

## Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе

С. А. Шойдин<sup>1</sup>, А. Л. Пазоев<sup>1</sup>, И. К. Цыганов<sup>2</sup>, Е. А. Дроздова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В патенте РФ № 2707582 был предложен способ сжатия голографической информации и передачи её методом, аналогичным SSB, по обычным каналам связи. В настоящей работе переданная и принятая по каналу Wi-Fi голографическая информация о 3D портрете человека была восстановлена в виде радужной голограммы, как одной из разновидностей голограмм, путём компьютерного введения несущей пространственной частоты и затем материальной реализации на фоторезисте.

*Ключевые слова:* оптика, голография, радужная голограмма, голографическое телевидение, 3D дополненная реальность.

*Цитирование:* Шойдин, С. А. Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, И. К. Цыганов, Е. А. Дроздова // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 109–117.

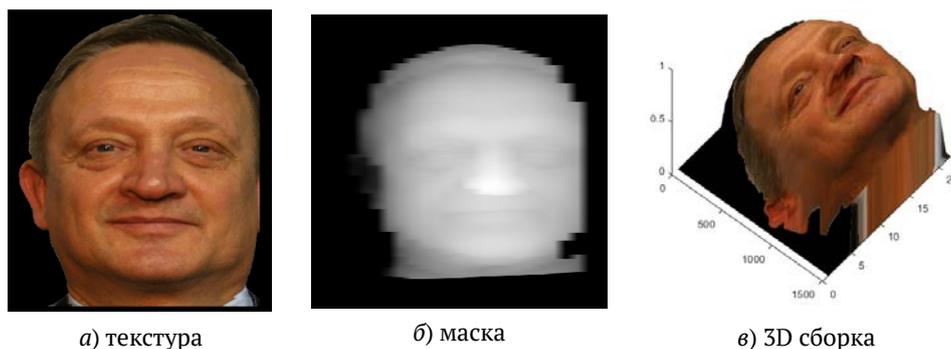
### Введение

Переданные по каналу связи голограммы одной боковой полосы пространственных частот были синтезированы путём возвращения несущей пространственной частоты. Такие голограммы достаточно сложно воспроизводятся классическим методом, повторяющим технологию голографирования по схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса. Гораздо легче это осуществляется в технологии, представляющей схему записи С. Бентона. В этой технологии была записана первая голограмма, переданная по обычному каналу связи в реальном времени. Измерен параллакс восстановленного такой голограммой изображения. Обсуждаются перспективы использования таких голограмм.

Как показано в [1], чрезвычайно большие объёмы информации, содержащиеся в голограммах, препятствующие передаче их по обычным каналам связи, можно без ущерба сжимать до приемлемых размеров, сравнимых с обычным телевизионным кадром стандарта Full HD или 4K. При этом передача голографической информации (рис. 1) похожа на известный в радиотехнике способ передачи на одной боковой полосе (SSB).

Прямая SSB передача была осуществлена по каналу Wi-Fi пакетами по 500 пар изображений рис. 1 а,б с замерами скорости передачи.

Был проведён опыт передачи последовательности пар таких сигналов (рис. 1а и 1б) по беспроводному каналу связи Wi-Fi для имитации 3D видео. Для этого на передающем устройстве для передачи кадров был установлен протокол FTP, а на приёмном — программа для работы с FTP-серверами FileZilla. Каждый передаваемый кадр 3D изображения представлял собой сумму двух 2D кадров — текстуры (2000×2000 пикселей) и маски (1000×1000 пикселей).

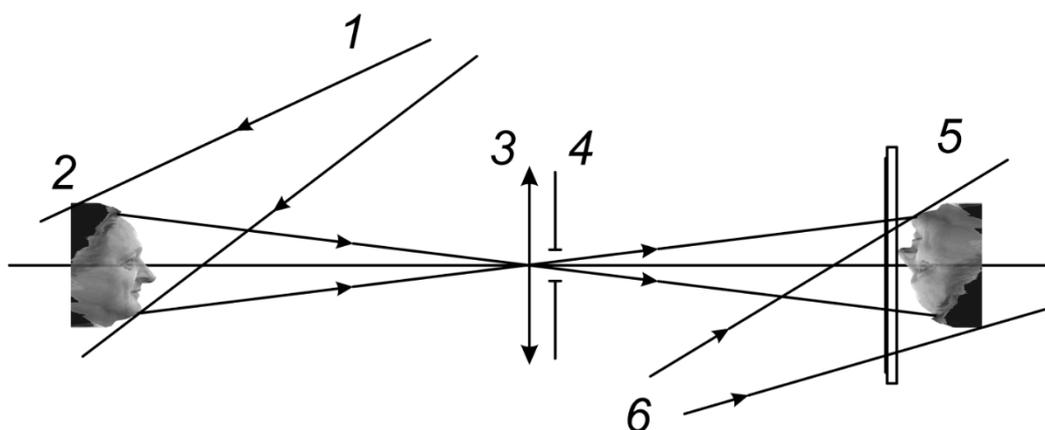


**Рис. 1.** Переданная о 3D объекте информация

Для имитации передачи видеопоследовательности одновременно передавались пакеты по 500 двойных кадров. Замеренное программой FileZilla время передачи этих пакетов кадров при воспроизведении в реальном времени, составляло 12 сек для кадров, сформированных в формате JPEG и 51 сек для кадров, сформированных в формате PNG, что эквивалентно передаче 41,67 и 9,8 двойных кадров в секунду, соответственно. Значит, по крайней мере, для формата JPEG, была фактически установлена скорость передачи 3D сигнала в узкой полосе канала связи Wi-Fi (стандарта IEEE 802.11n), достаточная, для обеспечения TV стандарта частоты кадровой развёртки. На этом основании можно сделать вывод, что передача полного изображения 3D-объекта в реальном времени с кадровой частотой больше, чем 25 кадров/сек., при данной конфигурации устройств, вполне осуществима.

По переданной таким образом информации о 3D объекте голографирования на приёмном конце канала связи цифровым методом синтезируется голограмма. Она является голографическим дисплеем, восстанавливающим изображение этого объекта. Тип голограммы может быть любым, однако виртуальный синтез наиболее распространенных голографических дисплеев по схеме Ю. Н. Денисюка [2], затруднителен в процессе преобразования виртуальной голограммы в её материальный аналог. Поэтому в первом нашем докладе, представленном на конференции HOLOEXPO 2021 «Особенности синтеза SSB голограмм» мы выбрали синтез голограмм на приёмном конце канала связи по схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса. Однако работа с этим типом голограмм содержит ряд трудно решаемых проблем, прежде всего связанных с необходимостью осуществления быстрых преобразований Френеля, описывающих в скалярном приближении теории дифракции распространение комплексной амплитуды электромагнитного поля в пространстве от объекта до голограммы и от голограммы до плоскости наблюдения [3], а также с практическими трудностями реализации поточечной записи больших массивов данных. Кроме того, этот тип голограмм не восстанавливается белым светом. Во-первых, потому, что спектральное размытие точек изображения  $\Delta y_\lambda$ , пропорциональное ширине спектра  $\Delta\lambda$  и расстоянию  $Z$  от плоскости голограммы до точки голографируемого изображения, на удалении от голограммы имеет значительную протяженность (1), где  $\theta_R$  — угол наклона опорного пучка,

$$\Delta y_\lambda \approx (\Delta\lambda/\lambda)Z\theta_R, \quad (1)$$



1 — излучение подсветки объекта, 2 — объект, 3 — объектив, 4 — фильтр вертикальных пространственных частот, 5 — голографическая пластинка, 6 — когерентное с опорным пучком

**Рис. 2.** Схема одноступенчатой записи радужной голограммы С. Бентона

а во-вторых, угловой размер  $\theta$  источников белого света существенно больше лазерного источника, что также приводит к размытию (2).

$$\Delta y_{\theta} \approx \theta Z. \quad (2)$$

Для белого источника ( $\Delta\lambda = \lambda$ ), с угловым размером светящегося тела  $\theta = 1/200$  удалённого на расстояние наилучшего видения ( $Z = 250$  мм) это  $\Delta y_{\lambda} = 250$  мм и  $\Delta y_{\theta} = 1,2$  мм, соответственно.

Из (1) и (2) видно, что величины обеих типов размытия пропорциональны расстоянию от изображения до голограммы, поэтому удобно остановиться на так называемых голограммах сфокусированного изображения [4], поскольку там оно минимально. Также, широко известна технология «радужных» голограмм [5], которые тоже могут восстанавливаться белым светом. Кроме того, в «радужных» голограммах уменьшается энтропия за счёт устранения вертикального параллакса, что приводит к уменьшению количества информации в голограмме, избыток которой так мешает при передаче по каналам связи [6].

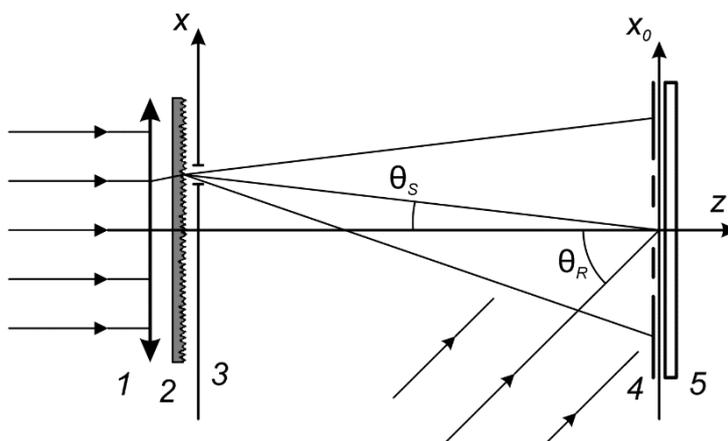
На рис. 2 приведена одноступенчатая схема записи радужной голограммы, а на рис. 3 её вариант для записи плоских цветных изображений. Если в последней схеме записывать несколько плоских изображений, поворачивая между экспозициями фотопластинку относительно вертикальной оси, то при восстановлении каждое изображение будет восстанавливаться под своим углом, обеспечивая эффект параллакса.

Изображение объекта голографирования 2, подсвеченного пучком 1, когерентным с 6, переносится на фотопластинку 5 через фильтр вертикальных пространственных частот так, что согласно [7] образуется радужная голограмма С. Бентона. Её спекл-структура вытянута по вертикальной оси и имеет полный набор горизонтальных пространственных частот (рис. 3).

Такая голограмма содержит меньше информации об объекте, поскольку в ней отсутствует вертикальный параллакс и, в белом свете она восстанавливает одноцветное изображение, пе-



**Рис. 3.** Структура вытянутых вертикально спеклов радужных голограмм С. Бентона с ориентированными поперечно под разными углами интерференционными полосами, образованными интерференцией пространственно отфильтрованного объектного и опорного пучка (рис. 2)



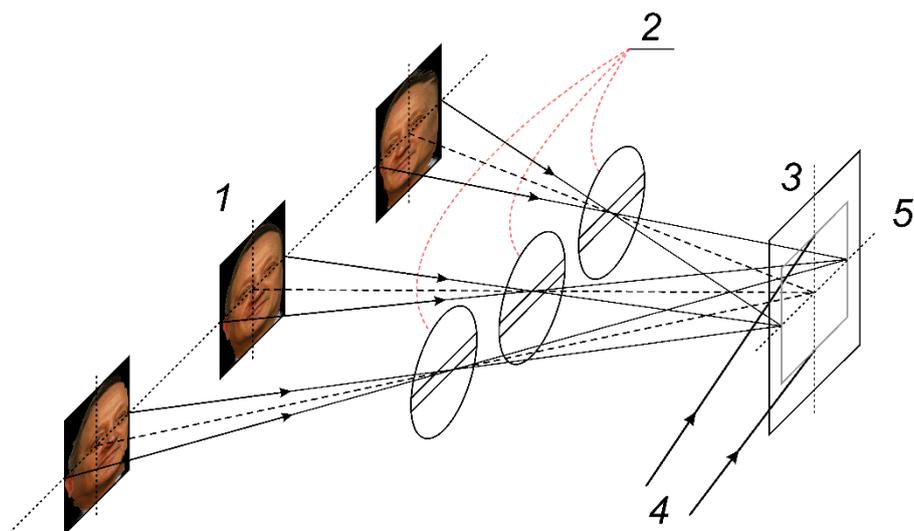
Коллимированный пучок 1 через случайную фазовую маску 2 и горизонтальную щель 3 формирует вместе с транспарантом 4 объектный пучок на голограмму 5

**Рис. 4.** Схема записи радужных голограмм сфокусированных изображений

реливающееся цветами радуги при вертикальном перемещении глаз наблюдателя. Её внешний вид подсказывает, что такую голограмму можно синтезировать с помощью набора столбцов, состоящих из коротких разнонаправленных отрезков.

Цветное изображение объекта можно получить, например, по схеме рис. 4, где щелевой источник 3 со случайной фазовой маской 2 формирует объектную волну на голограмме 5, с пространственной модуляцией маской 4. Последняя выбирается из разных участков спектра записываемого плоского изображения согласованно с углом Брэгга  $\theta_s$  так, чтобы при восстановлении для каждой из записанных волн угол восстановления был одинаков [8].

На голографическую пластинку можно записывать не одно, а несколько плоских изображений, сфотографированных под разными углами (рис. 5).



а) схема записи голограмм сфокусированных изображений, пришедших из разных направлений, с фильтрацией щелевым фильтром



б) компиляция 15 ракурсов изображения 3D объекта

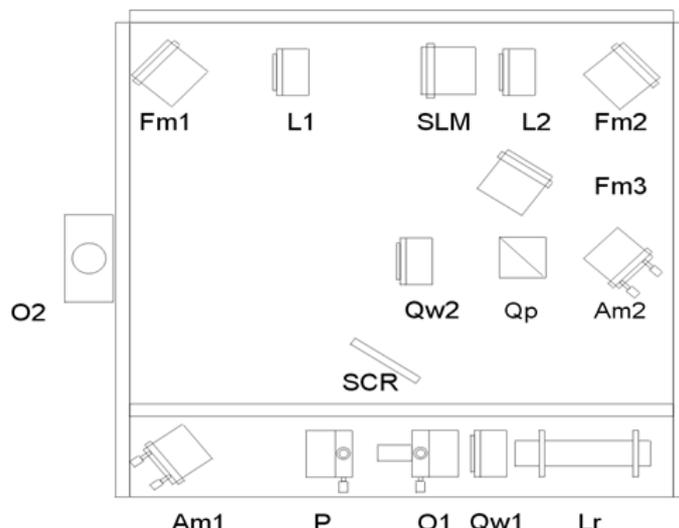
**Рис. 5**

Такие голограммы, будучи освещёнными пучком, аналогичным опорному, но с широким спектром будут восстанавливать изображения, воспринимаемые наблюдателем как изображения, имеющие горизонтальный параллакс, их можно считать одним из возможных вариантов цветных 3D дисплеев.

Известно, что давно ведутся разработки ряда сложных оптико-механических схем, реализующих такие цветные дисплеи на основе радужных голограмм С. Бентона [9]. Однако такая запись, как правило, будет обладать малой селективностью по углу для тонких голограмм и малой дифракционной эффективностью ввиду быстрого исчерпания динамического диапазона фотоотклика. Устранить эти недостатки можно в технологии DotMatrix, когда фотопластинка разбивается на серию так называемых «голопикселей», каждый из которых состоит в свою очередь из набора  $j$  участков по числу записываемых ракурсов. При этом на каждый  $j$  участок во всех голопикселях записывается плоское изображение только одного ракурса 3D изображения. При освещении полученной таким образом, радужной голограммы сфокусированных изображений получается стереоэффект, обеспечивающий горизонтальный параллакс серии ракурсов цветных изображений исходного 3D объекта.

**Экспериментальная запись голограмм**

Для экспериментального исполнения SSB голограммы была выбрана система KineMax MASTERING SYSTEM, (рис. 6) в которой сложный набор оптических элементов был максимально заменён компьютерным синтезом соответствующих дифракционных решёток.



Lr — лазерный модуль с блоком питания 405 нм 50 мВт, электронный затвор, лазер устанавливается на оптической плате; Qw1 — четвертьволновая пластинка; O1 — объектив; P — точечная диафрагма; Am1 — регулировочное зеркало; Fm1 — неподвижное зеркало; L1 — объектив; SLM — жидкокристаллический пространственный модулятор света (ЖК-ПМС) 1024×768 пикселей, 36864×27648 мм, период пикселей по горизонтали и вертикали 36 мкм; L2 — линза; Fm2 — неподвижное зеркало; Am2 — регулировочное зеркало; Qp — светоделительный поляризационный кубик; Qw2 — четвертьволновая пластина; O2 — объектив; Fm3 и SCR — юстировочные элементы

**Рис. 6.** Оптическая схема KineMax

Под объективом O2 находится перемещающийся по двум осям предметный столик, куда помещается фоторезист. Сформированное ЖК-ПМС изображение нескольких решёток (рис. 7), проецируется объективом L2 на соответствующий участок фоторезиста.

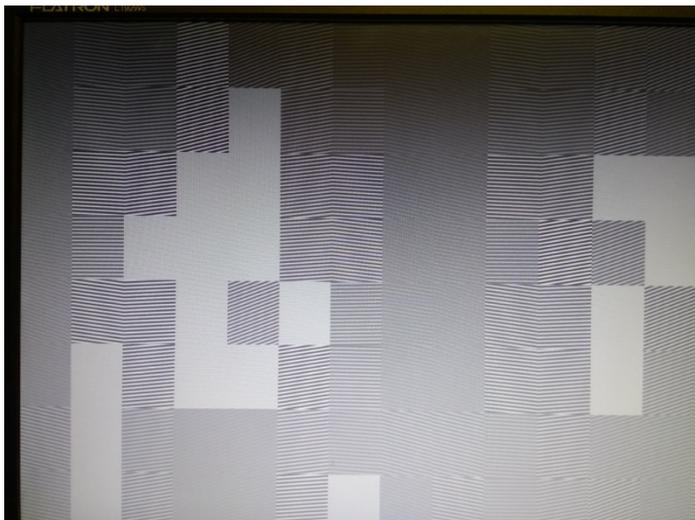
Путём перемещения столика и проецирования на каждый участок своего, вычисленного набора пространственно ориентированных решёток, записывается голограмма в целом, которая состоит из набора голопикселей, на каждом из которых есть участок для каждого из ( $j$ ) записываемых изображений (рис. 8).

Видно, что полученные расчетным путём структуры, состоящие из вертикальных отрезков с ориентированными поперечно под разными углами полосами (рис. 8) очень похожи на полученные в классической схеме С. Бентона (рис. 3).

Общий вид голограммы, полученной на устройстве KineMax, приведён на рис. 9.

Наблюдаемый в восстановленном с такой голограммы изображении параллакс представлен на рис. 10.

На рис. 10 видно, что восстановленные таким образом изображения реально обладают эффектом параллакса. Величина параллакса непосредственно может быть измерена с помощью выноса телескопической системой восстановленного голограммой изображения (рис. 11).



**Рис. 7.** Структура одной из вычисленных по рис. 5б ячейки голограммы (голопикселя)



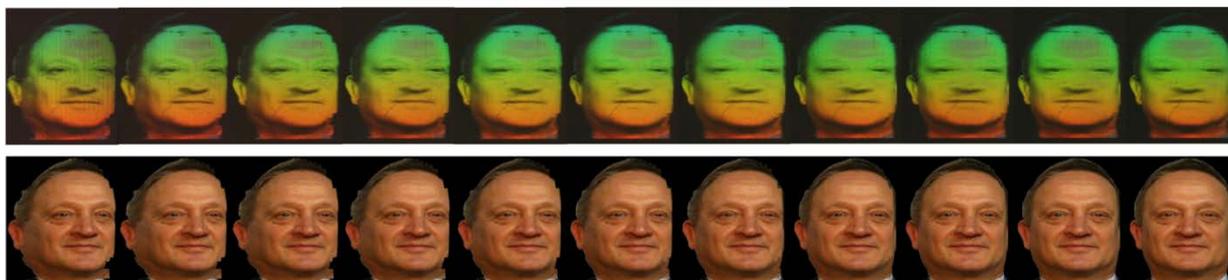
**Рис. 8.** Фотография участка фоторезиста с нанесённой на него структурой интерференционных полос, сформированная с использованием скомпилированных в рис. 5б ракурсов объекта голографирования

Параллакс наблюдается в пространстве, куда вынесено изображение, восстановленное голограммой. Тестовыми приспособлениями были две иголки, разнесённые на глубину объекта вдоль оптической оси стенда восстановления изображения голограммой. Верхняя — ближе к голограмме вдоль оптической оси, нижняя дальше. Положение иголок выбиралось такое, чтобы при изменении угла поворота восстановленного изображения их острия практически не смещались с выбранной опорной точки на объекте. Расстояние между иголками измерялось и равно 5,85 мм, телескопическая система имеет продольное увеличение  $9\times$ , что соответствует глубине восстановленного голограммой изображения, равной 0,65 мм.



а) свет, рассеянный облаком      б) прямой солнечный

**Рис. 9.** Радужная голограмма объекта рис. 1 в солнечном свете



**Рис. 10.** Восстановленные изображения (верхний ряд) проекций 3D объекта (нижний ряд), записанные в радужной голограмме на устройстве KineMax



**Рис. 11.** Измерение параллакса восстановленного голограммой изображения путём его выноса в пространство измерений

### Заключение

Поскольку данные о голографируемом 3D объекте были реально переданы по Wi-Fi каналу в виде двух кадров (маска и текстура рис. 1), можно сделать вывод, что цикл — запись 3D изображения объекта — передача его по обычному радиоканалу с принятой частотой кадровой развёртки — синтез радужной голограммы сфокусированных изображений, эквивалентной записи 15 ракурсам плоских голограмм — восстановление изображения 3D объекта и наблю-

дение в нём параллакса, был успешно осуществлён. Это позволяет сделать вывод о возможности передачи голограмм в реальном времени по обычным каналам связи методом SSB. Авторы надеются, что представленные в настоящей статье материалы будут полезны разработчикам голографических 3D дисплеев для решения задач дополненной реальности и голографического TV.

### Благодарность

Авторы благодарят профессора Сергея Борисовича Одинокова, зам. директора по научной работе НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, члена-корреспондента Международной Академии Информатизации, Москва, Россия, за предоставленную возможность использовать в настоящей работе оборудование НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники.

### Список источников

- [1] Шойдин, С. А. [Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования](#) / С. А. Шойдин // Компьютерная оптика. — 2020. — Том 44. — № 4. — С. 547–552.
- [2] Денисюк, Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю. Н. Денисюк // Доклады Академии наук СССР. — 1962. — Том 144. — № 6. — С. 1275–1278.
- [3] Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен; пер. с англ. В. Ю. Галицкого и М. П. Головея под ред. Г. И. Косоурова. — М. : Мир, 1970. — 364 с.
- [4] Stroke, G. W. [White-light reconstruction of holographic images using transmission holograms recorded with conventionally-focused images and “in-line” background](#) / G. W. Stroke // Physics Letters. — 2017. — Vol. 23. — № 5. — P. 325–327.
- [5] Benton, S. A. Hologram reconstruction with extended incoherent sources / S. A. Benton // Journal of the Optical Society of America. — 1969. — Vol. 59. — P. 1545–1547.
- [6] Shoydin, S. A. Remote Formation of Holographic Record / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2021. — Vol. 57. — № 1. — P. 80–88.
- [7] Власов, Н. Г. Современное состояние и перспективы развития радужной голографии: Обзорная информация / Н. Г. Власов, А. Н. Заборов, А. В. Яновский // Сер. «Образцовые и высокоточные средства измерений». — М. : Госстандарт СССР. ВНИИКИ, 1990. — Вып. 3. — 42 с.
- [8] Рябухо, В. П. Радужные голограммы / В. П. Рябухо // Физическое образование в вузах. — 2003. — Vol. 9. — № 4. — P. 88–99.
- [9] St-Hilaire, P. [Color Images With The MIT Holographic Video Display](#) / P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. E. Lucente, P. M. Hubel // Practical Holography VI : Proceedings of SPIE. — 1992. — Vol. 1667. — P. 37–87.