

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА,
доктора физико-математических наук,
старшего научного сотрудника Канева Федора Юрьевича на диссертационную
работу Шойдина Сергея Александровича
«Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого
воспроизведения динамических объёмных изображений»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.6. Оптика

Целью работы Шойдина С. А. является определение физических закономерностей, ограничивающих плотность записи информации в голограммах и передачу трехмерных данных по каналам связи. Соискателем предложены методы преобразования динамического оптического изображения, обеспечивающие его передачу по радиоканалу, т.е. рассмотрена возможность преодоления принципиального противоречия между большими объемами информации, содержащейся в голограммах и ограниченностью полосы пропускания радиодиапазона. Как показывает автор на основе анализа существующих литературных источников и своих собственных оценок, прямая передача только одного голографического видео перекроет весь используемый в настоящее время радиодиапазон, поэтому актуальной является задача сжатия голографической информации. Однако, как видно из обзора существующей литературы, в рамках традиционного энтропийного кодирования, такое преобразование невозможно, поэтому автор ставит задачу нахождения альтернативных путей сжатия голографической информации, основанных на анализе физической структуры голограмм и, как показывают представленные результаты, решает указанную проблему.

Разработке принципов передачи голографической информации по радиоканалу является одной из **актуальных проблем современной оптики**. Такие исследования могут быть основой новых решений в дистанционной хирургии, в задачахстыковки объектов в космосе (астEROиды и нежелательные космические объекты) и под водой (поисковые работы и др.), а также при удаленном воспроизведении трехмерных динамических объектов.

Дополнительным аргументом актуальности поставленной в диссертации Шойдина С. А. задачи может служить стремительное закрытие и архивирование результатов, полученных в указанной области известными зарубежными исследователями.

Диссертационная работа Шойдина С.А. состоит из Введения, четырех глав и Заключения.

Во Введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации соискатель проводит анализ открытых литературных источников, и отмечает, что сайты Интернета, содержащие информацию по данной тематике, быстро закрывается в настоящее время. Автор показывает, что методы кодирования 3D видеосигнала обладают рядом недостатков, к которым, кроме известных вычислительных сложностей работы с большими информационными потоками прибавляется еще и ряд принципиальных ограничений. Например, до недавнего времени считалось, что наиболее перспективными являлось представление 3D видео с помощью систем светового поля, однако присущее ему противоречие между аккомодацией и конвергенцией, известное как А/С-противоречие, подтверждает выводы многих исследователей, что следует вернуться к голографическому представлению 3D видеосигнала, как самому совершененному. Действительно, только голографическое изображение обладает всеми свойствами, которые используются человеком для

восприятия объёма, основные из которых аккомодация, конвергенция, окклюзия, параллакс движения и неламбертовское затенение. Однако до сих пор, несмотря на более чем двадцатилетние усилия разработчиков, сжать голографическую информацию до приемлемых для передачи по радиоканалам размеров, не удавалось. По-видимому, утверждает автор, это связано с ошибочным подходом к проблеме сжатия. Традиционное энтропийное сжатие, хорошо проявившее себя в одномерном радиосигнале уже испытывает проблемы при сжатии двумерных радиосигналов. Это видно из того, что в двумерном случае нет одного метода сжатия, а применяются несколько методов, в том числе и спектральное косинус кодирование, разные для разных изображений и даже разные для разных участков одного изображения. Примером такого наиболее удачного кодирования являются коды JPEG. Однако даже группа Pleno, являющаяся правообладателем JPEG, признаёт неудачи применения таких методов для кодирования трёхмерной голографической информации. Максимальная степень сжатия голографической информации энтропийными методами, как показано ссылками на обзорные работы разных авторов в первой главе диссертации, не превышает двух порядков, тогда как для решения задач голографического TV и 3D дополненной реальности необходимо сжатие на пять-шесть порядков.

Поэтому, поставленные в диссертации Шойдина С. А. задачи по исследованию физических свойств голограмм для определения методов преобразования и сжатия передаваемой 3D голографической информации с учётом проблем ограничения пропускной способности традиционных каналов связи, являются актуальными и обладают новизной. Критерием результативности в работе автор выбирает формирование на приёмном конце канала связи динамических 3D голографических изображений с TV частотой кадровой развёртки, высоким пространственным разрешением, сравнимым с пространственным разрешением современных телевизионных стандартов, как Full HD и 4K, а также непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом. Полученные далее в диссертационной работе Шойдина С. А. результаты убедительно доказывают эту возможность. Более того, серия экспериментов по проверке скорости передачи такой голографической информации и синтез на приёмном конце канала связи не только компьютерных голограмм, но и запись по этим компьютерным голограммам аналоговых, материальных голограмм, восстанавливающих 3D кадры с непрерывным параллаксом, убедительно доказывает правильность выбранного автором пути решения поставленной задачи. Профессиональная эрудиция соискателя, отражённая в первой главе диссертации, позволила серьёзно обосновать актуальность темы и основные направления исследования.

Во второй главе соискатель, опираясь на известные проблемы, энтропийного сжатия, уходит от классического пути, обращая особое внимание на физическую структуру голографических дифракционных решёток. Такой подход оказывается результативным и помогает определить, что голограмма содержит не только структуры, несущие информацию об объекте, но и служебную информацию, обеспечивающую разделение порядков дифракции. Однако прямая пространственная фильтрация этих информационных гармоник, как показывает автор, не столь результативна, как предлагаемый им метод передачи информации о 3D объекте двумя основными модальностями – текстурой поверхности и картой высот. Действительно, численными экспериментами автор во второй главе показывает, что в этом случае выигрыш в объеме передаваемой информации для достижения такого же пространственного разрешения по сравнению со спектральной фильтрацией составляет почти порядок. Это очень убедительный результат. Однако автор на этом не останавливается. Далее, в четвёртой главе он ещё усовершенствует этот метод, заменяя традиционный синтез компьютерных голограмм на обработанные оригинальным и простым способом дифракционные

структуры, образованные при латеральном падении на голографируемый объект пакета параллельных полос. Этот результат тоже приближает автора к поставленной цели – сжатию голографической информации для передачи по радиоканалу. Найденный попутно синергетический эффект при изучении двусторонних ограничений при записи компьютерных голограмм (одно из критерия Найквиста, а другое из условия разделения порядков дифракции в голографии) давшее ответ на вопрос о необходимом количестве дискрет (пикселей) в голограмме, свидетельствует о глубоком проникновении автора в исследуемую проблему.

К другим ограничениям следует отнести описанный автором алиасинг голограмм, причём с доказательством его неотвратимого появления для голограмм объёмных тел. Действительно, легко понять, что с увеличением частоты интерференционных полос на дискретной структуре компьютерной голограммы или голограмме, сформированной на фотоприёмной матрице, всегда наступит момент, когда будет нарушаться критерий Найквиста. В то же время при голографировании объёмных тел всегда найдётся участок, поверхности который будет нормален к поверхности голограммы. Это означает бесконечную частоту интерференционных полос, регистрирующих этот участок, что и приводит к нарушению критерия Найквиста. Практическая направленность изучаемых автором проблем помогла не пройти мимо и этой интересной закономерности, которая справедливо включена им в защищаемые положения, поскольку о неизбежности проявления такого простого, но важного эффекта неправильной дискретизации аналогового сигнала в голографии, насколько мне известно, ранее никто не сообщал.

В третьей главе соискатель рассматривает три основных физических эффекта, ограничивающих дифракционную эффективность голограмм и принципиально не устранимых в полной мере, но поддающихся частичному ослаблению их влияния. Необходимость их рассмотрения автор справедливо обосновывает случаем из ранних работ Шеннона, где показано, что чрезмерное устремление к поднятию отношения сигнал/шум может привести к резкому падению информационной ёмкости сигнала. Это Шенон иллюстрирует на примере импульсно-кодовой модуляции, которая по своей сути очень похожа на современные попытки бинаризации голограмм. Особого внимания из упомянутых трёх эффектов заслуживает эффект формфактора, поскольку он, хотя и наблюдался отдельными исследователями в их экспериментах, но так и не был обнаружен. Дело в том, что он трудно обнаружим, поскольку проявляется только в случае одновременного наличия двух нелинейностей - нелинейной зависимости дифракционной эффективности от экспозиции и нелинейного распределения локальных значений экспозиции по полю голограмм. Ввиду его универсальности автор дал ему специальное название – формфактор. Действительно, этот эффект проявляется и в случае голограмм с дифракцией Рамана-Ната и голограмм с дифракцией Брэгга и для гауссовых пучков и для спекл-пучков, которые формируются сложными изображениями, как художественные голограммы и др. Этот эффект похож по своей сути как на известные эффекты формфактора Земли в геодезии, так и на известные поправки при силовом взаимодействии элементарных частиц в сложных полях. В этом смысле такая энергетическая характеристика голограмм, как дифракционная эффективность, похожа на силовые гравитационные характеристики и силу взаимодействия сложных электромагнитных, сильных и слабых полей и, безусловно, может аналогичным образом характеризоваться фактором формы или формфактором.

Следует отметить, что найденный автором эффект формфактора в голографии не только приводит к проблемам ограничения максимально достижимой дифракционной эффективности и энтропии, но и помогает измерять кинетику дифракционной эффективности оригинальным дифракционным способом, причём с точностью, сравнимой с классическими интерференционными методами, но без соответствующего

им дополнительного оборудования и прямо в процессе записи голограмм. Это оказалось очень полезным при разработке и исследовании новых голографических материалов (Патент RU2734093C1).

Также, обращает на себя внимание и впервые экспериментально измеренный автором для голографических материалов с безинерциальным фотооткликом, формирующимся непосредственно в процессе экспозиции и без последующего проявления (на материале Реоксан), эффект резонанса спекл-поля, который был использован Б. Я Зельдовичем для ещё одного подтверждения его модовой теории голограмм. Зря Шайдин С. А. не стал включать этот результат в защищаемые положения. Результат, безусловно, значимый, хоть и открыт автором сравнительно давно. Хорошо, что автор, хотя бы кратко, включил его в рассмотрение, как второй из трёх эффектов, ограничивающих дифракционную эффективность и энтропию голограмм. Третий – алиасинг голограмм объёмных тел был рассмотрен соискателем во второй главе.

В четвёртой главе автор при работе над синтезом голограммы на приёмном конце канала связи обнаруживает, что используемый для создания карты глубин паттерн структурированных полос обладает свойством восстановления 3D изображения голографируемого объекта так же, как и создаваемая на его основе голограмма (§4.1). Для случая, аналогичного голограммам сфокусированных изображений автор рассматривает новый метод формирования голографического 3D изображения путём дифракции опорной восстанавливающей волны на дифракционной структуре, образованной фотофиксацией паттерна структурированного света из параллельных полос, латерально освещдающих объект голографирования. Там же показано численными экспериментами, что дифракция на такой структуре или её модификации с изменением пространственной частоты полос простым медианным мультиплексированием, при соблюдении условий Брэгга, приводит к появлению нескольких порядков дифракции, по крайней мере, один из которых представляет собой восстановленное 3D изображение объекта. Полученный результат позволяет ещё увеличить скорость передачи голографической информации без потерь и восстанавливать 3D видеоряд, каждый кадр которого имеет как горизонтальный, так и вертикальный непрерывный параллакс. Предложенный автором подход, основанный на глубоком анализе физической структуры голограммы, может и здесь дать успешный результат.

Также, в четвёртой главе показаны результаты серии экспериментов по передаче голографического видеоряда, убедительно доказывающие возможность осуществления голографической телесвязи с высоким пространственным разрешением изображения, имеющего также и горизонтальный и вертикальный параллакс. Для его наблюдения не требуется никаких дополнительных носимых оператором нашлемных устройств и даже специальных очков, поскольку на выходе канала связи формируется полноценное голографическое изображение.

По полученным на приёмном конце канала связи компьютерным голограммам в четвёртой главе показаны результаты проведённых автором экспериментов по записи, на основе синтезированных на приёмном конце канала связи компьютерных голограмм, материальных аналоговых. Это доказывает возможность создания систем голографического TV при разработке соответствующих голографических мониторов. Параллакс восстановленных 3D изображений живого объекта, записанными в экспериментах материальными аналоговыми голограммами был экспериментально измерен и результаты экспериментов были опубликованы в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах Q2.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность полученных автором результатов определяется корректностью выбранной для решения поставленной задачи моделью скалярного приближения теории дифракции. Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается тем, что для получения результатов и их пояснения эффективно использованы аналитические оценки и были убедительно представлены результаты прямых физических экспериментов.

Отвечая на вопрос **о новизне исследования** соискателя, особенно хочется подчеркнуть нетривиальность его взглядов, которые воплощены в глубоко обоснованных выводах и оригинальных результатах, полученных на, казалось бы, вполне изученном поле скалярного приближения теории дифракции. И открытый автором эффект формфактора, и найденный им метод формирования дифракционной структуры на основе освещения объекта паттернами структурированного света, и даже синергетический эффект при изучении двусторонних ограничений при записи компьютерных голограмм (одно из критерия Найквиста, а другое из условия разделения порядков дифракции в голографии), давшее ответ на вопрос о необходимом количестве дискрет (пикселей) в голограмме, свидетельствуют о глубоком проникновении автора в изучаемый материал. Получив условие на количество пикселей с учётом критерия Найквиста (формула 2.35) автор обращает внимание на явную схожесть полученного им результата на полученный двести лет назад результат по числу открытых зон Френеля. Но ведь Френель не мог и знать о критерии Найквиста. Безусловно, полученное в работе Шойдина С. А. соотношение может иметь большое значение в дальнейшем понимании особенностей голографической структуры.

Автором получены **новые результаты о физической и информационной структуре** голограмм и на этой основе предложены оригинальные и эффективные методы сжатия голографической информации. Эти методы обоснованы теоретически и подтверждены серией численных и прямых физических экспериментов, что доказывает верность выбранного автором пути решения поставленной задачи и корректность полученных результатов. Проходя этот путь, автор внимательно и глубоко вникал в физическую сущность изучаемых процессов, что дало не только прямой результат решения поставленной задачи, но и оказалось полезным в близких областях голографических исследований. Проведённы автором исследования по изучению методов преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений соответствует требованиям п.1 направления исследований по паспорту научной специальности 1.3.6 «Оптика» (физико-математические науки). В работе численными и физическими экспериментами была показана возможность использования структурированного света для формирования условий сжатия голографической информации. Также доказана аналогичность одной из его структур самой голограмме сфокусированных изображений, что соответствует требованиям пп.2, 3 направления исследований по паспорту научной специальности 1.3.6 «Оптика» (ф.-м.н.). Предложен и защищён патентом новый принцип формирования 3D голографического, динамически меняющегося на приёмном конце канала связи изображения, обладающего непрерывным параллаксом и высоким пространственным разрешением, который может быть положен в основу построения новых оптических систем и инструментов, что соответствует требованиям пп. 3, 4 направления исследований по паспорту научной специальности 1.3.6 «Оптика» (ф.-м.н.).

Всё это в совокупности **можно квалифицировать как новое научное достижение**, показывающее пути возможной реализации проектов по созданию голографического телевидения и 3D дополненной реальности.

Практическая значимость полученных автором результатов очевидна и не подлежит сомнениям, поскольку подтверждена и патентами и актами о внедрении полученных результатов и передачей по стандартному радиоканалу WiFi первого голограммического видеоряда с TV частотой кадровой развёртки, состоящего из 291 кадра динамически движущегося изображения человека, каждый кадр которого на приёмном конце канала связи восстанавливается компьютерной голограммой, имеет высокое пространственное разрешение, на уровне современных стандартов TV высокой чёткости, и обладает горизонтальным и вертикальным параллаксом, наблюдаемым прямо, без дополнительных, носимых оператором, устройств и очков. Большое практическое значение имеет полученный автором результат по замене классической голограммы паттерном структурированного света из параллельных полос, латерально освещивающих объект голографирования. Это значительно снижает вычислительную нагрузку и облегчает рендеринг голограммического видеоряда на приёмном конце канала связи.

В качестве замечаний можно отметить

1. Ряд чисто технических недостатков в представлении текста. Например, в формулах (1.2) и (1.3) не введено пояснение для параметра « h », что значительно усложняет восприятие соответствующего раздела. На странице 29 используется выражение, «... в пучках, ограниченных функцией $rect \dots$ », при этом не приводится пояснений, что означает данная функция. Перевод английского слова, конечно, известен, но какие математические операции выполняются при использовании функции, можно только догадываться.

Список замечаний не исчерпывается указанными здесь примерами, но я считаю, что его продолжение не требуется, т.к. подобные недостатки могут быть найдены в любом тексте.

2. Кроме чисто технических замечаний необходимо отметить и принципиальные вопросы к представлению материала. В частности, при используемых Автором формулировках непонятным является необходимость отказа от развёртки фазы путём сжатия цифровой модели объекта до глубины $\lambda/2$ и представления голограммы 3D объекта в формате с плавающей запятой, тогда как известны другие методы развёртки.

Заключение

Несмотря на приведённые выше отдельные замечания, диссертационную работу Шойдина Сергея Александровича можно считать завершённым научным исследованием с отчётливо сформулированными результатами и защищаемыми положениями и результатами, имеющими научное и практическое значение. Предложенные соискателем подходы, методы и выводы прошли глубокую экспертизу при патентовании, что также подтверждает их актуальность и научную новизну.

Не вызывают возражений полученные автором результаты по возможности замены компьютерной голограммы сфокусированных изображений дифракционной структурой, созданной на основе паттерна параллельных полос, латерально освещивающих 3D голографируемый объект, хотя на пути материализации таких структур и могут возникать различные технические трудности. Но последнее скорее относится к проблеме следующего этапа – разработке голограммического динамического дисплея.

Следует поддержать интересное направление исследований паттернов структурированного света в голографии, поскольку открытый соискателем эффект формирования ими 3D восстановленных изображений безусловно является важным,

нужным с практической точки зрения и новым в понимании того, что из себя представляет голограмма.

Представленная диссертационная работа Шойдина С. А. «Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений» отвечает критериям, установленным в п.9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842. Считаю, что за решение ряда актуальных научных проблем, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, следует присвоить Шойдину Сергею Александровичу учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6 . Оптика

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Канев Федор Юрьевич

Дата

(адрес: 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН. Лаборатория когерентной и адаптивной оптики

Телефон: +7-952-897-01-48,

E-mail: mna@iao.ru

Подпись Канева Ф.Ю. заверяю:

Ученый секретарь

Института оптики атмосферы

им. В.Е. Зуева СО РАН,

к.ф.-м.н.



О.В. Тихомирова