

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.417:535.421

СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

© С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
630108, г. Новосибирск, ул. Платотного, 10
E-mail: shoydin@ssga.ru*

Предложен способ формирования и передачи 3D голографических изображений, основанный на формировании 2D голографического сигнала при вычитании из него несущей пространственной частоты и сжатии тем самым голографической информации с целью быстрой передачи по стандартному радиоканалу в реальном времени. Информация о 3D-структуре голографируемого объекта регистрируется с использованием когерентного и некогерентного излучения, в котором методами структурированного света получается аналог голограммы объекта, пригодный для передачи на расстояние в виде 2D-кадра, эквивалентного голограмме с устранённой избыточностью. Такая передача 3D голографической информации похожа на известную в радиотехнике передачу на одной боковой полосе с вычетом её несущей частоты и возможностью последующего введения любой несущей на удалении от объекта голографирования и применима для задач голографического TV и 3D дополненной реальности. Приведены примеры реализации указанной технологии при создании голографических образов реального 3D-портрета человека и передаче его по каналу Wi-Fi. Показаны 3D-изображения, синтезированные в ИК-диапазоне. Указанная технология легко адаптируется к задачам комплексирования изображений различных участков спектра электромагнитного излучения. Предложены возможные применения способа в 3D-приборостроении.

Ключевые слова: лазер, голография, 3D-изображения, структурированные изображения, облако точек, мультиплексирование изображений, дополненная реальность, голографическое телевидение.

DOI: 10.15372/AUT20210110

Введение. Активно развивающаяся в настоящее время технология дополненной реальности [1] нуждается не только в создании плоских картин, но и более приближённых к реальности трёхмерных изображений [2]. Однако на этом пути приходится преодолевать значительные трудности, связанные с обработкой больших объёмов информации, которые трудно, а иногда и невозможно передавать по традиционным каналам связи. Поэтому актуальными задачами являются увеличение пропускной способности канала и эффективное сжатие сигнала, несущего 3D-изображение. Поскольку объём реальных 3D голографических изображений превышает пропускную возможность всего радиодиапазона, разработка способов сжатия 3D голографической информации для передачи на расстояние особенно актуальна.

Сегодня наибольшее распространение получил метод формирования трёхмерных изображений [3], который заключается в захвате поля объекта множеством камер, расположенных в разных ракурсах (рис. 1), с последующей обработкой изображений путём выделения плоскостей, составляющих изображение объекта, выделения узлов и рёбер пересечения этих плоскостей и затем передачи этой информации на приёмный конец канала связи к устройству формирования изображения 3D дополненной реальности.

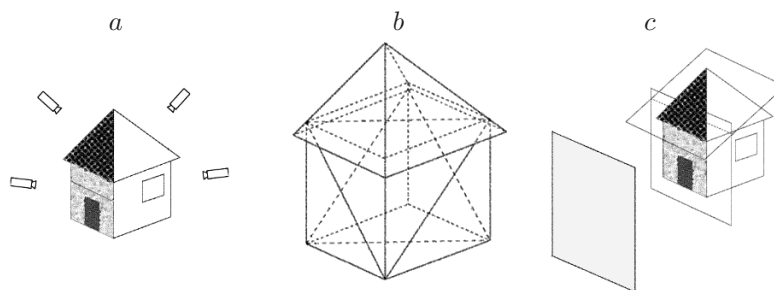


Рис. 1. Регистрация 3D-изображения: регистрация 2D-изображения множеством камер (a), вычисление модели изображения (b), передача модели по каналу связи и восстановление модели изображения на мониторе (c), позволяющее с помощью дополнительной служебной информации конфигурировать изопроекции объекта, имитирующие взгляд на объект с разных направлений

Этот метод, ошибочно получивший название «Holographic 3-d television», требует для адекватной передачи трёхмерных изображений такого же количества камер, сколько плоскостей содержит регистрируемый объект. Недаром, несмотря на лавинообразно развивающуюся индустрию компьютерных игр, мы наблюдаем в них хотя и сложные, почти как живые, движущиеся фигурки, но в которых именно по неживому выражению лица узнаются куклы, а не живые люди. Использование большого количества камер затруднительно как технически, так и из-за динамического изменения самого регистрируемого поля 3D-изображения. В идеале такие камеры должны позиционироваться не в одном фиксированном для каждой камеры месте, а изменять своё местоположение вслед за изменением структуры регистрируемого 3D-изображения примерно так, как это делают опытные фоторепортёры, вооружённые единственной камерой.

Также существуют работы в рамках фрактальных технологий [4], но ввиду сложности и проблем сходимости таких алгоритмов они сегодня ограничиваются анализом 2D-изображений.

Другими известными методами фиксации информации о 3D-объекте являются разнообразные методы, развитые на основе лазерного трёхмерного сканирования [5]. Как отмечают авторы этого исследования, нет единой наилучшей техники для формирования 3D-изображений, и все они страдают большой вычислительной трудоёмкостью и чувствительностью к сбоям и ошибкам разного рода, зачастую приводящим к необходимости вручную дорабатывать полученный 3D-образ, для чего в одном из лучших сканеров Hewlett Packard — HP 3D Structured Light Scanner Pro S3 — даже заложена специальная опция «закрывать отверстия» [6]. Это связано, прежде всего, с построением методами лазерного сканирования виртуальных 3D-моделей больших объёмов (облако точек), идентичных реальным 3D-объектам.

Известно, что голограмма, во-первых, фиксирует на 2D-плоскости 3D-изображение, а во-вторых, может компенсировать частичную потерю информации, вызванную, например, сколом её части, что может облегчить или снять проблему появления «отверстий» в восстановленном ею 3D-изображении. Поэтому в данной работе было рассмотрено представление сканированного 3D-объекта в виде 2D голографической структуры с целью устранения избыточности в голограмме, приводящей к невозможности передавать её на расстояние со скоростью, необходимой для реализации проектов голографического TV и дополненной реальности. Был предложен [7] и опробован способ дистанционного формирования голографической записи, основанный на представлении трёхмерного массива

$A(x, y, z)$ в виде двух двумерных — амплитуды $A(x, y)$ и фазы $kz(x, y)$:

$$A(x, y, z) = A(x, y) e^{jkz}, \quad (1)$$

а также примеры его реализации, пригодные для регистрации и передачи по узкополосному радиоканалу $3D$ голографических изображений. Здесь $k = 2\pi/\lambda$, а λ эквивалентна длине волны записывающего голограмму излучения. Этому препятствовало большое количество информации, хранящейся в традиционной голограмме [8–11].

Действительно, сразу после появления первых работ по голографии [12] было замечено, что голограмма сохраняет полную информацию о восстановленном волновом фронте, содержит очень большие массивы информации и при бинарной записи [13] достигает

$$N = S(\Omega/\lambda)^2, \quad (2)$$

где N — количество информации в одной голограмме, S — её площадь, Ω — относительное отверстие объектива системы записи, λ — длина волны. Восстановленное голограммой изображение при этом имеет поперечное разрешение h , как и в обычной оптической системе переноса изображения, определяемое так называемым критерием Рэлея, и равно диаметру пятна Эйри h [14]:

$$h \sim \lambda/\Omega. \quad (3)$$

При $\Omega = 1$, что соответствует хорошим оптическим системам, плотность записи в голограммах примерно равна одной точке на площади λ^2 , в которой количество градаций интенсивности соответствует допустимому уровню отношения θ (сигнал/шум). Согласно формуле Шеннона количество записываемой аналоговой информации N' в таких голограммах может достигать

$$N' = S(\Omega/\lambda)^2 \log(1 + \theta), \quad (4)$$

где Ω/λ имеет смысл максимальной пространственной частоты по двум координатам, а S — полный размер передаваемого сигнала (по Шеннону — длительность сигнала).

При записи типовых изобразительных голограмм размером А4 (210 × 297 мм) и отношении сигнал/шум 256, что соответствует типовому полиграфическому качеству изображений, количество записываемой в видимом диапазоне на $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм информации достигает $N' \approx 6 \cdot 10^{11}$ бит или около 550 Гб. Это на два порядка больше, чем требуется для передачи одного художественного фильма стандарта Full HD.

Передавать такое количество информации быстро по обычным радиоканалам крайне сложно, а в режиме кино-, видеопроекции, т. е. 24–25 кадр./с, практически невозможно. Без специального кодирования это заняло бы весь радиодиапазон. Другими словами, покадровая передача одного голографического телевизионного сигнала заставит прекратить все остальные радио- и телевизионные передачи, что отмечают разные исследователи [8–11]. Это означает, что для передачи голографической информации на расстояние требуются специальные способы её записи, осуществляющие сжатие без недопустимых потерь.

Дистанционное формирование голограмм. Известно, что для успешного распознавания образа часто бывает достаточно простой фотографии, чем уже давно пользуются криминалисты [15]. Информация об объёме тела, его $3D$ -конфигурации носит дополнительный характер и может быть важна не всегда, а только в некоторых случаях, например в устройствах дополненной реальности, показывающих подстилающую поверхность при посадке летательного аппарата [2]. Точность передачи подстилающей поверхности при этом соответствует уже не разрешающей способности в видимом диапазоне электромагнитных

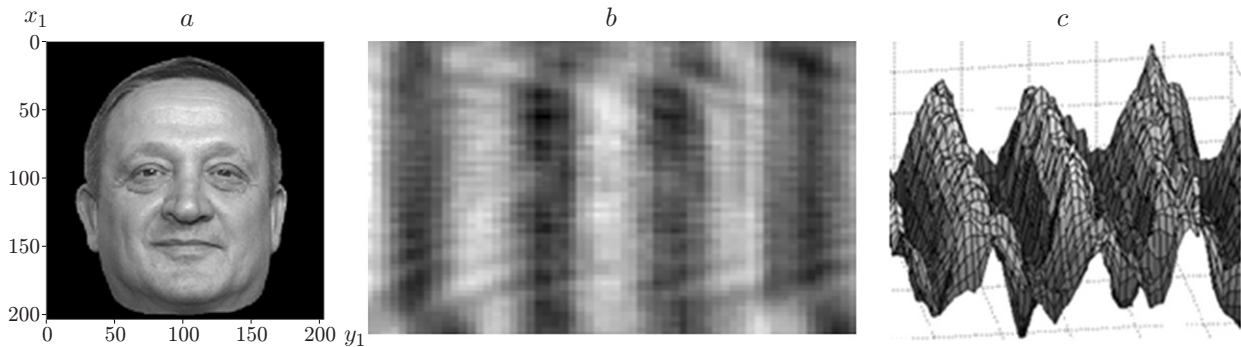


Рис. 2. Запись голограммы реального объекта: *a* — объект; *b* — пространственные частоты на голограмме; *c* — распределение интенсивности интерференционной картины, записываемой на голограмме $\tau_2(x_1, y_1)$

колебаний, а разрешающей способности в гораздо более длинноволновом ИК- или даже в радиодиапазоне, где в соответствии с (2) разрешающая способность может быть меньше на много порядков.

Поэтому интерференционные полосы, искривления которых в голограмме, как в любом интерферометре, характеризуют глубину изображения, его объём, могут иметь гораздо меньшую частоту. Если они соответствуют радиодиапазону, то из субмикронного диапазона их период переходит в миллиметровый или даже в сантиметровый диапазон [2].

В классической голографической записи [12] создание интерференционной картины поверхности регистрируемого объекта в одной области электромагнитных колебаний, а текстуры его поверхности в другой невозможно, но компьютерные методы синтеза голограмм дают такую возможность.

Действительно, при записи голограмм классическим способом записывается голографическая решётка, образованная интерференцией объектного (1) и опорного пучков. При этом возникает интерференционная структура, которая в случае плоской объектной волны представляет собой ряд эквидистантных прямых полос. Период такой решётки d определяется законом Брэгга и зависит от длины волны записи λ и угла схождения пучков α :

$$2d \sin(\alpha) = \lambda. \quad (5)$$

Их искривление и смещение задаются модуляцией плоского объектного пучка полезным сигналом (изображением). Изображение модулирует объектный пучок по амплитуде (текстуре) и по фазе (глубине рельефа, или топологической карте поверхности). При этом на голограмме меняется частота дифракционных полос, возникает девиация пространственных частот, приводя их к искривлению (рис. 2) и согласно (5) к изменению углов дифракции излучения $\Delta\alpha$, проходящего на этапе восстановления через такую решётку и формирующего 3D голографическое изображение.

Основной период d соответствует α , отвечающему за разделение в пространстве за голограммой нулевого и первого порядков дифракции, и по порядку величины сравним с λ . Несущая пространственная частота, пропорциональная $1/d$, может достигать в видимом диапазоне электромагнитного спектра $1/\lambda \sim 2 \cdot 10^3$ лин/мм, при этом угол дифракции θ достигает десятков градусов. Девиация пространственной частоты (рис. 2, *b*, *c*) много меньше и по порядку величины для амплитудной компоненты сигнала равна фотографическим пространственным частотам, т. е. $d \leq 30$ мкм, а девиация пространственных частот на голограмме составляет $\Delta d/d^2 \sim 30$ лин/мм, что почти на два порядка меньше,

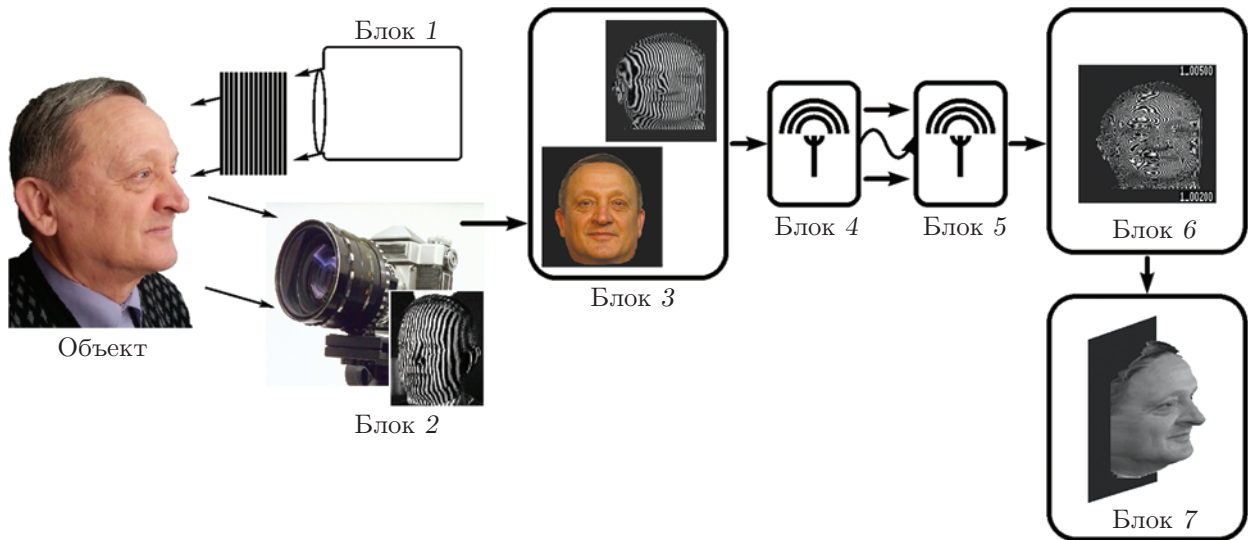


Рис. 3. Регистрация 3D-изображения: блок 1 — регистрация 2D-изображений текстуры поверхности и конфигурации искривлённых интерференционных полос, блок 2 — формирование интерференционных полос, блок 3 — обработка пар 2D-изображений, блок 4 — передача пар 2D-изображений, блок 5 — приём пар 2D-изображений, блок 6 — формирование 3D-изображения по принятым парам 2D-изображений, блок 7 — монитор, воспроизводящий 3D-изображение или его проекции

чем несущая пространственная частота голограммы, как видно на рис. 2, *с*, где отчётливо просматриваются сама несущая и искривления полос, вызванные модуляцией объектного пучка. В рассматриваемом нами примере изображения человеческого лица девиация фазовой компоненты сигнала, эквивалентная частотной модуляции, ещё на порядок меньше (рис. 3).

Заимствовав из радиотехники идею передачи информации на одной боковой полосе, можно не передавать несущую, как это делается в работе [16], а попытаться передать только девиацию пространственных частот, соответствующую 3D голографическому изображению. При этом во время передачи информации о голограмме необходимо передать только спектр пространственных частот объекта голографирования, включая производимую им амплитудную и фазовую модуляции объектной волны (рис. 4).

При создании голограммы с низкой несущей частотой было предложено воспользоваться известной технологией построения 3D-модели объекта с помощью метода структурированного света [5], но разделить процессы регистрации текстуры подстилающей поверхности и низкочастотной голограммы поверхности объекта, чтобы представить текстуру как амплитудную модуляцию голографического сигнала, а информацию о её топографической карте как фазу голограммы, что защищено патентом [17]. На рис. 3 показана принципиальная схема устройства, с помощью которого была произведена отдельная съёмка текстуры поверхности и низкочастотной голограммы поверхности портрета человека. Блок 1 последовательно регистрирует 2D-текстуру поверхности объекта и 2D-картину искривления ранее сформированных и спроецированных на объект блоком 2 интерференционных полос. Картина полос может представлять собой обычную картину интерференции двух скрещённых пучков любой природы, в том числе и когерентное электромагнитное излучение, и простую проекцию в белом свете заранее записанных полос. Блок 3 обрабатывает оба полученных 2D-изображения и передаёт их на блок 4 канала связи. Блок 5

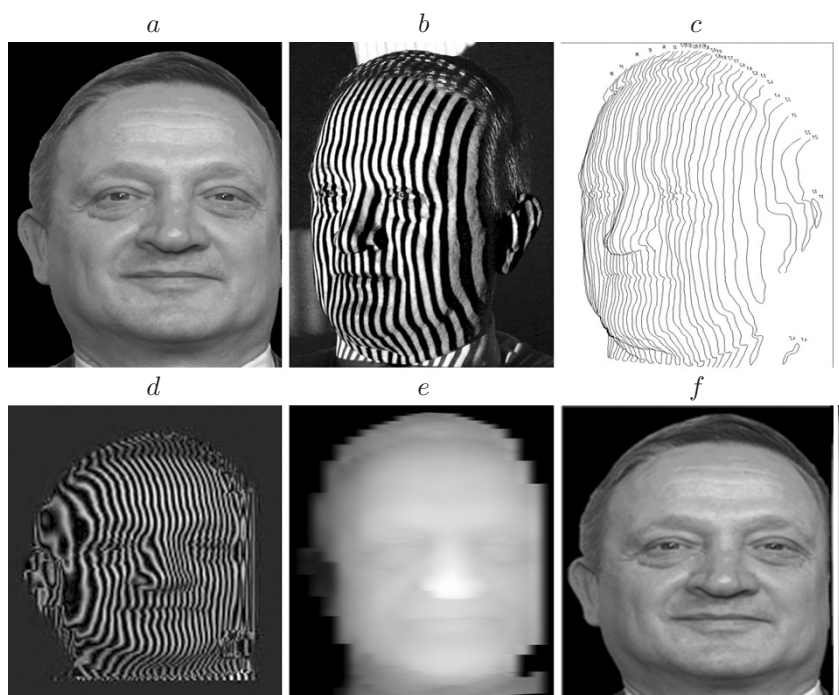


Рис. 4. Этапы формирования 3D-кадра: *a* — амплитуда монохромного 2D-сигнала; *b*, *c* — топография маски — третьего измерения точек сигнала (*a*); *d* — синтезированная голограмма; *e* — 3D-маска объекта; *f* — совмещённый со служебной информацией кадр 2D-сигнала и столбец служебной информации о глубине точек изображения

принимает оба изображения и передаёт их в блок 6, где из двух 2D-изображений формируется одно 3D-изображение, передаваемое на монитор блока 7.

На приёмном конце канала связи на основе 2D-текстуры (рис. 4, *a*) и 2D низкочастотной голограммы объекта (рис. 4, *b*, *c*) создаются синтезированная голограмма (рис. 4, *d*) и по ней компьютерная модель 3D-объекта с заданным разрешением текстуры (рис. 4, *f*) и заданным, но не обязательно таким же разрешением маски (рис. 4, *e*). Такой метод открывает широкие возможности создания голограмм традиционных 3D-образов и комплексированных 3D-изображений, собранных из изображений разных диапазонов длин волн. Видно, что требования по разрешающей способности изображения маски (см. рис. 4, *e*) существенно ниже, чем изображение текстуры (см. рис. 4, *a*). Поэтому полученный файл с информацией о 3D-кадре можно представлять как стандартный телевизионный кадр с 2D-изображением, дополненный в конце каждой строки служебной информацией о карте глубины изображения (см. рис. 4, *f*). Длина добавленной строки на рис. 4, *f* составляла 2 % от длины самой строки и показана для наглядности удлинённой. Стандарты передачи такой информации, которыми определяется квантование, дискретизация и кодирование информации, могут быть любыми на основе широко распространённых сегодня HD, FullHD, 4K и др. Следует лишь отметить, что получаемая структура искривлённых полос на рис. 4, *b*, *d* является голографической структурой, поскольку отражает форму поверхности объекта, аналогично описанного в [18] и [19], и может восстановить форму поверхности как меняющуюся по полю фазовую задержку в (1), вызванную смещением интерференционных полос. Однако существенное отличие полученных полос (см. рис. 4, *b—d*) заключается в том, что в отсутствие необходимости высокого разрешения по глубине (морщинки на лице объекта достаточно хорошо передаёт текстура) эти полосы расположены с низ-

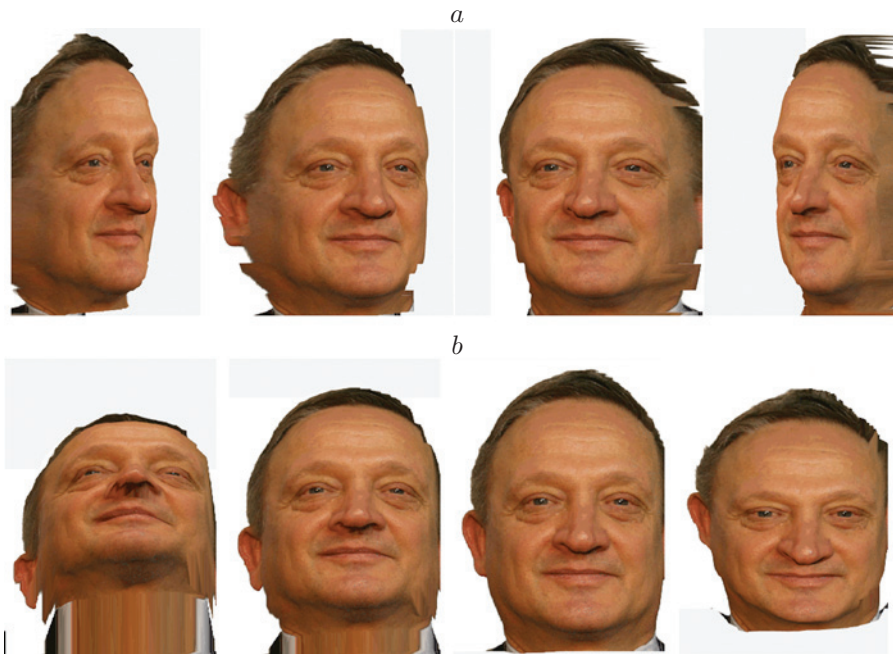


Рис. 5. Проекция 3D-изображения, восстановленного виртуальной голограммой, синтезированной по двум двумерным картинкам (текстуре и топографии поверхности — маски): *a* — иллюстрация наличия горизонтального параллакса, *b* — вертикального

кой пространственной частотой, соответствующей дифракции в нужном направлении (5) электромагнитного излучения, далёкого от видимого света радиодиапазона. Восстановить такую голограмму в видимом диапазоне нельзя, но можно смоделировать её восстановление с использованием преобразования Френеля [20] или трансформировать её в голограмму видимого диапазона простыми линейными преобразованиями, например добавлением серии медианных полос между уже существующими.

Согласно любому из способов цветового кодирования (например, RGB) текстуру можно зарегистрировать и передать тремя кадрами. Совмещая их с маской, можно получить цветной 3D-образ. На рис. 5 представлены четыре проекции такого цветного 3D-объекта. Очевидно, что количество таких проекций практически не ограничено и может достаточно точно передавать трёхмерное изображение. Синтезированное по двум двумерным картинкам это трёхмерное изображение имеет высокое качество (разрешение) использованного фотографического формата, намного превосходящее изображения, созданные комплексированием выделенных на поверхности объекта узлов и рёбер [3], и намного более простое, чем метод «облака точек», или другой метод структурированного света, создающий 3D-массивы каждого кадра.

На рис. 5 видно, что созданная описанным выше образом голограмма имеет не только горизонтальный параллакс, но и вертикальный, что указывает на существенные отличия от стереосъёмки, поскольку все восемь изображений восстановлены с одной 2D виртуальной голограммы, созданной на основе маски и текстуры на рис. 4.

Синтез удалённой от объекта голографической структуры может происходить и в режиме online, создавая эффект присутствия как в устройствах дополненной реальности, так и в устройствах 3D-телевидения.

Особый интерес представляет использование предложенного метода для построения поверхностей, невидимых в световом диапазоне видимого спектра, но наблюдаемых в ИК-

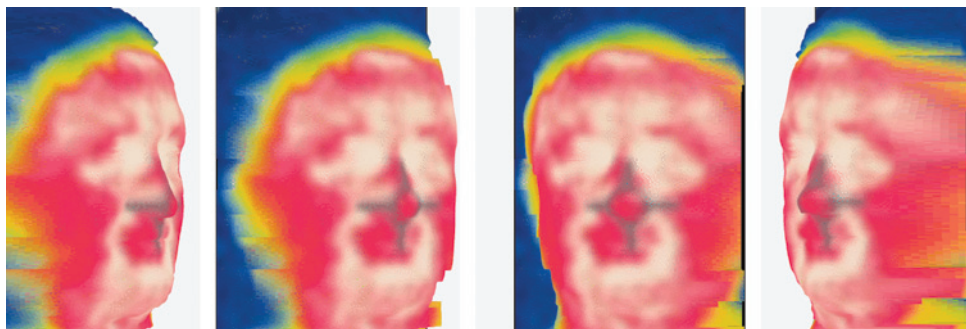


Рис. 6. Четыре проекции 3D ИК-изображения, синтезированного по двум двумерным картинам — картинке ИК-текстуры и ИК-картине топографии поверхности (маски)

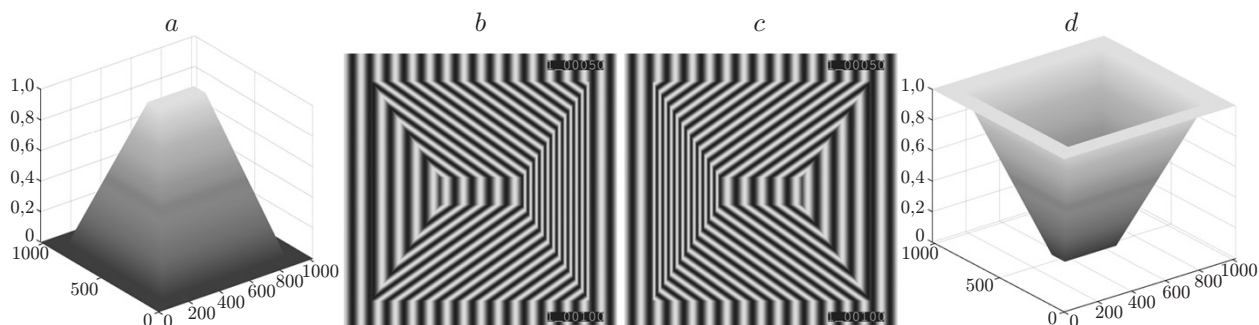


Рис. 7. Инвертирование интерференционных полос: *a* — ортоскопическое изображение пирамиды, *b* — голограмма ортоскопического изображения пирамиды, *c* — голограмма псевдоскопического изображения пирамиды, *d* — псевдоскопическое изображение пирамиды

или даже радиодиапазоне. Примером являются задачи радиовидения [2], тепловизионного видения [21] и видения в терагерцовом диапазоне [16].

На рис. 6 приведены голографические изображения, впервые восстановленные предложенным способом виртуальными голограммами, синтезированными в ИК-диапазоне электромагнитного спектра. При этом возможны различные комбинации области спектра, в которых регистрируется текстура поверхности и голографическая структура поверхности объекта (маски). Например, комбинация, когда текстура регистрируется в видимом диапазоне, а маска создаётся в радиодиапазоне, удобна в задачах навигации при посадке воздушного судна. А текстура в ИК-диапазоне при маске в видимом диапазоне удобна в медицине. Также подобные комбинации возможны для создания систем синтеза ближнего и дальнего ИК-изображений и различных устройств тестирования и распознавания [21]. Главное, что предложенный метод способен простыми 2D-операциями создавать 3D-видеоряд с высокой частотой кадров в реальном времени.

Также представляет интерес легко реализуемый в предложенной технологии алгоритм превращения ортоскопического 3D-изображения в псевдоскопическое с помощью инвертирования структуры интерференционных полос, как это показано на рис. 7.

Преобразование ортоскопического изображения в псевдоскопическое действительно лежит в основе двухступенчатой технологии восстановления действительных ортоскопических изображений [22], находящихся в пространстве между голограммой и наблюдателем и как бы присутствующих среди реальных предметов, и находит всё большее применение в области реализации проектов дополненной реальности.

Заключение. В работе удалось использовать свойства голограмм, отсутствующие в методе облака точек и проекции структурированного света, такие как фиксация информации о $3D$ -объекте на $2D$ -структуре голограммы, вертикальный и горизонтальный параллакс восстановленного $2D$ -голограммой $3D$ -изображения. Возможность вариаций несущей частоты голограммы, обеспечивающей запись голограммы в одном участке электромагнитного спектра, а восстановление в другом, позволила, в частности, существенно снизить избыточность голографического кадра, легко его создавать в реальном времени и с минимальной цифровой обработкой.

Использованный метод создания низкочастотных $2D$ виртуальных голограмм $3D$ -объектов существенно отличается от широко распространённой сегодня технологии формирования сетки $3D$ -поверхности из сопряжённых треугольников, от метода формирования изображений в рамках фрактальных технологий, а также является следующим шагом в развитии технологий «облака точек» и других технологий структурированного света. Показано, что голограмма, полученная простым методом проекции структурированного света прямых полос на $3D$ -поверхность, обладает как горизонтальным, так и вертикальным параллаксом. Присущая голограммам устойчивость к сколам, закрывающим её часть, но оставляющим восстановленное изображение, купирует появление «дыр» в $3D$ -картине восстановленного изображения. В отличие от метода облака точек отметим устойчивость предложенного метода к качеству текстуры, на которое специально обращают внимание разработчики современных $3D$ -сканеров [6], что нам позволило формировать голограммы и $3D$ -изображения кожного покрова живого человека без его предварительной подготовки. В отличие от названных выше технологий предложенный метод прост и за счёт использования голографической технологии устойчив к частичным потерям сигнала при передаче его по каналам связи. Два двумерных массива для чёрно-белых изображений и четыре двумерных массива для цветных (например, RGB) достаточны для полной передачи $3D$ голографического сигнала высокого стандарта качества. Передача массивов таких изображений многократно осуществлялась нами по радиоканалам Wi-Fi в процессе синтеза цифровых голограмм, что оказалось возможным благодаря сравнительно небольшим объёмам Full HD-кадров — 1920×1080 точек по одному байту на каждую. Требуемая пропускная способность канала для передачи Full HD TV без дополнительных методов кодирования составляет $51,8$ Мб/с, а с ними — на порядок меньше. Этого вполне достаточно для передачи $3D$ -видео высокого Full HD-качества в показанном в предлагаемой работе формате передачи двух двумерных кадров, один из которых с Full HD-текстурой объекта голографирования и второй, имеющий разрешение на порядок меньше, чем с Full HD, и представляющий собой низкочастотную голограмму $3D$ -поверхности или кадр «маски» объекта. Вычислительные мощности современных компьютеров (даже бытовых) вполне способны обрабатывать такие потоки данных так, что есть ещё большой резерв их производительности. Это даёт основание рассчитывать на успешный синтез в ближайшем будущем кадров $3D$ -видео по рассмотренному здесь способу в реальном времени, что доказывает возможность осуществления указанным методом $3D$ телевизионного сигнала. Применимость описанного способа ограничивается в настоящее время только недостаточно высоким разрешением существующих управляемых матриц, пригодных для динамического синтеза голограмм в реальном времени на приёмном конце канала связи.

Следует отметить ещё одно преимущество предложенного метода, частично показанное в данной работе. Это его универсальность, возможность как создавать $3D$ -изображения практически во всех областях частот электромагнитного излучения, так и переводить полученные изображения из одного участка спектра в другой простой заменой несущей. Например, можно создавать $3D$ -изображения текстуры в ИК-диапазоне, маску — в радиодиапазоне, а восстановленное изображение — в видимом участке спектра простым изменением несущей, что применимо в задачах комплексирования многос-

пектральных изображений. Интересно, что низкие требования разрешающей способности при создании топографической поверхности объекта (маски) позволяют создавать её излучением другой природы, например ультразвуковым зондированием объекта.

Предложенный метод дистанционного формирования голографической записи 3D-изображения может быть применён в устройствах дополненной реальности при создании голографических фотоаппаратов и 3D-видеокамер, 3D-проекторов и микроскопов, устройств с синтезированной апертурой.

В целом предложенный метод формирования низкочастотных виртуальных 2D-голограмм видится более перспективным для решения задач 3D TV и 3D дополненной реальности, чем активно развивающийся сегодня метод многокамерной съёмки и формирования виртуального 3D-образа, адекватного реальному 3D-объекту, или чем метод облака точек и построения сети треугольников, широко используемый сегодня в геодезии и метрологии, в котором даже при задействовании существенно бóльших компьютерных ресурсов при попытках создать 3D-видео всё равно остаётся 3D-изображение куклы, а не живого человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Milgram P., Kishino F.** Taxonomy of mixed reality visual displays // IEICE Trans. Inform. and Syst. 1994. **E77-D**, N 12. P. 1321–1329.
2. **Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю.** Радиовидение. Радиолокационные системы зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 366 с.
3. **Pat. 20060187297A1 US.** Holographic 3-d television /L. Onural. Publ. 24.08.2006.
4. **Pat. 4941193A US.** Methods and apparatus for image compression by iterated function system /M. F. Barnsley, A. D. Sloan. Publ. 10.07.1990.
5. **Geng J.** Structured-light 3D surface imaging: A tutorial // Adv. Opt. Photon. 2011. **3**, Iss. 2. P. 128–160. DOI: 10.1364/AOP.3.000128.
6. **Обзор и тестирование 3D-сканера HP 3D Structured Light Scanner Pro S3.** URL: <https://habr.com/ru/post/458384/> (дата обращения: 30.06.2020).
7. **Шойдин С. А.** Моделирование дифракции на объёмных телах в среде Матлаб // Сб. матер. VIII Междунар. конф. «ГЕО-Сибирь-2012». 2012. Т. 4, Ч. 1. С. 144–148.
8. **Рапопорт Б. И.** Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой // Техника кино и телевидения. 1970. № 6. С. 51–53.
9. **Богданова Т. В., Сафронов Г. С., Титарь В. П.** Проблемы создания телевизионных голографических систем // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. «Развитие и совершенствование технических средств телевизионного вещания». М.: Радио и связь, 1988. С. 15–16.
10. **Lokberg O. J.** The present and future importance of ESPI // Proc. SPIE. 1987. **746**. P. 86–97.
11. **Денисюк Ю. Н.** Достаточны ли известные фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? // ЖТФ. 1991. **61**, № 8. С. 149–161.
12. **Денисюк Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // ДАН СССР. 1962. **144**, № 6. С. 1275–1278.
13. **Hill B.** Some aspects of a large capacity holographic memory // Appl. Opt. 1972. **11**, N 1. P. 182–191. DOI: 10.1364/AO.11.000182.
14. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
15. **Лебедев В. М.** Уголовно-процессуальное право. М.: Юрайт, 2014. 1060 с.

16. Карнаухов В. Н., Мерзляков И. С., Ярославский Л. П. Гибридные оптико-цифровые голограммы: Сб. мат. Междунар. школы по когерентной оптике и голографии. Прага, 1980. С. 124–125.
17. Пат. 2707582 РФ. Способ дистанционного формирования голографической записи /С. А. Шойдин. Приоритет 03.07.2018. Опубл. 28.11.2019, Бюл. № 34.
18. Голубев И. В., Сысоев Е. В., Чугуй Ю. В. Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 25–29.
19. Корольков В. П., Остапенко С. В. Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа // Оптический журнал. 2009. 76, № 7. С. 34–41.
20. Shoydin S. A., Puzoev A. L. Use of spatial symmetries for problems of modeling of image transfer processes // Proc. SPIE. 2019. 11208, 112081A. DOI: 10.1117/12.2539833.
21. Верхогляд А. Г., Гибин И. С., Елесин А. Г. и др. Автоматизированная система синтеза ИК-изображений для тестирования характеристик матричных фотоприёмных устройств // Успехи прикладной физики. 2018. 6, № 3. С. 260–268.
22. Жук Д. И., Денисюк И. Ю., Гутнер И. Е. Определение оптической оси удалённого объекта с помощью оптической системы согласования на основе голографического маркера // Оптика и спектроскопия. 2015. 119, № 1. С. 160–163.

Поступила в редакцию 20.01.2020

После доработки 03.07.2020

Принята к публикации 31.08.2020
