

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.4>

УДК: 621.391

РЕАЛИЗАЦИЯ УСТОЙЧИВОЙ АБСОЛЮТНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

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 22 апреля 2024 г.

Аннотация. Широко распространенный метод относительной фазовой модуляции имеет недостатки по сравнению с абсолютной фазовой модуляцией: необходимость передачи пилот-сигнала в начале сеанса связи, меньшая помехоустойчивость, более сложная аппаратная реализация. Кроме того, при случайном скачке фазы искажается не только текущий символ, но и следующий за ним, а исправление двукратной ошибки требует применения корректирующего кода с большей исправляющей способностью. Однако абсолютная фазовая модуляция, несмотря на ее преимущества, почти не используется из-за переключения в режим «обратной работы» при перескоке фазы опорного сигнала. Решение проблемы применения абсолютной модуляции дает рассмотрение явления «обратной работы» в терминах помехоустойчивого кодирования, с точки зрения которого «обратная работа» – это совокупность пакетных ошибок, количество которых может достигать 100% длины передаваемого кодового слова. Для большинства помехоустойчивых кодов исправление более 50% пакетных ошибок является нерешаемой задачей, но голографический позиционный код дает совпадающий

результат декодирования, как для прямого, так и для инвертированного блока данных. Описан мягкий декодер голографического кода, обеспечивающий безошибочное декодирование сигнала с абсолютной фазовой модуляцией без использования опорного сигнала при скачках фазы до двух раз за время приема одного блока данных.

Ключевые слова: абсолютная фазовая модуляция, обратная работа, голографическое кодирование.

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

Введение

Из теории связи известно, что фазовая манипуляция (ФМн) характеризуется высокой помехоустойчивостью. В 1946 г. В. А. Котельников в своей докторской диссертации "Теория потенциальной помехоустойчивости" доказал, что сигнал ФМн с манипуляцией на 180° является наилучшим способом передачи двоичных сигналов и достигает потенциальной помехоустойчивости [1]. Однако реализация демодулятора для когерентного приема такого сигнала затруднена необходимостью поддержания равенства фаз опорного генератора и приходящего сигнала. В практических схемах опорный сигнал формируется из принимаемого колебания. При этом все схемы формирования опорного сигнала таковы, что вследствие различных неконтролируемых факторов возможны случайные изменения знака опорного сигнала. Это означает, что символы, регистрируемые на выходе приемника, даже при отсутствии аддитивной помехи в канале после случайного перескока фазы опорного сигнала инвертируются. Это будет продолжаться до следующего перескока фазы опорного сигнала. Возникает так называемое явление «обратной работы», которое сильно ограничивает применение в системах связи абсолютной ФМн (АФМн). Поэтому АФМн на 180° , хотя и обеспечивает максимально

возможную помехоустойчивость радиосвязи, на практике не используется из-за «обратной работы» когерентного детектора [2].

В 1954 г. Н.Т. Петрович предложил метод относительной фазовой манипуляции (ОФМн), устраняющий явление «обратной работы» [3]. Этот метод получил широкое распространение в современных цифровых навигационных, связных и телевизионных системах. Использование сигналов ОФМн заложено в коммуникационных стандартах DVB-S, DVB-S2/S2X, ГЛОНАСС, CDMA, Wi-Fi IEEE 802.11 и др. [4]. Во всех этих случаях задача передачи сообщений осложняется тем, что сообщения необходимо извлекать из модулированных сигналов, которые в радиоканале подвергаются воздействиям различных искажающих факторов и помех. Для решения этой задачи разработано большое число методов и в их числе начинают развиваться методы цифрового приема сигналов на основе нейронной сети [5].

Однако системы с ОФМн имеют недостатки по сравнению с АФМн: необходимость передачи пилот-сигнала в начале сеанса связи, меньшая помехоустойчивость, более сложная аппаратная реализация. Кроме того, при случайном скачке искажается не только текущий символ, но и следующий за ним, а исправление двукратной ошибки требует применения корректирующего кода с большей исправляющей способностью. Частично решает проблемы ОФМн предложенный в [6] метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования, который обладает меньшей вычислительной сложностью и позволяет отказаться от пилот-сигналов, что повышает эффективность использования радиочастотного спектра. Однако этот метод может применяться только в каналах с относительно редкими скачками фазы, в которых время когерентности больше длительности двух кодовых блоков.

Решение проблемы применения АФМн может дать рассмотрение явления «обратной работы» в терминах помехоустойчивого кодирования. С этой точки зрения «обратная работа» – это совокупность пакетных ошибок, количество которых может достигать 100% длины передаваемого кодового

слова. Одним из самых эффективных из известных кодов для исправления пакетных ошибок является код Рида-Соломона (РС-код), широко применяемый в помехоустойчивом кодировании. Предел корректирующей способности (n, k) РС-кода определен границей Синглтона, в соответствии с которой для исправления t ошибок код должен иметь не менее $n - k = 2t$ проверочных символов, т.е. два проверочных символа на одну ошибку. При большой степени избыточности ($n \gg k$) число исправляемых ошибок t приближается к 50% от длины кодового слова n . Однако существенно большей эффективностью обладают голографический код, описанный в [7, 8], относящийся к семейству позиционных делимых кодов [9-11]. Из теории электрической связи известна зависимость пропускной способности двоичного симметричного канала от вероятности ошибки в канале, в соответствии с которой пропускная способность максимальна при нулевой и единичной вероятности ошибки, а при вероятности ошибки, равной 0,5, опускается до нуля. Этот случай называют обрывом канала. Действительно, вероятность ошибки 0,5 можно получить и без передачи информации по каналу связи. А при вероятности ошибки, равной 1, пропускная способность такая же, как и при 0 (канал без помех). Это объясняется тем, что в двоичном канале для устранения ошибок во всех битах достаточно их инвертировать, чтобы абсолютно полностью восстановить переданный сигнал. Сама по себе задача исправления ошибок во всех разрядах двоичного кодового слова является тривиальной – для этого достаточно инвертировать каждый разряд. Проблемой в этом случае для известных кодов является выбор из двух равновероятных результатов декодирования – прямого и инверсного. Голографический позиционный код в отличие от других кодов дает совпадающий результат декодирования, как для прямого, так и для инвертированного блока данных.

1. Голографический код и пакетные ошибки в режиме «обратной работы»

Голографический метод кодирования основан на математическом моделировании одномерной голограммы, создаваемой в виртуальном

пространстве волной от объекта, полученного путем преобразования k -разрядного двоичного кода входного блока данных во вторичный блок – единичный позиционный код с числом разрядов $n = 2^k$. Этим преобразованием закладывается информационная избыточность с числом разрядов $r = n - k$. Вторичный блок (виртуальный оптический объект) имеет $(n - 1)$ нулей и одну единицу в позиции, заданной входным блоком. Таким образом, входной блок данных используется как адрес позиции единицы в последовательности нулей единичного позиционного кода вторичного блока. Процедура формирования передаваемой по каналу связи голограммы и восстановления в приемнике исходного объекта по голограмме описана в [7].

Устойчивость голографического кода к ошибкам объясняется свойством делимости голограммы, в соответствии с которым даже при потере или искажении большей части голограммы возможно восстановление полного изображения объекта. Исследование корректирующей способности голографического кода проведено путем моделирования в среде MATLAB процесса искажения голограммы H пакетными ошибками.

Для 5-разрядного ($k = 5$) входного блока данных A вторичный блок в единичном позиционном коде имеет $n = 32$ разряда. Для значения A , записанного в десятичном коде $A_{10} = 20$, запись в двоичном коде $A_2 = 10100$, в единичном позиционном коде:

$$A_1 = 00000000000100000000000000000000. \quad (1)$$

Цифровая одномерная голограмма H , полученная описанным в [7] способом, выглядит следующим образом:

$$H = 01001110000000001110010010110101.$$

Именно этот блок данных и передается по каналу связи. Результат восстановления объекта по принятой голограмме (массив Y) приведен на рисунке 1 (максимум находится на той же позиции, что и единица в позиционном коде (1) для A_1).

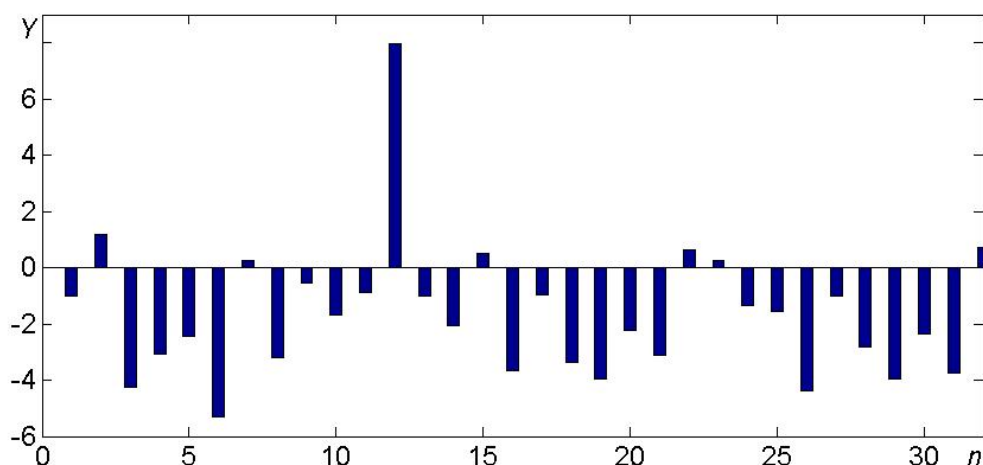


Рис. 1. Восстановленный по голограмме объект.

Номер позиции массива Y , в которой находится его пиковое значение, посчитанный как в нумерации разрядов в двоичном коде справа налево, соответствует передаваемому значению входного блока $A = 20$.

Режим «обратной работы» (появление пакетных ошибок) приводит к инверсии голограммы. На рисунке 2 приведен результат декодирования голограммы в режиме «обратной работы» с числом ошибок, равным 100%. Пиковое значение находится в той же позиции. Поэтому для восстановления значения переданного блока данных необходимо лишь определить позицию глобального экстремума независимо от его знака.

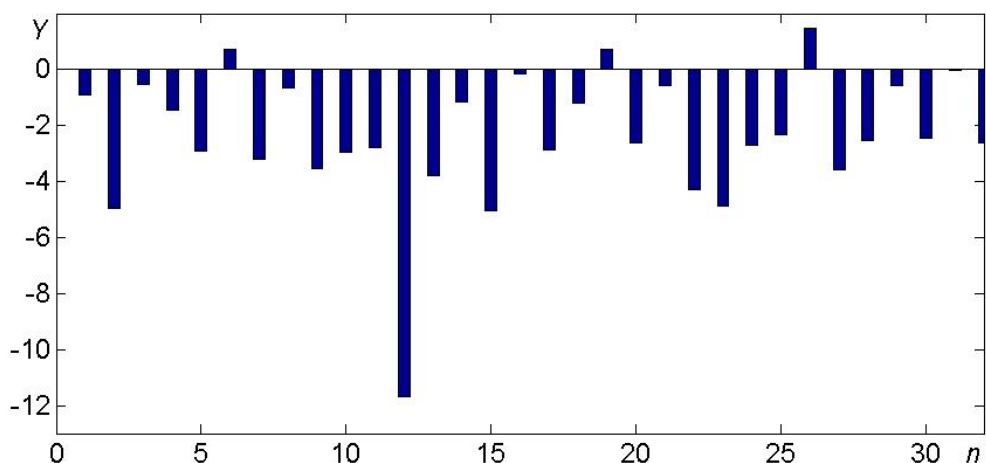


Рис. 2. Восстановленный массив при числе ошибок 32 (100%).

Приведенные примеры демонстрируют перспективы интеграция метода позиционного голографического помехоустойчивого кодирования,

обладающего возможностью устранять любое количество пакетных ошибок в режиме «обратной работы», с методом абсолютной фазовой манипуляции.

Большое значение имеет соотношение времени когерентности (длительность интервала между скачками фазы, переводящими демодулятор в режим «обратной работы» и обратно) с временем передачи одного блока данных. Если время когерентной работы больше времени передачи блока данных, то все блоки, полученные в течение стабильной фазы любого знака, безошибочно декодируются простым жестким декодером. Блок данных, во время приема которого произошел скачок фазы, требует более сложного, мягкого декодирования.

2. Разработка декодера и результаты моделирования

Таким образом, в режиме «обратной работы» голографический декодер обеспечивает надежную работу демодулятора. Более сложным случаем является момент смены режима работы – момент скачка фазы, когда даже относительная фазовая манипуляция дает два сбойных бита. Для решения этой проблемы необходимо принятый блок разделить на две части и каждую половину декодировать отдельно. Свойство делимости и обусловленный им запас помехоустойчивости голографического кода позволяет правильно декодировать блок данных не только по его половине, но и по любой четверти. Наиболее сложный для декодирования случай – когда скачок фазы происходит два раза в течение приема одного блока данных и длительность «обратной работы» составляет около половины длины блока, т.е. пакет ошибок равен половине блока и расположен с произвольным смещением в блоке. В таком канале ОФМн, например, образует 4 ошибки при демодуляции блока данных.

Для обеспечения безошибочного декодирования при любой длине пакета ошибок (от 0 до 100%), при любом его положении в принимаемом блоке разработан мягкий декодер, использующий более сложный алгоритм анализа формы восстановленного сигнала. Алгоритм содержит два набора операций – поиск особой точки (точки, в номере позиции которой

заложена передаваемая информация) по прямым признакам и поиск по косвенным признакам. Прямые признаки – это максимальные по модулю значения 10 декодируемых массивов (прямой и инверсной формы полного блока данных, прямые и инверсные формы четырех четвертей принятого блока данных). Косвенные признаки – характерное систематическое расположение максимумов вокруг особой точки, когда ее собственное значение минимально. При анализе получаемых массивов установлено, что переключение в режим «обратной работы» приводит к замене максимума в особой точке на группу двух, четырех или шести максимумов, расположенных симметрично вокруг особой точки. Эта задача подходит для нейронной сети, но она может быть решена и гораздо меньшими вычислительными ресурсами, в том числе устройствами жесткой логики. На рисунке 3 приведены примеры фрагментов массивов, содержащих особые точки.

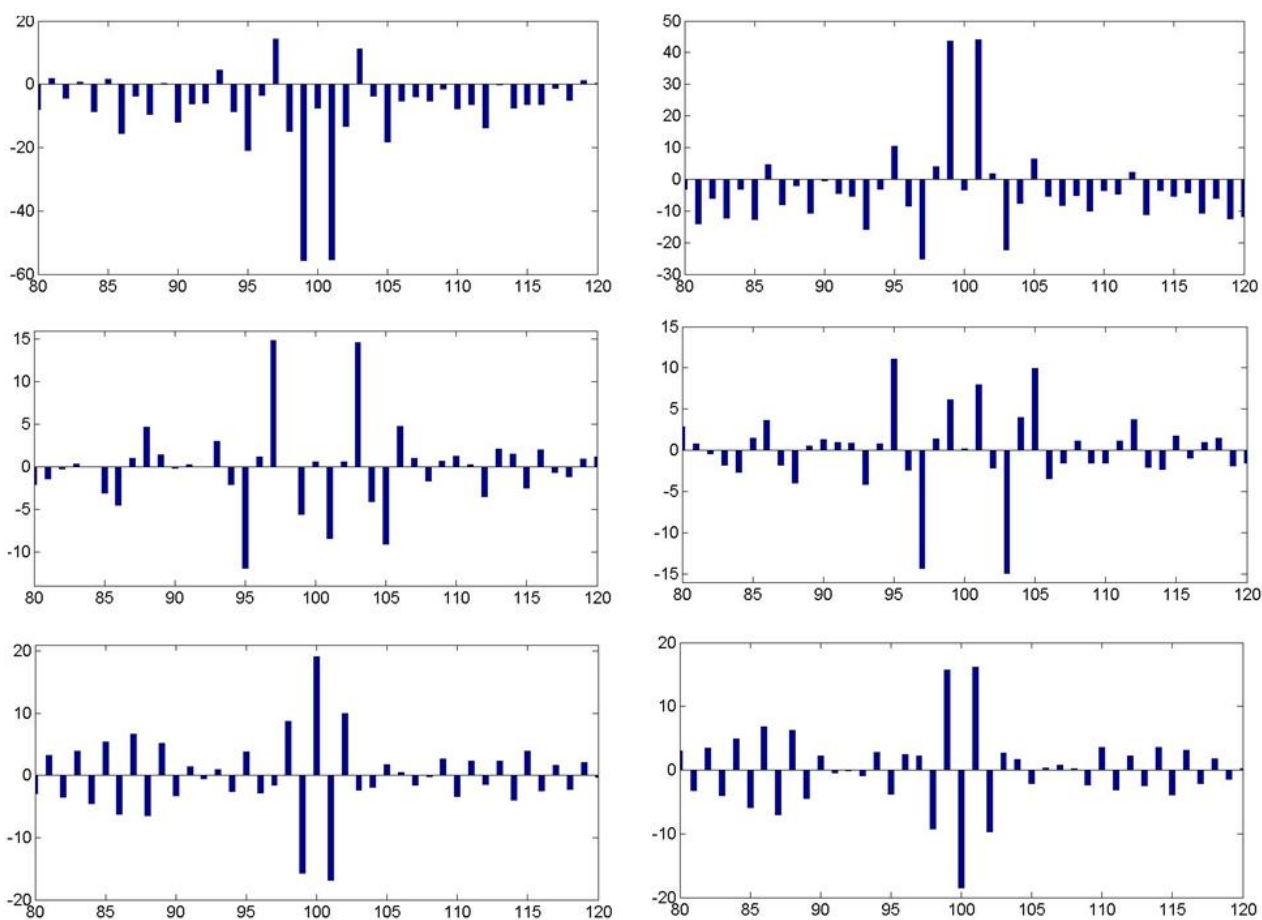


Рис. 3. Массивы, полученные декодированием трех частей принятого блока данных в прямом и инверсном коде. Координата особой точки $A = 100$.

Алгоритм мягкого голографического декодирования включает следующие операции:

- 1) Декодирование принятого массива в прямом коде.
- 2) Декодирование инвертированного массива.
- 3) Декодирование первой четверти прямого и инвертированного массивов.
- 4) Декодирование второй четверти прямого инвертированного массивов.
- 5) Декодирование третьей четверти прямого и инвертированного массивов.
- 6) Декодирование четвертой четверти прямого и инвертированного массивов.
- 7) Поиск положительных максимумов в каждом результате декодирования и определение их координат.
- 8) Поиск отрицательных максимумов в каждом результате и определение их координат.
- 9) Поиск вторых максимумов (положительных и отрицательных) и определение координат.
- 10) Поиск особых точек на основе выбора пар максимумов, расположенных симметрично на расстоянии 2, 4 и 6 точек. Кандидат на результат декодирования – в центре между ними.
- 11) В полученном массиве особых точек определение координаты точки, которая встречается чаще всего – это и есть результат декодирования.

Описанный алгоритм реализован в среде MATLAB и проведено исследование процесса декодирования АФМн сигнала длительностью $n = 32, 64, 128$ и 256 бит при всех возможных размерах пакетов ошибок и всех возможных положениях пакета в принятом сигнале. Для всех вариантов моделировалось два скачка фазы во время приема одного блока данных. Установлено, что предложенный мягкий декодер во всех этих случаях гарантирует безошибочное формирование выходного кода.

Минимальная длительность передаваемого блока данных при использовании АФМн с голографическим кодированием (АФМнГК) составляет 32 бита, этот блок декодируется в 5 информационных бит. При использовании ОФМн с такой же длиной блока (32 бита) при такой

же интенсивности фазовых сбоев (два скачка на блок) неправильно демоделируются 4 бита, т.е. возникает 12,5% ошибок. При использовании АФМнГК ошибки начинают появляться только при трех и более скачках фазы на блок данных.

Заключение

Предложенный способ интеграции абсолютной фазовой модуляции с голографическим кодированием позволяет использовать главное преимущество АФМн – более высокую помехоустойчивость, а также более простую реализацию модуляции/демодуляции. При этом отпадает необходимость в синхронизации и использовании пилот-сигналов. АФМнГК обеспечивает безошибочное декодирование сигналов, переносящих 5 информационных бит, и использующих для этого 32 периода несущей частоты (плотность скорости передачи данных 0,16 бит/Гц) в условиях времени когерентности, равного 16 периодам несущей.

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

Литература

1. Головин О. Относительная фазовая манипуляция – метод повышения надежности передачи информации. URL: <https://www.computer-museum.ru/connect/petrovic.htm> (дата обращения: 10.04.2024).
2. Волков А.А. Морозов М.С. Способ реализации абсолютной ФМн на 180°. // Электросвязь. – 2017. – № 2. С. 72-74.
3. Петрович Н.Т. Новые способы осуществления фазовой телеграфии. // Радиотехника. – 1957. – № 10.
4. Куликов Г.В., До Ч.Т. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>.

5. Евстратько В.В., Коноваленко А.И., Мишуров А.В., Юхманов А.Д. Цифровой радиоприёмник на основе нейронной сети. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.5>.
6. Токарь М.С., Рябов И.В. Метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования для применения в системах подвижной радиосвязи с использованием технологии ММО. // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.4>.
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. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>.
8. 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>.
9. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Увеличение дальности атмосферных оптических линий связи с помощью позиционного кодирования. // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – №. 9. – С. 75-85. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-75-85>.
10. Timofeev A.L., Sultanov A.K., Filatov P.E. Holographic method for storage of digital information. // Optical Technologies for Telecommunications 2019. – SPIE, 2020. – Т. 11516. – P. 14-20. <http://doi.org/10.1117/12.2566329>.
11. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Повышение срока активного использования бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов. // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Т. 25. – № 1. С. 33–42. <http://doi.org/10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42>.

Для цитирования:

Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Реализация устойчивой абсолютной фазовой модуляции с помощью голографического кодирования. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.4>