

Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации

А.Л. Тимофеев¹, А.Х. Султанов¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,
440008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

Аннотация

В статье рассматривается метод помехоустойчивого кодирования, основанный на голографическом представлении цифрового сигнала. Процесс кодирования сообщения представляет собой математическое моделирование голограммы, создаваемой в виртуальном пространстве волной от источника входного сигнала. Кодовое слово – это голограмма точки, она же одномерная зонная линейка, несущая информацию о входном блоке данных в виде n -разрядного кода координаты центра зон Френеля. Показано, что голографическое представление сигнала обладает существенно большей помехоустойчивостью и позволяет восстановить исходную цифровую комбинацию при потере большей части кодового сообщения и при искажении кодированного сигнала шумом, в несколько раз превосходящим уровень сигнала. Для оценки помехоустойчивости проведено сравнение надежности передачи информации по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании кода Рида–Соломона, кода Рида–Маллера, мажоритарного кода и голографического кода. Рассмотрена сравнительная эффективность кодов при наличии пакетных ошибок, вызванных эффектом замирания вследствие многолучевого распространения в радиоканалах. Показано, что голографическое кодирование обеспечивает исправление пакетных ошибок независимо от длины пакета и его позиции в кодовом слове. Высокая эффективность достигается также при поступлении на вход декодера смеси случайных и пакетных ошибок. Голографический код представляет интерес для передачи информации по каналам с низким отношением сигнал/шум (космическая связь и оптические системы связи, использующие свободное пространство в качестве канала передачи, наземная, в том числе мобильная радиосвязь), а также для хранения информации в системах, подверженных воздействию ионизирующего излучения.

Ключевые слова: цифровая голография, компьютерная голография, дифракционная оптика, помехоустойчивое кодирование.

Цитирование: Тимофеев, А.Л. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации / А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 978–984. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.

Citation: Timofeev AL, Sultanov AKh. Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information. Computer Optics 2020; 44(6): 978-984. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.

Введение

Голография как метод восстановления волнового фронта может быть использована не только для записи и восстановления трехмерных изображений объекта. Фундаментальное свойство голографии – делимость голограммы [1] (возможность восстановления полного изображения объекта по фрагменту голограммы) – представляет интерес для помехоустойчивого кодирования произвольных сообщений. Свойство делимости может эффективно использоваться при передаче информации по каналу связи с большим уровнем шума и/или при недостаточном уровне сигнала, когда могут быть искажены или утрачены большие фрагменты сообщения.

В этой связи интересен перенос принципов голографической обработки изображений на кодирование произвольных цифровых данных и разработка голо-

графических методов помехоустойчивого кодирования, позволяющих корректировать множественные ошибки.

Это актуально для систем Radio-over-fiber (RoF), использующих многопозиционные методы модуляции X-QAM в оптоволоконных каналах, к которым предъявляются высокие требования с точки зрения необходимого высокого отношения сигнал/шум, низкой дисперсии и других характеристик, которые могут привести к значительным искажениям сигнала и, как следствие, к искажению исходного констелляционного созвездия. Таким образом, вышеупомянутое свойство голографии позволит значительно повысить помехоустойчивость сигналов как в волоконных, так и в радиосегментах RoF-систем.

Высокая помехоустойчивость голографического способа обработки информации и способность обнаруживать сигнал, во много раз меньший уровня по-

мех, нашли применение в радиоголографии при построении радиолокационных систем [2, 3, 4]. Способы уменьшения загрузки радиоканала при передаче информации для последующего синтеза голограммы 3D-изображений без их недопустимых искажений рассмотрены в работе [5].

Использовать голографическое кодирование для исправления ошибок предложено в [6]. Принципиальным отличием этой задачи от задач обработки изображений, обладающих внутренней избыточностью и допускающих приемлемую потерю точности, является требование точного соответствия декодированного блока данных исходному. Рассмотренный метод основан на представлении исходного цифрового блока произвольных данных как изображения и расчете интерференционной картины волнового фронта, создаваемого этим изображением.

Кодирование информации (моделирование голограммы) и декодирование (восстановление цифрового массива) требует достаточно больших вычислительных ресурсов. Сложность вычислений можно значительно сократить, если использовать для представления исходного блока цифровой информации не двоичный, а единичный позиционный код. В этом случае оптическим объектом, для которого строится голограмма, является точечный источник на черном фоне, а информация закладывается в координаты точки на поле объекта. Результатом кодирования является простейшая голограмма – зонная пластинка Френеля, координаты центра которой несут кодируемую информацию.

В работе [7] доказана возможность использования одномерных радиоголограмм с целью снижения временных и материальных затрат при передаче по радиоканалу. Моделирование голографического кодирования с голограммами разной формы и размера показало, что эффективность кода, использующего матричную голограмму (m, m) , соответствует эффективности кода с линейной одномерной голограммой с количеством точек m^2 . Поэтому для снижения вычислительной сложности рационально использовать представление входных данных в виде одномерного массива и формировать линейную одномерную голограмму.

1. Голографическое кодирование

1.1. Алгоритм кодирования

Голографический метод кодирования основан на математическом моделировании одномерной голограммы, создаваемой в виртуальном пространстве волной от объекта, представляющего собой входной блок данных [8].

Линейное одномерное голографическое кодирование произвольной цифровой информации отличается от оптической голографии следующими факторами:

- объект является одномерным,

- объект не привязан к пространственным измерениям, единица измерения размера объекта и голограммы – длина волны излучения,
- волна распространяется без затухания и когерентна на любом расстоянии.

Предварительно входной блок цифровых данных X , представляющий собой k -разрядный двоичный код, преобразуется во вторичный блок A – пространственный одномерный объект, 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 $i \neq X$. Этим преобразованием закладывается информационная избыточность с числом разрядов $r = n - k$ и задается скорость кода $R = k/n$. Вторичный блок имеет $(n - 1)$ нулей и одну единицу в позиции, заданной первичным блоком. Таким образом, входной блок данных используется как адрес позиции единицы в последовательности нулей единичного позиционного кода вторичного блока. В оптической интерпретации объект (вторичный блок) представляет черную линию с одной светящейся точкой, позиция которой определяется кодируемым первичным блоком.

Формирование голограммы производится путем построения зонной линейки Френеля.

Расстояние между точками $A(i)$ равно d . Ячейка $A(i) = 1$ является источником сферической волны, распространяющейся в плоскости анализа и характеризуемой длиной волны $\lambda = d$.

Рассмотрим значения сферического волнового фронта в плоскости нахождения объекта на линии, расположенной параллельно объекту на расстоянии L , в n точках с шагом d . Волна от источника распространяется без затухания и попадает на все элементы одномерного массива $H(j)$, $j = 1, \dots, n$. Значения волнового фронта в рассматриваемых точках $H(j)$ определяются фазой приходящей волны ϕ . Значение волны от элемента $A(i)$ в точке нахождения элемента голограммы $H(j)$ равно

$$H(i) = A(i) \sin \phi(i, j),$$

где $\phi(i, j)$ – фаза волны элемента $A(i)$ в точке $H(j)$.

Расстояние $l(i, j)$ между точками $A(i)$ и $H(j)$ равно

$$l(i, j) = \sqrt{L^2 + d^2(i - j)^2},$$

тогда $\phi(i, j)$ – это дробная часть отношения $l(i, j)$ к длине волны:

$$\phi(i, j) = \{l(i, j) / \lambda\}.$$

Совокупность n точек $H(j)$ образует простейшую линейную голограмму – голограмму точки. Таким образом, одномерному объекту $A(i)$ ставится в соответствие одномерная голограмма $H(j)$. Значения полученной голограммы округляются до одного бита – положительные принимаются за 1, отрицательные – за 0, в результате чего формируется n -битный одно-

мерный 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 положении (номере позиции $i=X$) центра зон Френеля.

Таким образом, массив $H_O(j)$ – это голограмма точки, она же одномерная зонная линейка, несущая информацию о входном блоке данных в виде n -разрядного кода координаты центра зон Френеля.

Кодовая комбинация (словое слово) $H_O(j)$ передается по каналу связи с помехами и на приемной стороне производится декодирование – нахождение центра зон Френеля, определение его адреса и формирование k -разрядного выходного блока данных.

1.2. Алгоритм декодирования

Принятая по каналу связи искаженная кодовая комбинация $H_R(j)$ рассматривается как одномерный массив точек, число которых может быть меньше n вследствие потери части информации, а значения принятых элементов искажены шумом. Каждая из n точек кодовой комбинации $H_R(j)$ является источником сферической волны с той же длиной волны λ , как и при кодировании. Восстанавливаемый объект $A_R(i)$ представляет собой одномерный массив точек, расположенных с шагом d на прямой, параллельной массиву $H_R(j)$, и находящейся на расстоянии L от него. Если каждая из n точек массива $H_R(j)$ представлена одним битом, то объект $A_R(i)$ содержит n многоразрядных элементов, число бит в которых зависит от длины кодовой комбинации и введенной избыточности $r=n-k$.

Интенсивность волны от точки массива $H_R(j)$ в точке восстанавливаемого объекта $A_R(i)$ вычисляется так же, как и при кодировании (1). В каждую точку объекта $A_R(i)$ приходят волны от каждой точки $H_R(j)$ со своим значением фазы, и в результате интерференции этих волн формируются значения восстановленного объекта $A_R(i)$:

$$A_R(i) = \sum_{j=1}^n H_R(j) \sin \phi(i, j), i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Таким образом, восстановленный объект $A_R(i)$ является голограммой второго порядка (голограммой голограммы) исходного объекта. С оптической точки зрения восстановленный объект представляет собой темную линию с одной яркой точкой и небольшой фоновой засветкой в остальных точках.

Для получения выходного блока данных в форме k -разрядного кода необходимо определить адрес яркой точки – номер позиции Y , в которой находится максимум массива $A_R(i)$. Этот номер и есть значение выходного блока данных X_R . При искажении сигнала в процессе передачи (шумы, помехи, потеря части сигнала) отношение амплитуды пика к уровню шума в восстановленном сигнале снижается, и результат

декодирования принимает вероятностный характер. При этом наличие любой ошибки в декодированном сигнале делает результат восстановления неприемлемым, поэтому основной характеристикой кода является вероятность получения безошибочного результата.

2. Апробация голографического кодирования на имитационной модели

Оценка эффективности голографического кодирования в сравнении с существующими помехоустойчивыми кодами проведена путем моделирования в среде MATLAB процесса искажения и восстановления кодовой комбинации $H_O(j)$ при наличии случайных и пакетных ошибок.

Алгоритм моделирования:

1. Кодирование:

- задается размер кодируемого блока k ,
- задается кодируемое значение X в диапазоне $1, \dots, n$, где $n = 2^k$,
- формируется вторичный блок $A(i)$, $i = 1, \dots, n$, содержащий одну единицу в позиции $i=X$, остальные – нули,
- вычисляется голограмма $H(j)$ по формуле (1) и округляется до одного бита, в результате формируется однобитная последовательность $H_O(j)$, являющаяся кодовым словом для исходного значения X .

2. Моделирование передачи по зашумленному каналу: с помощью встроенной в MATLAB функции `awgn` на сигнал $H_O(j)$ накладывается белый шум с заданным отношением сигнал/шум (S/N).

3. Декодирование:

- вычисляется восстановленный объект $A_R(i)$ по формуле (2),
- находится максимум $A_R(i)$, его координата $i=Y$ является выходным значением.

На рис. 1 показан результат кодирования (одномерная голограмма) 8-разрядного входного блока данных со значением $X=100$, длина кодовой комбинации – 256 бит.

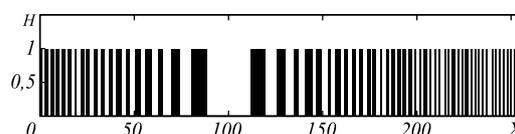


Рис. 1. Одномерная голограмма (последовательность нулей и единиц) в кодовом слове длиной $n = 256$

На рис. 2 приведен результат декодирования (восстановленное изображение объекта) $A_R(i)$ с ярко выраженным максимумом в позиции $Y=100$. Декодирование производилось при наличии шума в канале, отношение сигнал/шум $S/N=0$ дБ. Шум в канале увеличивает паразитную засветку восстановленного объекта, при этом исправление ошибок происходит до тех пор, пока не появится шумовой выброс, превосходящий по величине информационный пик, и, соответственно, изменится координата максимума Y .

Исследование зависимости корректирующей способности голографического кода от расстояния между объектом и голограммой L , шага голограммы d и длины волны λ показало, что наилучшие результаты достигаются при значениях $L = nd$ и $\lambda = d$.

Рассмотрим возможности кода по исправлению ошибок.

Корректирующие способности помехоустойчивого кода, имеющего $n = 2^k$ символов в кодовой комбинации, из которых k символов информационные, оцениваются максимальным количеством ошибок t , которые он может исправить при заданной степени избыточности. Например, для кода Рида-Маллера (РМ-код) $t = 2^{k-2} - 1$ [9], что соответствует исправлению ошибок любого вида, составляющих до 25% длины кодового слова.

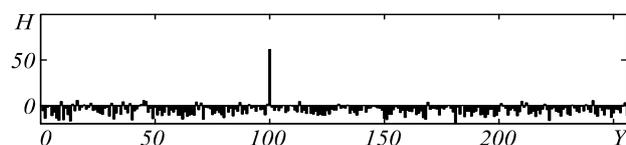


Рис. 2. Результат декодирования при $n = 256$, уровень шума $S/N = 0$ дБ, декодированное значение $Y = 100$

Одним из самых эффективных из известных кодов для исправления ошибок является код Рида-Соломона (РС-код), широко применяемый в помехоустойчивом кодировании, в системах восстановления данных с компакт-дисков, при создании архивов с возможностью восстановления информации в случае повреждений [10]. Предел корректирующей способности (n, k) РС-кода определен границей Синглтона [11], 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 . Например, РС-код (255,8) с коэффициентом избыточности 32 устраняет 123 ошибки, при этом в кодовом слове содержится 132 верных символа – ошибки занимают 48% кодового слова. Особенностью РС-кода является то, что столь высокую исправляющую способность он демонстрирует только для пакетных ошибок [10]. В то же время для большинства цифровых каналов, описываемых моделью двоичного симметричного канала без памяти, характерны случайные ошибки [10]. Если перейти от пакетных ошибок к равномерно распределенным по кодовому слову случайным ошибкам, максимальное число исправляемых РС-кодом ошибок составит $t = n/2k - 1$. Отсюда следует, что тот же вариант (n, k) РС-кода при $n = 256$, $k = 8$ исправляет 15 случайных ошибок, что составляет 6% длины кодового слова.

Голографический код обеспечивает высокую устойчивость как к случайным, так и к пакетным ошибкам. Для введения в кодовую комбинацию заданного числа случайных ошибок использовалась

функция $\text{randperm}(m, m)$, генерирующая m уникальных чисел в диапазоне от 1 до m . Эти числа использовались как адреса битов, в которые вносится ошибка. Результат восстановления искаженной кодовой комбинации длиной $n = 256$, содержащей 80 случайных ошибок (искажен 31% длины кодового слова), приведен на рис. 3. В результате проведения 100 000 испытаний установлено, что вероятность ошибки декодирования, т.е. вероятность неправильного определения положения информационного максимума при 80 ошибках составляет 0,00005.

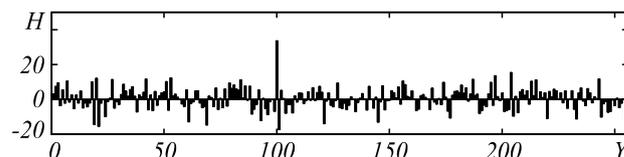


Рис. 3. Результат декодирования кодового слова, в котором 31% случайных ошибок

Для оценки помехоустойчивости голографического кода проведено сравнение надежности передачи информации по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании нескольких кодов. Рассмотрена зависимость вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум в канале для РС-кода, РМ-кода, мажоритарного кода и голографического кода. Для этого взяты рассмотренные выше предельные количества исправляемых ошибок для каждого кода и построена зависимость вероятности появления числа ошибок не больше предельного от отношения сигнал/шум. Во всех случаях число разрядов исходного слова – 8, длина кодового слова – 256 бит (скорость кодов $R = 1/32$). Результаты приведены на рис. 4.

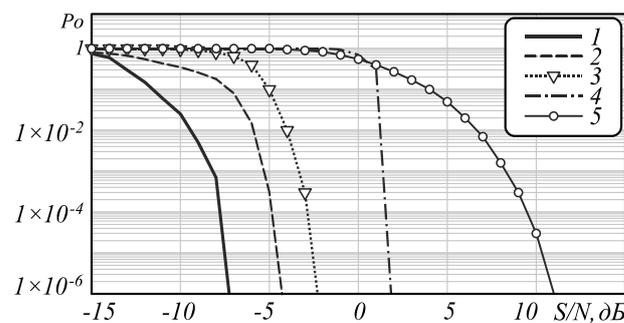


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки декодирования P_o от отношения сигнал/шум при скорости кода $R = 1/32$: 1 – голографический код, 2 – мажоритарный код, 3 – РМ-код, 4 – РС-код, 5 – без кодирования

Одним из наиболее надежных способов передачи информации в сильно зашумленных каналах является усреднение в пределах введенной избыточности с мажоритарным способом выбора решения. Однако оказалось, что голографический код является более помехоустойчивым и обеспечивает выигрыш на 2 дБ по сравнению с мажоритарным кодом, что позволяет получить вероятность ошибки декодирования 10^{-6} при отношении сигнал/шум $S/N = -7$ дБ.

Аддитивный шум существует в аналоговых каналах связи, а помехоустойчивое кодирование применяется для цифровых сигналов, в которых основной характеристикой качества канала является вероятность ошибки на бит (BER).

На рис. 5 показаны зависимости вероятности ошибки декодирования P_0 от вероятности ошибки в канале BER для тех же кодов, полученные расчетным путем для РС- и РМ-кодов, исходя из предельного количества исправляемых ошибок для каждого кода, и путем моделирования для мажоритарного и голографического кодов. При той же скорости кода $R=1/32$ голографический код обеспечивает вероятность ошибки декодирования менее 10^{-4} при вероятности ошибки в канале до уровня $BER=0,34$.

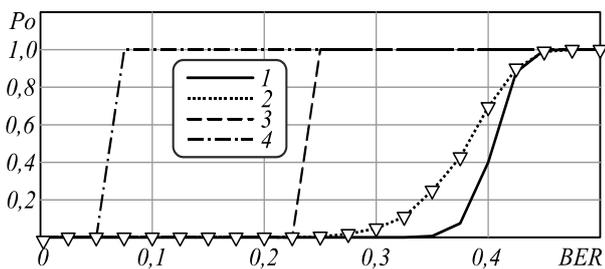


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки декодирования P_0 от вероятности ошибки на бит BER: 1 – голографический код, 2 – мажоритарный код, 3 – РМ-код, 4 – РС-код

Рассмотренные примеры искажения передаваемого сообщения характерны для двоичного симметричного канала без памяти – ошибки в нем являются независимыми. В то же время для большинства каналов радиосвязи (кроме космических каналов) характерно наличие эффекта замирания вследствие многолучевого распространения. К ним относятся каналы мобильной беспроводной связи, ионосферные и тропосферные каналы. В них искажения вызывают ошибки, имеющие вид пакетов, а не отдельных изолированных ошибок [10].

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 инвертированного. Голографический код в отличие от других кодов дает совпадающий результат декодирования как для прямого, так и для инвертированного блока данных. На рис. 6 приведен результат декодирования блока с числом ошибок, равным 100%. Как видно из сравнения с результатом декодирования неискаженного блока (рис. 2), пакетные ошибки приводят к инверсии вторичной голограммы и для восстановления значения входного блока данных необходимо лишь определить точку глобального экстремума независимо от его знака. Этот эффект можно объяснить также тем, что координаты центра зон Френеля вычисляются с

одинаковым успехом для позитивного и негативного (100% ошибок) изображения пластинки Френеля.

Более сложной задачей является восстановление блока данных, когда в кодовом слове содержится около 50% группирующихся в пакет ошибок.

Решается эта задача следующим образом. Декодируемая кодовая комбинация разбивается на четыре равные части, и каждая часть обрабатывается в прямом и инвертированном виде. В оптической интерпретации – каждая четверть голограммы рассматривается как позитивное и негативное изображение, по каждому из которых происходит определение центра зон Френеля – восстановление исходного объекта (значения декодируемого блока данных). Это позволяет исправить все пакетные ошибки с размером пакета от 0 до 100% длины кодовой комбинации при любом расположении пакета в кодовом слове. Таким образом, предельные возможности РС-кода – исправление 50% пакетных ошибок, голографического кода – 100% ошибок.

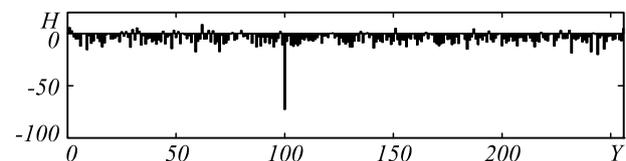


Рис. 6. Результат декодирования при 100% пакетных ошибках

Голографический код эффективен и при декодировании сигналов, содержащих смесь случайных и зависимых ошибок. При исследовании работы декодера в этом режиме ошибки в кодовую комбинацию вносились с помощью генератора случайных чисел. При числе ошибок менее 50% они являются случайными и при длине кодового слова $n=1024$ вероятность ошибки декодирования $P_0=0,001$ при $t=41\%$ ошибок (рис. 7).

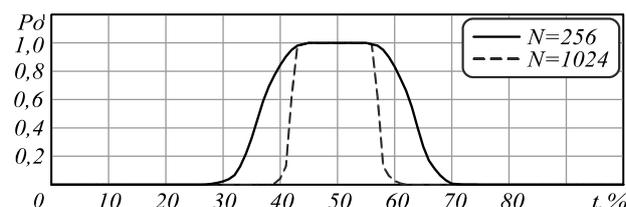


Рис. 7. Зависимость вероятности ошибки декодирования P_0 от числа ошибок t при длинах кода $n=256$ и $n=1024$

Максимальное возможное число независимых случайных ошибок в достаточно длинной кодовой комбинации составляет 50% от количества бит в кодовом слове. При дальнейшем воздействии источника случайных ошибок происходит наложение ошибок и в итоге формируется случайное кодовое слово, половина бит которого совпадает с битами любого другого кодового слова. Для введения более 50% ошибок биты для искажения выбираются с учетом уже имеющихся ошибок, поэтому ошибки становятся зависимыми. При числе ошибок более 50% результаты де-

кодирования формируют правую часть графика зависимости вероятности ошибки декодирования P_0 от числа ошибок t (рис. 7). При общем числе ошибок более 60% добавляющиеся ошибки заполняют промежутки между случайными ошибками, превращая их в пакетные, что дает возможность провести полное восстановление информации. Таким образом, голографический код позволяет исправить смесь случайных и зависимых ошибок, если их общее число превышает 60% длины кодового слова.

Заключение

Голографический метод помехоустойчивого кодирования обеспечивает полное восстановление данных, содержащих до 40% случайных независимых ошибок и до 100% зависимых пакетных ошибок.

Другим преимуществом голографического кода является меньшая сложность кодирования и декодирования при изменении избыточности в широких пределах. 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 [9].

Декодирование голографического кода состоит в n^2 -кратном вычислении $A_R(i)$ по формуле (4), что существенно проще алгоритмически и требует меньших вычислительных ресурсов.

Голографический код представляет интерес для передачи информации по каналам с низким отношением сигнал/шум (космическая связь или оптические системы связи, использующие свободное пространство в качестве канала передачи, наземная, в том числе мобильная радиосвязь, а также оптические системы связи на основе RoF технологии). Кроме того, он может повысить надежность хранения информации в системах, подверженных воздействию ионизирующего излучения (космическая техника) [12] и т.д.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00123) в частях «Алгоритм декодирования» и «Апробация голографического кодирования на имитационной модели», а также Министерства науки и высшего образо-

вания РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ # FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах» в части «Алгоритма кодирования».

Литература

1. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. – М.: Мир, 1973.
2. **Чапурский, В.В.** Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решёток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением / В.В. Чапурский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2011. – № 4(85). – С. 72-91.
3. **Семенчик, В.Г.** Радиоголографическая система формирования многочастотных изображений / В.Г. Семенчик, В.А. Пахомов // Электроника. – 2004. – № 1. – С. 50-51.
4. **Pahomov, V.** Reconstructing reflecting object images using born approximation / V. Pahomov, V. Semenichik, S. Kurilo // Proceedings of the 35th European Microwave Conference. – 2005. – P. 1375-1378.
5. **Шойдин, С.А.** Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования / С.А. Шойдин, // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 547-551. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-694.
6. **Тимофеев, А.Л.** Использование голографического кодирования для повышения помехоустойчивости каналов связи [Электронный ресурс] / А.Л. Тимофеев // ИТпортал. – 2018. – Т. 18, № 2. – URL: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi/> (дата обращения 28.09.2020).
7. **Голунов, В.А.** Обоснование возможности получения радиоизображений объектов методом одномерных голограмм / В.А. Голунов, В.А. Коротков, К.В. Коротков // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 38-43. – DOI: 10.1134/S0033849419010066.
8. **Timofeev, A.L.** Holographic method of error-correcting coding / A.L. Timofeev, A.Kh. Sultanov // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11146. – 111461A. – DOI: 10.1117/12.2526922.
9. Основы теории кодирования / Б.Д. Кудряшов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016.
10. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. / Б. Скляр. – М.: Вильямс, 2007.
11. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж.А. Слоэн. – М.: Связь, 1979.
12. **Timofeev, A.L.** Holographic method for storage of digital information / A.L. Timofeev, A.Kh. Sultanov, P.E. Filatov // Proceedings of SPIE. – 2020. – Vol. 11516. – 1151604. – DOI: 10.1117/12.2566329.

Сведения об авторах

Тимофеев Александр Леонидович, 1955 года рождения, в 1977 году окончил Уфимский авиационный институт (УАИ, ныне – Уфимский государственный авиационный технический университет – УГАТУ) по специальности «Информационно-измерительная техника», работает доцентом в УГАТУ. Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование, связь, обработка изображений. E-mail: a_l_t@inbox.ru.

Султанов Альберт Ханович, 1950 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1973 году окончил Новосибирский электротехнический институт связи (НЭИС, ныне – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики – СибГУТИ) по специальности «Многоканальная электросвязь», работает заведующим кафедрой телекоммуникационных систем в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ). Область научных интересов: полупроводниковая и антенная техника, оптика, связь, обработка изображений. E-mail: tko@ugatu.ac.ru.

ГРНТИ: 49.03.03

Поступила в редакцию 17 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 2 октября 2020 г.

Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information

A. L. Timofeev¹, A. Kh. Sultanov¹

¹Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, K. Marks Street, 12

Abstract

The article considers a method of error-correcting coding based on the holographic representation of a digital signal. The message encoding process is a mathematical simulation of a hologram created in virtual space by a wave from an input signal source. The code word is a hologram of a point, it is also a one-dimensional zone ruler that carries information about the input data block in the form of an n-bit code of the coordinate of the center of the Fresnel zones. It is shown that the holographic representation of the signal has significantly greater noise immunity and allows you to restore the original digital combination when most of the code message is lost and when the encoded signal is distorted by noise several times higher than the signal level. To assess the noise immunity, the reliability of information transmission over the channel with additive white Gaussian noise is compared using the Reed-Solomon code, the Reed-Muller code, the majority code, and the holographic code. The comparative efficiency of codes in the presence of packet errors caused by the effect of fading due to multipath propagation in radio channels is considered. It is shown that holographic coding provides the correction of packet errors regardless of the length of the packet and its location in the codeword. The holographic code is of interest for transmitting information over channels with a low signal-to-noise ratio (space communications and optical communication systems using free space as a transmission channel, terrestrial, including mobile radio communications), as well as for storing information in systems exposed to ionizing radiation.

Keywords: digital holography, computer holography, diffraction optics, noise-resistant coding.

Citation: Timofeev A L, Sultanov A Kh. Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information. *Computer Optics* 2020; 44(6): 978-984. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.

Acknowledgements: The study was partly funded by the Russian Science Foundation under project No. 18-19-00123 (Sections “Decoding Algorithm” and “Testing Holographic Coding on a Simulation Model”) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the government project of Ufa State Aviation Technical University on the development of “Theoretical foundations of modeling and semantic analysis of the processes of vortex electromagnetic fields conversion in infocommunication systems” (“Coding Algorithm”).

References

- [1] Collier RJ, Burckhardt CB, Lin LH. *Optical holography*. London, New York: Academic Press; 1971.
- [2] Chapursky VV. Receiving the radio-holographic images of objects on the basis of disperse MIMO-type antenna arrays with the single-frequency and multi-frequency radiations [In Russian]. *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Making* 2011; 4(85): 72-91.
- [3] Semenchik VG, Pahomov VA. Radio-holographic multi-frequency imaging system [In Russian]. *Electronics* 2004; 1: 50-51.
- [4] Pahomov V, Semenchik V. Reconstructing reflecting object images using born approximation”. *Proc 35th European Microwave Conference* 2005: 1375-1378.
- [5] Shoydin SA. Synthesis of holograms received by communication channel. *Computer Optics* 2020; 44(4): 547-551. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-694.
- [6] Timofeev AL. The use of holographic coding to increase noise immunity of communication channels [In Russian]. *ITportal* 2018; 18(2). Source: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi/>.
- [7] Golunov VA, Korotkov VA, Korotkov KV. Justification of the possibility of obtaining radio images of objects by the method of one-dimensional holograms [In Russian]. *J Commun Technol Electron* 2019; 64(1): 38-43. DOI: 10.1134/S0033849419010066.
- [8] Timofeev AL, Sultanov AKh. Holographic method of error-correcting coding. *Proc SPIE* 2018; 11146: 111461A. DOI: 10.1117/12.2526922.
- [9] Kudriashov BD. *Fundamentals of coding theory* [In Russian]. Saint-Petersburg: “BHV-Petersburg” Publisher; 2016.
- [10] Sklar B. *Digital communications: Fundamentals and applications*. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall; 2017.
- [11] Mac Williams FJ, Sloane NJA. *The theory of error-correction codes*. Murray Hill, NJ: Bell Laboratories; 1977.
- [12] Timofeev AL, Sultanov AKh, Filatov PE. Holographic method for storage of digital information. *Proc SPIE* 2020; 11516: 1151604. DOI: 10.1117/12.2566329.

Authors' information

Aleksandr Leonidovich Timofeev (b.1955) graduated from Ufa Aviation Institute in 1977, majoring in Information and Measuring Technology, works Associate Professor of the Ufa State Aviation Technical University. Research interests: noise-immune coding, communication, image processing. E-mail: a_l_t@inbox.ru.

Albert Khanovich Sultanov (b. 1950) graduated from the Novosibirsk Electrotechnical Institute of Communications in 1973, majoring in Multichannel Telecommunications, works Professor, the head of Telecommunication Systems department at the Ufa State Aviation Technical University. Research interests: semiconductor and antenna technology, optics, communications, image processing. E-mail: tk@ugatu.ac.ru.

Received April 17, 2020. The final version – October 2, 2020.
