

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

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

Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, г. Уфа, 3. Валиди, д. 32

Аннотация. В статье рассматриваются возможности организации каналов связи с параллельной передачей информации. При голографической обработке происходит преобразование сигнала, дающее возможность параллельной передачи – развертка информации во времени, используемая при последовательной передаче, заменяется разверткой в пространстве по площади голограммы, а во времени используются две локальные точки – момент формирования объекта и момент формирования голограммы. Одним из вариантов параллельной передачи информации является оптическая голография, в которой для увеличения дальности связи можно использовать в качестве элементов матрицы передатчика узконаправленные лазеры для повышения интенсивности интерференционной картины. Второй вариант – перенос голографии в радиодиапазон, третий – перевод информационного взаимодействия из области пространства-времени в область время-частота. Предложенные методы позволяют существенно повысить скорость передачи данных. Теоретическим пределом пропускной способности таких каналов связи является скорость передачи голограммы – объема информации, содержащейся в трехмерном изображении сложного объекта, в течение длительности одного периода волны электромагнитного излучения.

Ключевые слова: голографическая передача информации, параллельная передача, спектральная голография.

Введение

Общим способом передачи информации с помощью электромагнитного излучения и в оптическом, и в радиодиапазоне, по волноводам и в открытом пространстве является последовательная передача. Частотное разделение каналов в радиодиапазоне, как и технология WDM в оптическом диапазоне, не образует параллельную передачу в одном канале, а создает некоторое количество последовательных каналов.

Практически единственным способом параллельной передачи информации является передача двумерного изображения по волноводу, который может быть разного исполнения – от металлического, до волоконнооптического [1]. Оптические многомодовые волноводы обладают способностью воспроизводить изображение объекта, находящегося в его входном сечении ($z = 0$), в последовательности синфазных сечений, удаленных от входа на расстояния $z_s - sL$ (L – расстояние до первого синфазного сечения, зависящее от типа волновода и его параметров, s – порядковый номер синфазного сечения). В последние годы все больше появляется публикаций, в которых рассматривается возможность передачи изображений по многомодовому волокну [2-5]. Например, типичное волокно с диаметром сердцевины 100 мкм может нести до 10 000 мод и в принципе передавать изображение примерно с таким же количеством пикселей [5]. Однако в таком волокне каждая из индивидуальных мод распространяется с несколько иной скоростью, что приводит к амплитудным и фазовым искажениям изображения и образованию спекл-структуры. Полное априорное знание входного изображения и деталей волокна может позволить численно промоделировать оптическое распространение, реконструировать матрицу передачи, а затем расшифровать выходные данные, но на практике это не реализуемо из-за необходимости привлечения очень больших вычислительных ресурсов.

В то же время в оптике и других областях, использующих волновые процессы, существует и используется эффект, который можно рассматривать как параллельную передачу информации, – голография. Уникальность голографии состоит в том, что информация об исходном объекте передается в пространстве монохроматическим волновым фронтом (т.е. в одном частотном канале) и формирует подлежащую регистрации интерференционную картину большого объема за время, равное одному периоду опорной волны (в оптической голографии – за 0,002 пикосекунды).

Постановка задачи

Рассмотрим более общую, чем передача изображений, задачу – передачу произвольной цифровой информации. В существующих системах для передачи по каналам связи исходного цифрового информационного блока он представляется в виде одномерного массива. В процессе передачи информационный блок поэлементно поступает в канал связи и тем самым разворачивается во времени, превращаясь в сигнал, длительность которого пропорциональна числу элементов массива. Оборудование для передачи и приема локализовано в двух точках пространства (источник света и фотоприемник в оптическом канале, антенна передатчика и приемника в радиоканале). Процесс формирования голограммы отличается от процесса передачи информации. Тем не менее, голографию можно рассмотреть как метод передачи информации из области пространства, где находится объект, в область пространства, где формируется его голограмма. При формировании голограммы передаваемый информационный блок является 2- или 3-мерным изображением объекта, которое передается в одном пространственном канале и формирует матрицу голограммы. В классической голографии информация передается в пространстве параллельно (все точки одновременно) при создании голограммы. Но этот процесс может быть распределен во времени путем передачи по каналам связи информации об объекте для синтеза голограммы на приемном конце, например, в [6] по каналу связи передаются карты глубин и текстуры поверхности регистрируемого объекта.

Если голографию использовать для передачи информации, то изображения объектов на передающей стороне формируется одно за другим с некоторой тактовой частотой и с такой же частотой на приемной стороне регистрируются голограммы. Можно считать, что при голографической передаче информации происходит преобразование матрицы пространства-времени, дающее возможность параллельной передачи (развертка информации во времени, используемая при последовательной передаче, заменяется разверткой в пространстве). Таким образом, информация развернута в пространстве по площади принимаемой голограммы, а во времени используются две локальные точки – момент формирования объекта и момент формирования голограммы.

Голография предоставляет выбор из двух вариантов места проведения цифровой голографической обработки. Первый вариант – прямое голографическое преобразование – формирование в плоскости передатчика изображения, распространение волнового фронта, регистрация в приемнике интерференционной картины и восстановление исходного изображения путем цифровой обработки голограммы. Второй вариант – обратное голографическое преобразование – формирование в плоскости передатчика голограммы исходного изображения и передача волнового фронта голограммы. В этом случае в плоскости приемника формируется исходное изображение. Выбор варианта зависит от того, где больше доступных вычислительных ресурсов – в приемнике или передатчике.

Ограничения. Первое – отсутствие электронных средств, способных передавать и обрабатывать информацию со скоростью передачи голограмм в открытом пространстве. Второе – регистрация голограмм реальных изображений требует многоэлементных фотоматриц с большим динамическим диапазоном яркости. Поэтому на первом этапе исследования этой технологии рациональным решением является сокращение объема

передаваемой информации и использование для кодирования сообщений простейших изображений – однобитных матриц исходного объекта, например, 16x16. При использовании позиционного кода, как, например, при голографическом кодировании [7, 8], голограмма простейшего объекта (одной светящейся точки) представляет собой изображение зонной пластинки Френеля (Рис. 1).

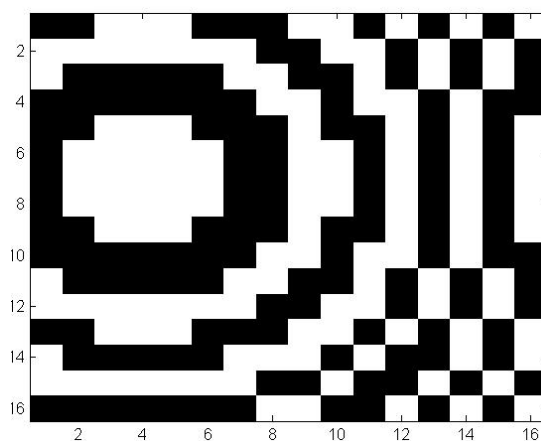


Рис. 1. Зонная пластинка Френеля

В этом случае полезный объем передаваемой информации – 8 бит (две 4-разрядные координаты светящейся точки на изображении объекта размером 16x16, соответствующие координатам центра зон Френеля на голограмме).

В плоскости приемника путем цифровой обработки вычисляются координаты центра зон Френеля, в данном случае это и есть восстановление голограммы. Если аппаратные ресурсы позволяют использовать матрицу источников света, в плоскости передатчика формируется голограмма, а интерференционная картина в плоскости приемника представляет собой изображение точечного источника, координаты которого – передаваемая информация.

Варианты решения задачи параллельной передачи информации

1. Оптическая голография. Для передачи в открытом пространстве в передатчике по входному блоку передаваемой информации формируется однобитная двоичная оптическая матрица объекта. Элементы матрицы в состоянии «1» – когерентные источники света, образованные оптическими модуляторами плоского фронта, создаваемого лазером, в состоянии «0» излучение отсутствует. Волновой фронт, образованный сферическими волнами элементов матрицы объекта, формирует в плоскости приемника голограмму, которая фиксируется фотоприемной матрицей. Скорость передачи информации определяется быстродействием оптических модуляторов и фотоприемников. В [9] описан пространственный модулятор света, который фокусирует луч в заданном направлении и изменяет интенсивность света на несколько порядков быстрее, чем коммерческие технологии на жидких кристаллах или микрзеркалах. Дальность передачи определяется соотношением разрешающей способности среды регистрации голограммы и длины волны используемого излучения – в оптической голографии размером фотоприемной матрицы, количеством и чувствительностью ее элементов и составляет несколько метров. Многократно увеличить дальность можно, используя в качестве элементов матрицы передатчика узконаправленные лазеры. Массив лазеров, наведенных на матрицу приемника, формирует в ее плоскости интерференционную картину. Дальность в этом случае будет определяться турбулентностями атмосферы и соответствовать дальности

атмосферных оптических линий связи. Помехоустойчивость последовательного оптического канала с голографическим кодированием рассмотрена в [10].

Если будет достигнут успех в области передачи изображений по многомодовому волокну и эти исследования получат практическую реализацию, то получат развитие и голографические методы многомодовой параллельной передачи произвольной цифровой информации. В отличие от реальных изображений, требующих высокого пространственного разрешения, цифровую информацию в многомодовом режиме можно передавать в виде небольших голограмм размером от 8×8 до 32×32 . Проблема модовой дисперсии и искажений других видов, возникающих при передаче по волокну, в этом случае решается за счет высокой устойчивости голограммы к воздействию искажений. На рис. 2 показана голограмма объекта, имеющего 4 светящиеся точки.

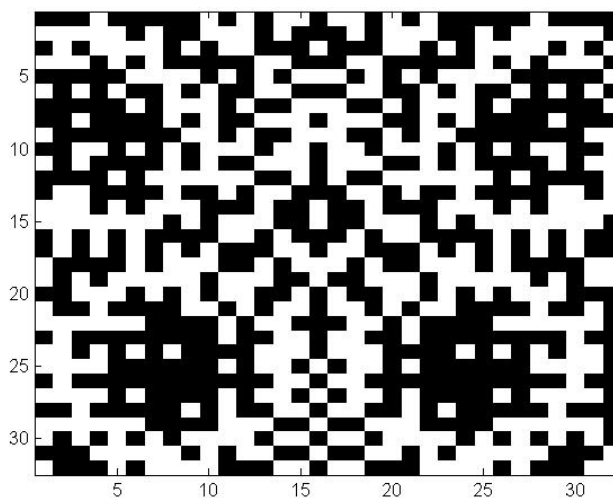


Рис. 2. Голограмма четырех точечных объектов

Размер голограммы 32×32 , поэтому координаты каждой точки несут 10 бит информации, соответственно, 4 точки обеспечивают передачу 40 бит. На рис. 3. приведен результат восстановления этой голограммы, полученный моделированием в среде MATLAB процесса параллельной передачи информации.

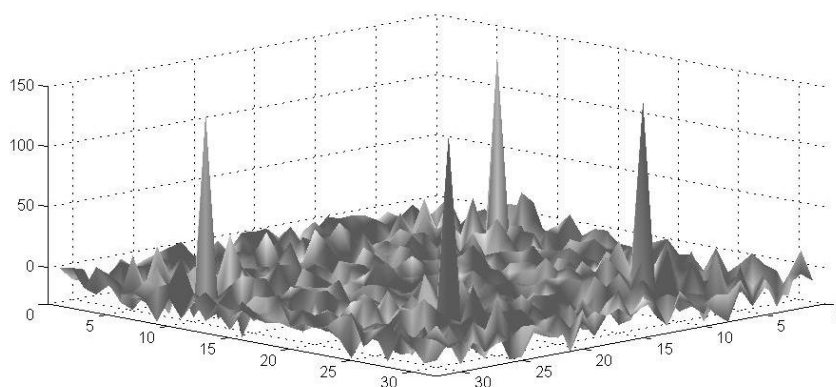


Рис. 3. Изображение четырех точечных объектов, восстановленное по голограмме

Таким образом, использование оптической голографии позволяет организовать параллельную передачу информации, как в открытом пространстве, так и в многомодовом волокне. Высокая помехоустойчивость голографической передачи позволяет противостоять атмосферным помехам и модовой дисперсии и повысить в 40 и более раз скорость передачи информации по сравнению с последовательной передачей в той же среде распространения [11].

2. Радиоголография. Начальным этапом развития параллельной передачи информации по радиоканалу является технология пространственно-временного кодирования (STC). Пространственно-временное кодирование реализуется в системах с несколькими антеннами на передающей стороне и несколькими антеннами на приемной стороне, в так называемых системах MIMO (Multiple Input – Multiple Output, множественный ввод – множественный вывод). В [12] рассмотрена возможность снижения габаритов антенных устройств MIMO путем использования голографических поверхностей MIMO (Holographic MIMO Surfaces – HMIMOS). При их разработке не ставилась задача создать канал параллельной передачи информации, но они вполне могут найти и такое применение.

Формирование и регистрация волнового фронта происходит в радиодиапазоне. Матрицы передатчика и приемника – антенные решетки или поверхности HMIMOS. Размер антенных устройств определяется рабочим диапазоном частот. При использовании терагерцового диапазона, планируемого для использования в сетях 6G, размер антенн составит 10-30 сантиметров, что допустимо для многих стационарных узлов связи. Антенна в данном случае не является фазированной антенной решеткой, ее элементы работают с постоянной фазой, которая измеряется на приемной стороне при совместной юстировке передающей и приемной антенной системы. Каждый элемент антенной решетки фиксирует интенсивность интерференционного поля в одной точке, вся решетка формирует принятую голограмму. В результате последующей цифровой обработки восстанавливается переданный информационный блок.

3. Частотная голография. Еще один вариант преобразования матрицы пространства-времени – это перевод информационного взаимодействия из области пространства-времени в область время-частота. Вместо рассмотренного переноса информационного блока из линейного массива во времени в пространственную матрицу голограммы можно использовать преобразование информационного блока в линейный массив спектра в частотной области. Это в некоторой степени ассоциируется с мультиплексированием с разделением по длине волны (WDM) в оптике, с разделением по частоте (FDM) в радиоканалах, а также с широкополосными технологиями, такими, как кодовое разделение, линейная частотная модуляция и другими, но при сохранении голографического подхода соответствует спектральному голографическому кодированию, описанному в [13]. В этом случае голограмма выстраивается в пространстве частот – форму голограммы, соответствующей передаваемому информационному блоку, имеет спектр сигнала. На передающей стороне исходный информационный блок, например, байт, переводится в единичный позиционный код, представляющий собой 256-битный код, содержащий 255 нулей и одну единицу, номер позиции которой задан исходным байтом. По этому одномерному массиву строится одномерная (линейная) голограмма, значения которой округлены до одного бита, т.е. голограмма представляет собой 256-битную последовательность нулей и единиц, содержащихся примерно в равной пропорции. Для передачи голограммы по каналу связи необходимо сформировать сигнал $y(mT)$, форма спектра которого является той же цифровой одномерной голограммой – единица в i -й позиции голограммы означает наличие в спектре i -й гармоники, ноль – отсутствие. Реализуется эта функция путем сложения гармоник с соответствующими номерами:

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

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

Такой способ формирования сигнала 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.

При использовании сигнала $y(mT)$, длительность которого равна целому числу периодов всех используемых гармоник, его спектр имеет линейчатый вид, соответствующий голограмме виртуального изображения входного блока данных (Рис. 4).



Рис. 4. Спектр в форме голограммы

Сигнал $y(mT)$ может быть синтезирован в аналоговом виде, однако во многих случаях точнее и проще проводить цифровой синтез, который может быть реализован двумя способами. Первый способ – алгебраическое сложение N несущих, образующих линейчатый спектр, соответствующий голограмме, второй – обратное быстрое преобразование Фурье голограммы.

Важным параметром сигнала является пик-фактор, который достигает максимума при нулевой начальной фазе используемых несущих. Повышенное значение пик-фактора предъявляет более высокие требования к линейности усилителя. Наилучший результат достигается при распределении начальных фаз несущих по случайному закону. Сигнал в этом случае имеет шумоподобную форму (Рис. 5).

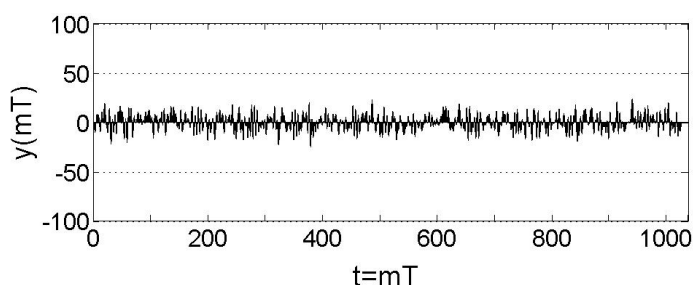


Рис. 5. Форма сигнала при случайной начальной фазе несущих

В приемнике вычисляется спектр принятого сигнала. Цифровой массив, представляющий спектр, рассматривается как одномерная голограмма исходного цифрового блока, и декодируется описанным в [10] голографическим методом – производится восстановление исходного блока данных по цифровой голограмме.

Ограничения данного метода: необходимость в широком диапазоне частот и наличие ограничения скорости передачи информации из-за требования к длительности сигнала не менее целого периода нижней гармоники используемого диапазона частот.

Заключение

Предложенные методы перехода от последовательной к параллельной передаче информации в оптическом и радиодиапазоне с использованием голографического преобразования произвольной цифровой информации позволяют существенно повысить скорость передачи данных. Теоретическим пределом пропускной способности таких каналов связи является скорость передачи голограммы – объема информации, содержащейся в трехмерном изображении сложного объекта, в течение длительности одного периода волны электромагнитного излучения. Достижимый выигрыш в скорости

зависит от размеров голограммы, используемого диапазона частот и выбранных параметров кодирования. Разработка аппаратных решений голографического способа передачи информации является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Литература

1. Григорьева Е.Е. Волноводная передача изображений в когерентном свете (обзор) / Е.Е. Григорьева, А.Т. Семенов // Квантовая электроника. – 1978. - Т. 5. - № 9. - С. 1877–1895.
2. Fertman A. Image transmission through an optical fiber using real-time modal phase restoration / A. Fertman, D. Yelin // J. Opt. Soc. Am. – 2013. - 30(1): 149-157.
3. Lucesoli A. Image transmission by multimode optical fiber for microendoscopy / A.Lucesoli, T.Rozzi // Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics, SPIE. -2016. - Vol. 6631. – P.663117.
4. Rahmani B. Learning to image and compute with multimode optical fibers / B. Rahmani, I. Oguz, U. Tegin, J. Hsieh, D. Psaltis, C. Moser // Nanophotonics 2022. - 11(6). -P. 1071–1082.
5. Caramazza P. Transmission of natural scene images through a multimode fibre / P. Caramazza, O. Moran, R. Murray-Smith, D. Faccio // Nature communications 2019; 10; 2029. DOI:10.1038 /s41467-019-10057-8.
6. Шойдин С.А. Синтезированные на приёмном конце канала связи голограммы 3D-объекта в технологии Dot Matrix / С.А. Шойдин, А.Л. Пазоев, А.Ф. Смык, А.В. Шурыгин // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 2. – С.204-213. – DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1037.
7. Timofeev A.L. Holographic method of error-correcting coding / A.L. Timofeev, A.Kh. Sultanov // Proc. SPIE 11146. Optical Technologies for Telecommunications 2018. – 2019. - 11146 (111461A). doi:10.1117/12.2526922
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. doi:10.18287/2412-6179-СО-739.
9. Panuski, C.L. A full degree-of-freedom spatiotemporal light modulator / C.L. Panuski, I.Christen, Minkov, M. Brabec C.J. et al. // Nature Photonics.- 2022.- no. 16. - PP. 834–842. doi.org/10.1038/s41566-022-01086-9.
10. Тимофеев А.Л. Увеличение дальности атмосферных оптических линий связи с помощью позиционного кодирования / А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин // Оптический журнал. – 2022. - Т. 89.- № 9. - С. 75–85. doi: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-75-85.
11. Тимофеев А.Л. Использование голографических методов передачи изображений по многомодовому оптическому волокну для повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи / А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков А.Р. Гизатулин// Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 13–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-13-23>.
12. Huang C. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends / C. Huang , S. Hu, G.C.Alexandropoulos et al/ // IEEE Wireless Communications 2020; 27(5). DOI: 10.1109/MWC.001.1900534.
13. Тимофеев А.Л. Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных / А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин // Информационно-управляющие системы. - 2022. - № 4, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2022-4-2-11.

HOLOGRAPHIC METHODS OF PARALLEL INFORMATION TRANSMISSION

A. L. Timofeev, A. Kh. Sultanov, I. K. Meshkov, A. R. Gizatulin

Ufa University of Science and Technology
32, Z. Validi St, Ufa, 450076, Russian Federation

Abstract. The possibilities of organizing communication channels with parallel transmission of information are considered. During holographic transmission, a transformation of the space-time matrix occurs, which makes it possible for parallel transmission - the sweep of information in time, used in serial transmission, is replaced by a sweep in space over the area of the hologram, and two local points are used in time - the moment of formation of the object and the moment of formation of the hologram. One option is optical holography, in which, to increase the communication range, narrowly directed lasers can be used as elements of the transmitter matrix to increase the intensity of the interference pattern. The second option is the transfer of holography to the radio range, the third is the transfer of information interaction from the space-time region to the time-frequency region. The proposed methods can significantly increase the data transfer rate. The theoretical limit on the capacity of such communication channels is the transmission speed of a hologram - the amount of information contained in a three-dimensional image of a complex object, during one period of an electromagnetic radiation wave.

Keywords: holographic information transmission, parallel transmission, spectral holography.

Статья отправлена в редакцию 30 декабря 2023 г.