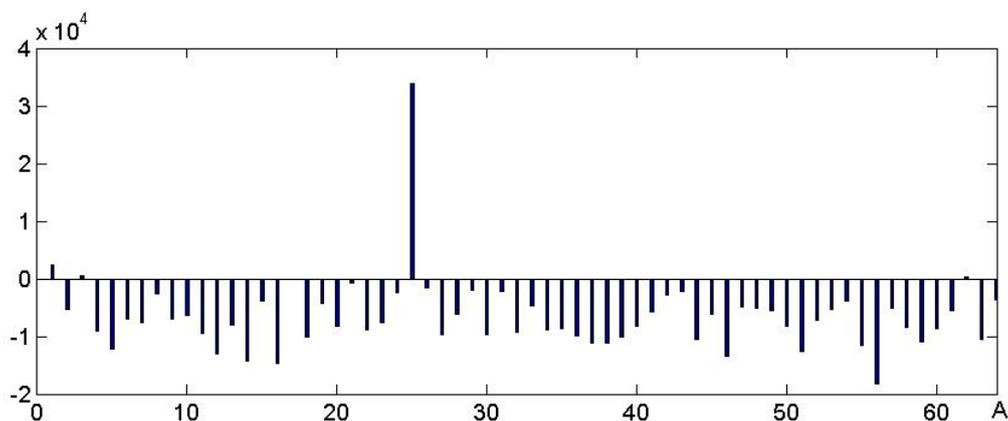


Рис. 4. Восстановленный сигнал при  $n = 64$ , значение переданного символа  $A = 25$ .

Голографический код сам по себе имеет высокую помехоустойчивость, но в применении к спектру сигнала обеспечивает возможность безошибочного приема сигнала, мощность которого на порядок ниже мощности шума. Так как в данном способе кодирования формируется аналоговый сигнал, более информативной оценкой надежности передачи является не вероятность безошибочного декодирования при битовых ошибках в канале, а оценка помехоустойчивости по отношению к аддитивным помехам и шуму в аналоговом канале. Поэтому при моделировании в среде MATLAB производилось наложение на сигнал белого гауссовского шума с заданным

отношением сигнал/шум  $S/N$  с помощью функции `awgn`. Результаты моделирования приведены на рисунках 5-7.

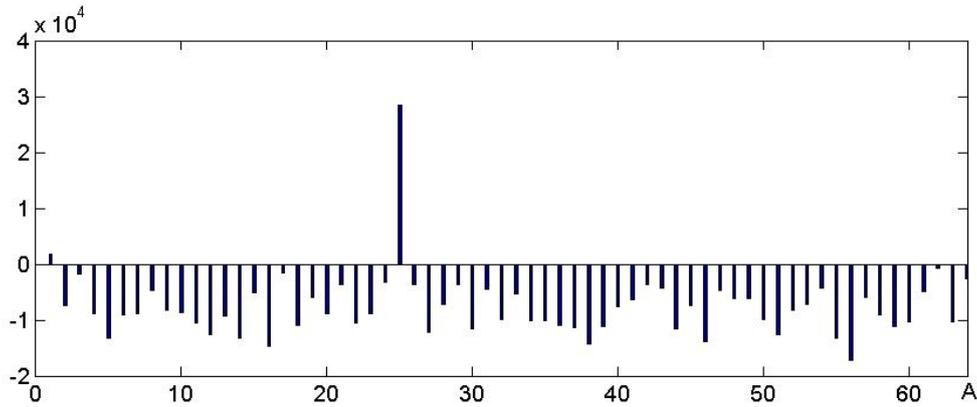


Рис. 5. Восстановленный сигнал при  $S/N = 0$  дБ.

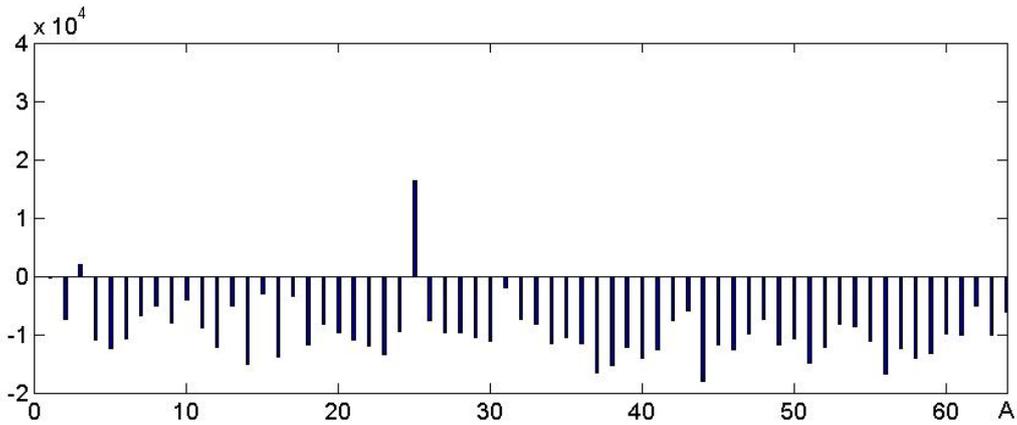


Рис. 6. Восстановленный сигнал при  $S/N = -10$  дБ.

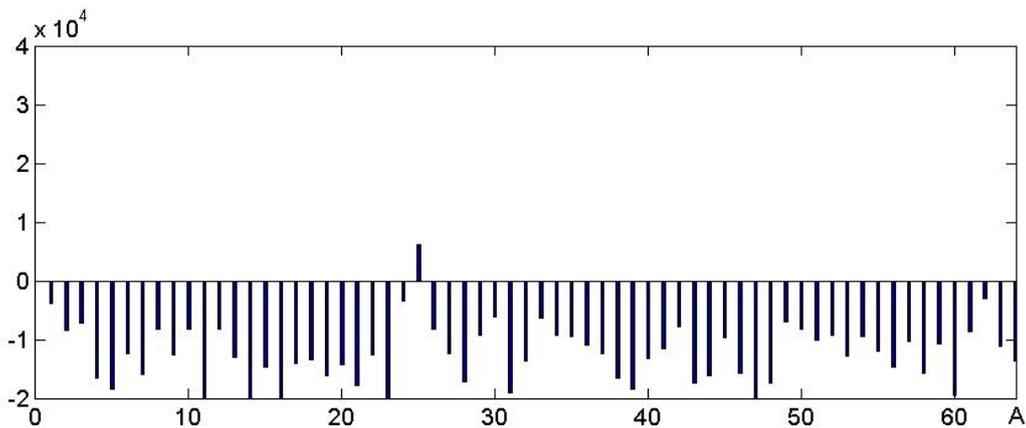


Рис. 7. Восстановленный сигнал при  $S/N = -15$  дБ.

Из рисунков видно, что при уменьшении отношения сигнал/шум на входе приемника уменьшается амплитуда восстановленного сигнала, но номер его позиции  $A = 25$  определяется безошибочно. Собранная статистика

показывает, что при отношении сигнал/шум в канале  $-12$  дБ вероятность безошибочного приема переданного символа составляет  $P = 0,9999$ .

Во всех системах OFDM стоит задача борьбы с межсимвольной интерференцией (МСИ), возникающей при многолучевом распространении сигнала, для решения которой обычно используются защитные интервалы между символами. Спектральное голографическое кодирование позволяет решить эту задачу без использования защитных интервалов. Проведено моделирование МСИ, искажающей 20% длины передаваемого символа, при отсутствии защитных интервалов. На рисунке 8 показан результат восстановления сигнала при 20% МСИ при отсутствии шума, на рисунке 9 – при 20% МСИ и отношении сигнал/шум  $S/N = -10$  дБ.

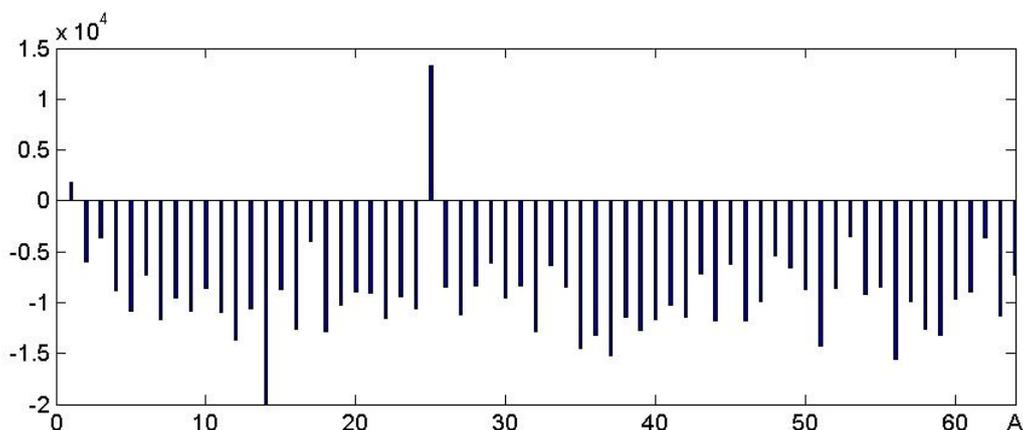


Рис. 8. Восстановленный сигнал при МСИ 20%.

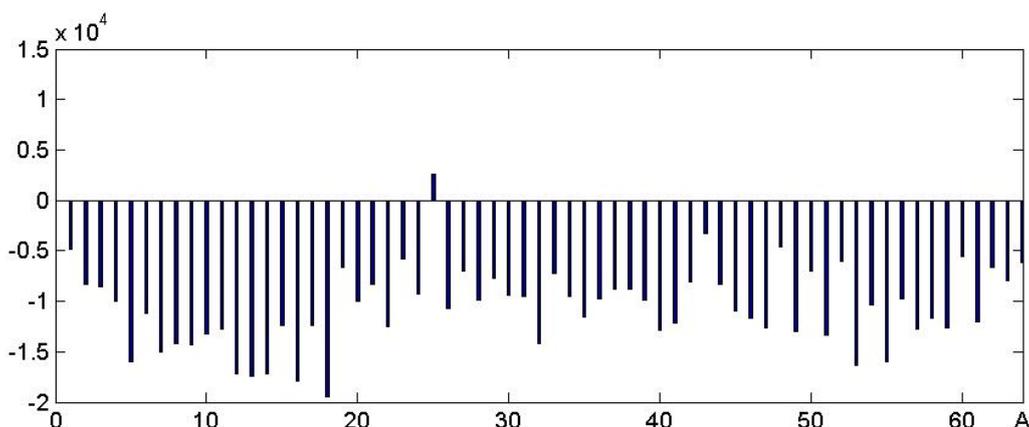


Рис. 9. Восстановленный сигнал при МСИ 20% и  $S/N = -10$  дБ.

Как видно из рисунков, запас помехоустойчивости, создаваемый голографическим кодированием, позволяет исключить защитные интервалы

и восстанавливать сигнал при наличии МСИ и тем самым повысить спектральную эффективность системы связи.

Использование в системах связи OFDM-модуляции требует обеспечения стабильности частоты дискретизации принятого сигнала в демодуляторе приемника при выполнении быстрого преобразования Фурье [13]. Однако степень помехоустойчивости спектрального голографического кодирования и в этом случае позволяет снизить требования к синхронизации частот приемника и передатчика. Для оценки этой возможности длительность сигнала, поступающего в приемник, была уменьшена на 25%, что эквивалентно снижению частоты дискретизации в демодуляторе на 25% (в приемнике зафиксировано на 25% меньше отсчетов сигнала). Сигнал при этом перестает быть ортогональным, а его спектр – линейчатый. На рисунке 10 приведены результаты вычисления спектра в демодуляторе приемника при штатной частоте дискретизации (Рис. 10а) и при частоте дискретизации, меньшей на 25% (Рис. 10б).

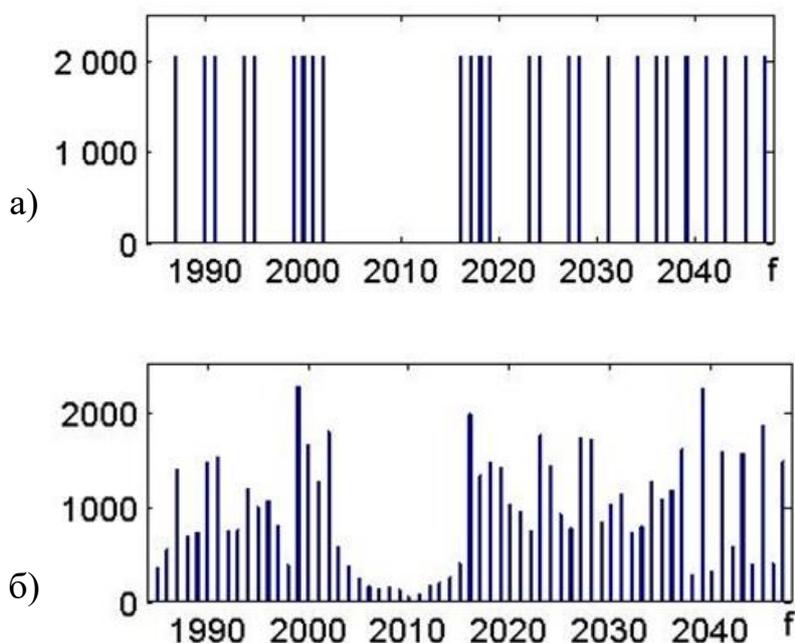


Рис. 10. Результат вычисления БПФ в демодуляторе:  
а) при заданной частоте дискретизации,  
б) при частоте дискретизации, меньшей на 25%.

Даже при наличии такой рассинхронизации корректирующие способности кода сохраняются, и восстановление сигнала происходит при отношении сигнал/шум  $S/N = -10$  дБ (Рис. 11).

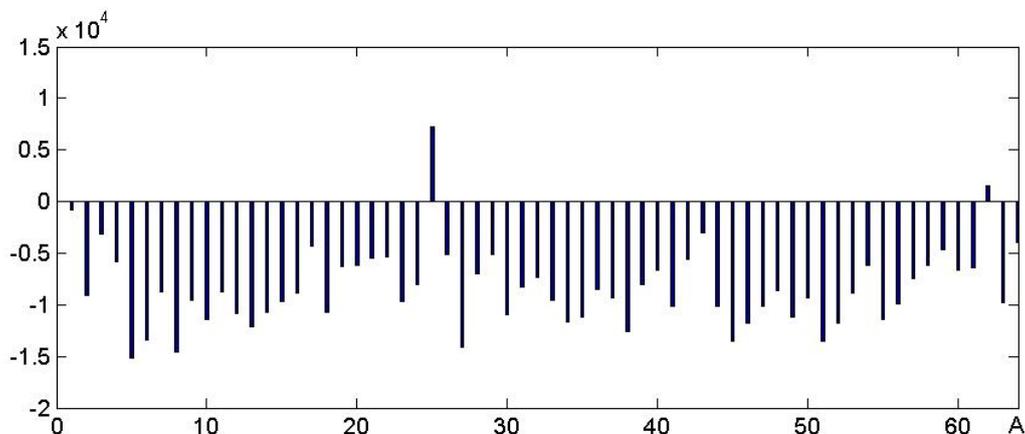


Рис. 11. Восстановленный сигнал при рассинхронизации и  $S/N = -10$  дБ.

Таким образом, оба рассмотренных способа использования голографического кодирования (помехоустойчивое кодирование в цифровом канале и спектральное кодирование в аналоговом канале) позволяют существенно повысить помехоустойчивость канала связи и обеспечить надежную передачу информации в условиях наличия шума и преднамеренных помех, мощность которых на 10 дБ превышает мощность сигнала. Как и любой помехоустойчивый код, голографический код использует избыточность для коррекции ошибок. В цифровом варианте кодирования скорость кода определяется параметром  $R = k/n$ , при спектральном кодировании избыточность закладывается путем расширения спектра. В реализации, для которой проводилось моделирование, использован частотный диапазон 936-1000 МГц, ширина спектра 64 МГц, длительность символа 1 мкс. Плотность скорости передачи составляет 0,1 бит/Гц.

## Заключение

Использование голографического кодирования в канале связи позволит решить несколько задач:

- организация надежного канала связи при наличии шумов и помех, на порядок превышающих уровень мощности сигнала,
- обеспечение скрытности канала связи – при уровне сигнала на 10 дБ ниже уровня шума обнаружить сигнал практически невозможно,
- повышение устойчивости к межсимвольной интерференции, что дает возможность отказаться от введения защитных интервалов и повысить спектральную эффективность,
- снижение требований к стабильности частоты дискретизации при проведении БПФ в демодуляторе приемника.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

## Литература

1. Филиппов А.А., Бажин Д.А., Хлобыстов А.Н. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №. 6 (73). – С. 45-50.
2. Парамонов А.А., Хоанг В.З. Способ повышения помехоустойчивости радиолинии связи в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.11>.
3. Парамонов А.А., Хоанг В.З. Прием сигналов относительной фазовой телеграфии с весовой обработкой субсимволов в системах передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.2>.

4. Пантенков Д.Г. и др. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – №. 5. – С. 52-71.
5. Верба В.С., Татарский Б.Г., Ясенцев Д.А. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х книгах. М // Радиотехника. – 2016. 1352 с.
6. Даровских С.Н., Головенко А.О., Никитин Н.С. Обработка дискретных составных частотно-модулированных сигналов посредством нейросетевого анализа // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 163-168. <https://doi.org/10.14529/ctcr150321>.
7. Евстратько В.В., Коноваленко А.И., Мишуров А.В., Юхманов А.Д. Цифровой радиоприемник на основе нейронной сети. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.5>.
8. 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. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>.
9. Timofeev A.L., Sultanov A.K. Holographic method of error-correcting coding // Optical Technologies for Telecommunications 2018. – SPIE, 2019. – Т. 11146. – С. 365-370. <https://doi.org/10.1117/12.2526922>.
10. 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 (119). – С. 2-11. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-4-2-11>.
11. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. Spectral holographic coding // Optical Technologies for Telecommunications 2021. – SPIE, 2022. – Т. 12295. – С. 233-238. <https://doi.org/10.1117/12.2632147>.

12. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Радиолокация с голографическим кодированием зондирующего сигнала // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.11>.
13. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) // М.: Издательство Техносфера. – 2012.

**Для цитирования:**

Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Применение голографического кодирования для повышения надежности передачи информации в зашумленных каналах связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.8>