

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ZEMAX И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В. Г. Каменев, Н. А. Каменева

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В докладе описывается система для регистрации цифровых голограмм, основанная на использовании телецентрической оптики. Предложена оригинальная схема, основанная на использовании двух телецентрических подсистем. Приводятся результаты исследования характеристик оптической системы с телецентрическим ходом лучей, предназначенной для регистрации цифровых голограмм. Результаты моделирования в среде проектирования Zemax предложенной системы и ее экспериментальная отработка подтверждают требуемые характеристики.

Введение

В научной среде активно изучается поведение твердых тел при ударно-волновом нагружении. Однако под воздействием мощных ударных волн в материале развиваются гидродинамические неустойчивости, и происходит дробление материала с образованием дисперсной фазы. Такой процесс называется эффектом пыления. Скорость движения частиц дисперсной фазы превышает скорость движения свободной поверхности, а плотность частиц может достигать величины, достаточной для полного экранирования свободной поверхности от зондирующего оптического излучения. Таким образом, данный эффект существенно ограничивает возможности исследования ударно-волнового нагружения вещества, а в ряде случаев приводит к повреждению регистрирующей аппаратуры. Для поиска возможностей нейтрализации негативных последствий пыления необходимо детальное понимание физических механизмов, стоящих за этим явлением. Для достижения этой цели необходимым условием является наличие высокоточных методов и аппаратуры, позволяющих регистрировать параметры дисперсной фазы во взрывных экспериментах.

Одним из методов регистрации пыления является цифровая динамическая голография. В данном методе исследуемый объект подсвечивается коротким лазерным импульсом (менее 10 нс), и с помощью цифровой матрицы регистрируются амплитуда и фаза рассеянного излучения в виде интерференционной картины. Цифровая обработка регистрируемого изображения с помощью вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа позволяет получить информацию о трехмерном расположении микроскопических объектов в пределах зондированного объема.

Поскольку данные явления регистрируются во взрывных опытах, существует необходимость отделения и удаления зондируемого объема от регистрирующей аппаратуры. Голографическая картина переносится на цифровую матрицу с помощью оптики. При этом качество и информативность зарегистрированной голограммы напрямую зависит от качества оптической системы, осуществляющей данный перенос.

Требования к голографической системе регистрации и схема макета

При регистрации голограмм быстропотекающих процессов необходимо осуществлять оптический перенос голограммы на удаленный регистратор, защищенный от взрывного воздействия. Оптическая система должна обеспечивать перенос голограммы без искажения пропорций и с одинаковым оптическим увеличением в пределах глубины регистрируемой области. Данный эффект обеспечивается в телецентрических системах, где главные лучи идут параллельно оптической оси, а искажения, связанные с перспективой, отсутствуют. Следовательно, первым требованием при разработке голографической установки является обеспечение телецентрического эффекта при переносе голограммы.

При любых значениях фокусного расстояния изображения объектов, находящихся на различных расстояниях от линзы, будут строиться с разными увеличениями (эффект перспективы). Следовательно, одиночная линза обеспечить телецентрический эффект не может. Поэтому телецентрические системы содержат два компонента: телепозитив (фокусирующий компонент, формирующий изображение) и теленегатив (компонент, компенсирующий перспективу). Два данных компонента располагаются так, чтобы задний фокус телепозитива был совмещен с передним фокусом теленегатива.

С помощью основных формул геометрической оптики можно получить следующее соотношение:

$$\Gamma = \frac{F_2}{F_1}, \quad (1)$$

где Γ – линейное увеличение; F_1 – фокусное расстояние одного компонента, F_2 – фокусное расстояние второго компонента.

Таким образом, увеличение телецентрической системы не зависит от расстояния до объекта, а зависит только от отношения фокусов двух ее компонентов. Следовательно, для обеспечения необходимого оптического увеличения нужно подбирать компоненты с соответствующим отношением фокусов.

Восстановление голограммы производится с помощью математической обработки зарегистрированной интерференционной картины. Моделируя интерференцию опорной волны на голограмме, можно восстановить исходное изображение. Таким образом, восстанавливается трехмерная сцена того, как эти частицы располагались во время их съемки. Качество восстановления изображения зависит от качества регистрации голограммы. Ограничение разрешения оптической системы приводит к тому, что низкоконтрастная часть интерференционных колец может быть не зарегистрирована, что отрицательно скажется на контрасте восстановленного изображения. Отсюда вытекает второе требование к разрабатываемой установке – обеспечение высокого разрешения и учет его влияния на регистрируемые голограммы.

Разрешение голографических фотопластинок составляет более 1,5 тысячи штр/мм, что соответствует разрешению объектов до 330 нм. Для регистрации таких объектов на чувствительную ПЗС-матрицу с размером пикселей 6 мкм необходимо обеспечить оптическое увеличение примерно в 10–20 раз.

Третье важное требование вытекает из необходимости переноса голограммы из области взрывного воздействия. Использование мощных зарядов, необходимых для полноценных исследований экстремальных состояний вещества, требует наличия в системе уничтожаемого узла, располагаемого в пределах взрывозащитной камеры, и сохраняемого узла, расположенного за защитным бронестеклом. Поэтому необходимо обеспечить перенос голограммы при расстоянии между уничтожаемой и сохраняемой частью системы от 2,5 до 5–6 метров.

Вариант макета системы регистрации цифровых голограмм (рис. 1) состоит из двух телецентрических подсистем, одна из которых состоит из относительно недорогих микрообъектива и телеобъектива,

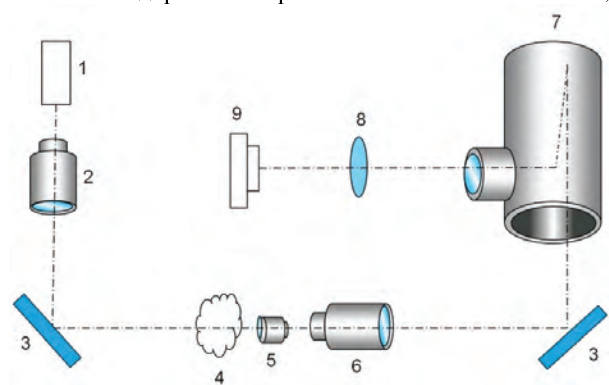


Рис. 1. Устройство регистрации цифровых голограмм (макет): 1 – лазер, 2 – телескоп, 3 – зеркало, 4 – объект, 5 – микрообъектив, 6 – телеобъектив, 7 – длиннофокусный телеобъектив, 8 – корректирующая линза, 9 – цифровая матрица

расположенных вблизи исследуемого объекта. Она формирует промежуточное изображение, увеличенное примерно в 20 раз. Вторая телецентрическая подсистема состоит из длиннофокусного объектива и корректирующей линзы. Она переносит удаленную голограмму в область регистрации в масштабе 1:2.

Моделирование оптического тракта предлагаемой системы в среде проектирования Zemax

Для анализа телецентрического эффекта в среде проектирования Zemax была создана сборка точечных источников света, представляющая собой кубическую решетку. Шаг решетки составляет 100 мкм, а сборка в целом представляет собой куб, содержащий $3 \times 3 \times 3$ источника.

Было решено использовать в качестве моделей объективов линзы с эквивалентным фокусным расстоянием. В процессе проектирования было обнаружено, что сферические aberrации данных линз создают заметные искажения пучков. Для уменьшения их влияния на модель в качестве линз были использованы дуплеты из стекол BK7 и SF3 с компенсацией сферической aberrации. Поскольку в реальной схеме используется монохроматическое лазерное излучение, то влияние хроматических aberrаций в рамках данной модели не рассматривалось.

Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем – подсистемы увеличения и подсистемы переноса. В подсистеме увеличения телепозитив и теленегатив моделировались с помощью линзовых дуплетов. Телепозитив представляет собой склейку из двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 20 мм и диаметром апертуры 20 мм из стекла BK7 и вогнуто-выпуклой линзы с радиусом вогнутой поверхности 20 мм, радиусом выпуклой поверхности 40 мм и сделанной из стекла SF3. Теленегатив – склейка из двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 400 мм и диаметром апертуры 20 мм из стекла BK7 и вогнуто-выпуклой линзы с радиусом вогнутой поверхности 400 мм, радиусом выпуклой поверхности 860 мм из стекла SF3.

Промежуточное изображение формировалось в интервале расстояний 190–268 мм от теленегатива системы увеличения. По сравнению с исходным источником света происходило сильное растяжение изображения вдоль оптической оси. По сравнению с размерами в плоскостях, ортогональных оптической оси, происходило искажение пропорции в 39 раз. Данный эффект достаточно характерен для телецентрических систем. В частности, о наличии сильного растягивания вдоль оптической оси голограмм процессов пыления сообщает группа Соренсона в работе [1]. Также следует отметить, что порядок расположения слоев в промежуточном изображении оказывается «вывернутым наизнанку» – плоскости, находящиеся ближе к системе увеличения, переносятся дальше, и наоборот.

Телепозитив в подсистеме переноса представляет собой телескоп-рефлектор со снятым окуляром и с фокусом вогнутого зеркала 1200 мм и апертурой 250 мм. Поскольку излучение в данный телескоп вводилось со смещением от оси вогнутого зеркала (прямо на оси расположено поворотное зеркало, выводящее излучение из трубы телескопа), то данная конструкция не заменялась эквивалентной линзой, а моделировалась целиком. Теленегатив подсистемы переноса моделировался с помощью тонкой длиннофокусной двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 620 мм и расположенной так, чтобы ее оптическая ось с учетом отражения на поверхностях двух зеркал совпала с осью телепозитива. При этом расположении аберрации сферического зеркала и линзы частично компенсируют друг друга.

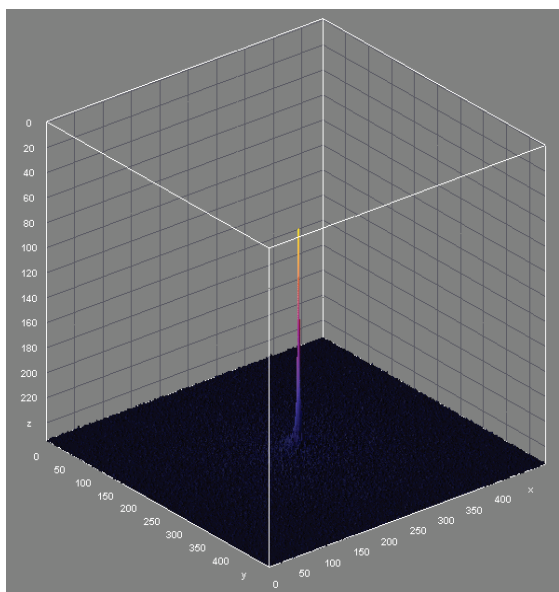
Конечное изображение формировалось на расстоянии 137,75–158,75 мм от теленегатива системы переноса. По сравнению с промежуточным изображением оно было сжато в 4 раза вдоль оптической оси. Таким образом, эффект растяжения вдоль оптической оси частично компенсировался.

Для промежуточного и конечного изображения была также рассчитана функция рассеяния точки (ФРТ). На рис. 2а приведена ФРТ для промежуточного изображения. Ширина на полувысоте для полученного пика составляет около 300 нм – величину, меньшей длины волны излучения (532 нм). Следовательно, увеличивающая система в данной модели является дифракционно ограниченной. На рис. 2б показана ФРТ для конечного изображения. В дан-

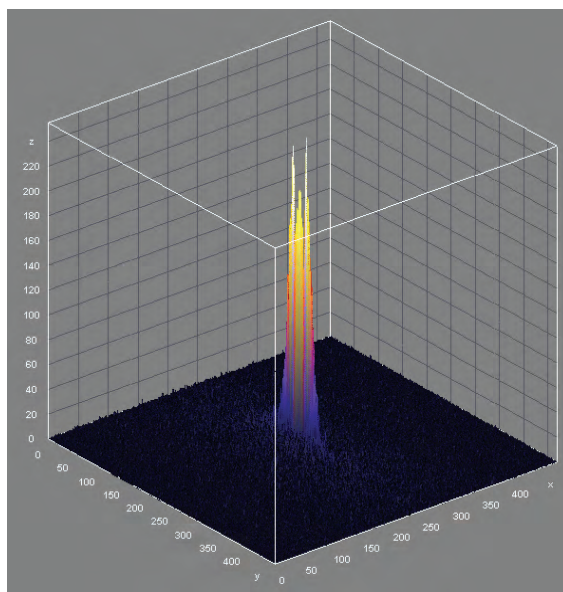
ном случае наблюдается астигматизм, приводящий к растягиванию пятна рассеяния в вертикальном направлении. При этом ширина на полувысоте в горизонтальном направлении – 300 нм, и здесь разрешение ограничивается дифракцией. В вертикальном направлении ширина на полувысоте составляет около 2 мкм. Наиболее вероятная причина астигматизма – влияние вогнутого сферического зеркала, на которое лучи падают не по центру, а параллельно оптической оси со смещением на расстоянии порядка половины радиуса апертуры.

Область источника излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора размером 4×4 мм и разрешением 500×500 пикселей. Были зафиксированы координаты вдоль оптической оси, при которых происходила фокусировка изображений точечных источников. На рис. 3 приведены полученные изображения в одном масштабе. Можно отметить, что на данных изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения. Изображения переносятся линейно и без видимых искажений.

На рис. 4 координаты точек исходного объекта (рис. 4а), промежуточного (рис. 4б) и окончательного (рис. 4в) изображений приведены в трехмерном координатном объеме. Наглядно видно, что обеспечивается телецентрический эффект, а слои источников, расположенные на различном расстоянии, переносятся с одинаковым увеличением.



а



б

Рис. 2. ФРТ (цена деления по x и y – 0,02 мкм, z – усл. ед.): а – для промежуточного изображения, б – для конечного изображения

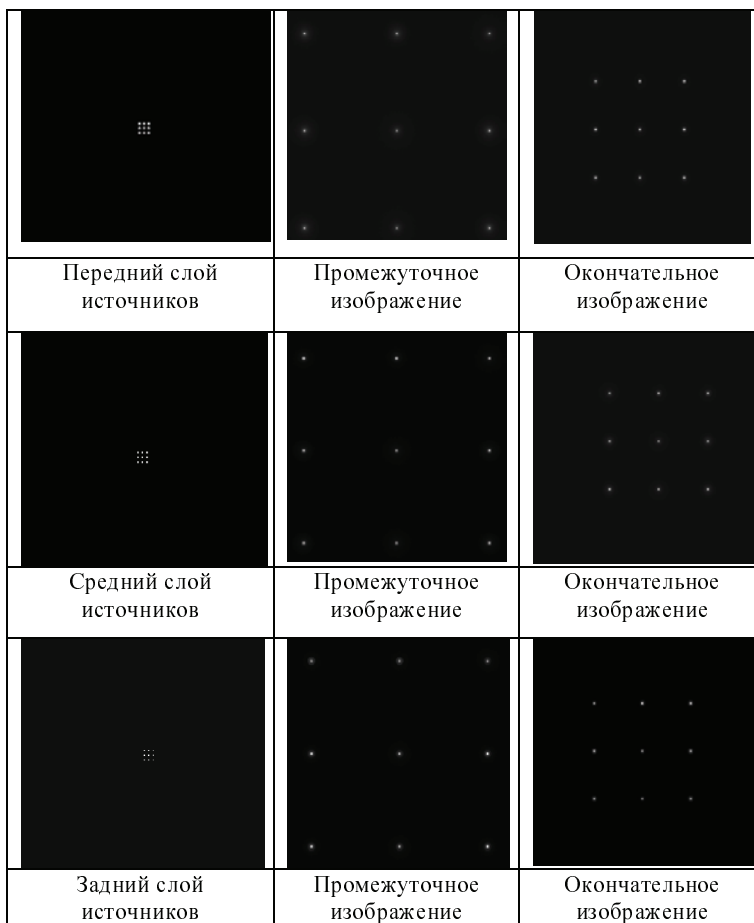


Рис. 3. Полученные изображения источников света в одном масштабе

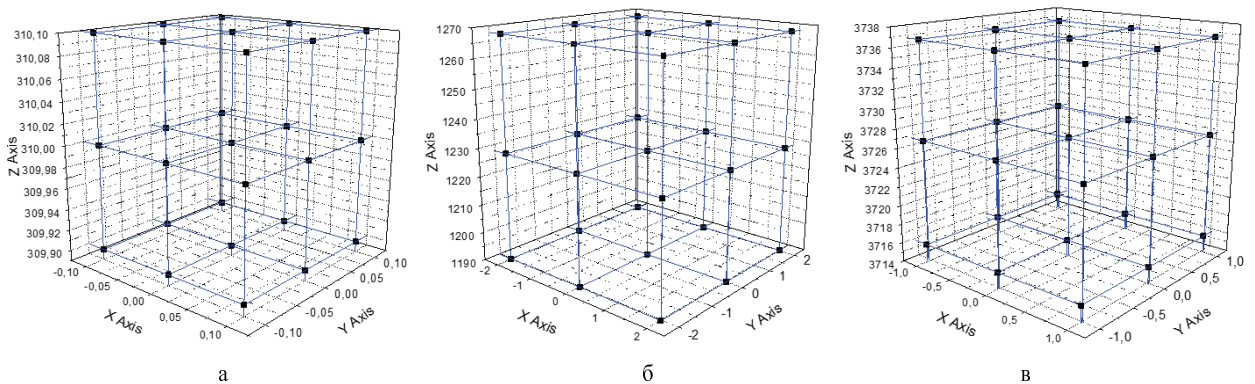


Рис. 4. Координаты точек объекта в трехмерном координатном объеме: а – исходный объект, б – промежуточное изображение, в – окончательное изображение

Эксперименты

В первой серии экспериментов контролировалось обеспечение телецентрического эффекта. На рис. 5 представлены изображения мира, полученные при смещении ее вдоль оптической оси. На первом кадре мира находится в объектной плоскости, на втором она смещена на 3 мм, на третьем – на 6 мм. При смещении мира происходит потеря резкости, однако размер изображения остается тем же. Таким образом, достигается телецентрический эффект.

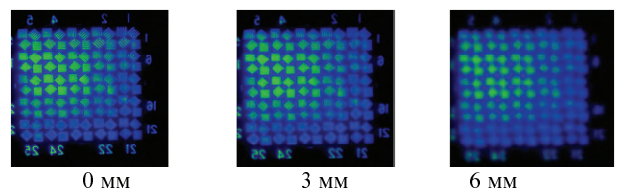


Рис. 5. Полученные изображения мира в зависимости от места ее расположения на оптической оси

Для оценки способности оптической системы передавать тонкую структуру интерференции необ-

ходимо иметь данные о частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) исследуемой системы. Вторая серия экспериментальных исследований была посвящена анализу ЧКХ системы.

Исследование проводилось следующим образом: ПЗС-матрицей регистрировалась каждая позиция миры ГОИ № 1, затем в программе ImageJ обрабатывался каждый кадр. Изображения нормировались для устранения фоновой яркости. По формуле

$$T = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

рассчитывалась ЧКХ для каждой отдельной позиции миры. Затем все сводилось в один график. На рис. 6 представлен график ЧКХ устройства. С помощью Фурье-преобразования из ЧКХ рассчитывалась ФРТ для оптической системы. Она приведена на рис. 7.

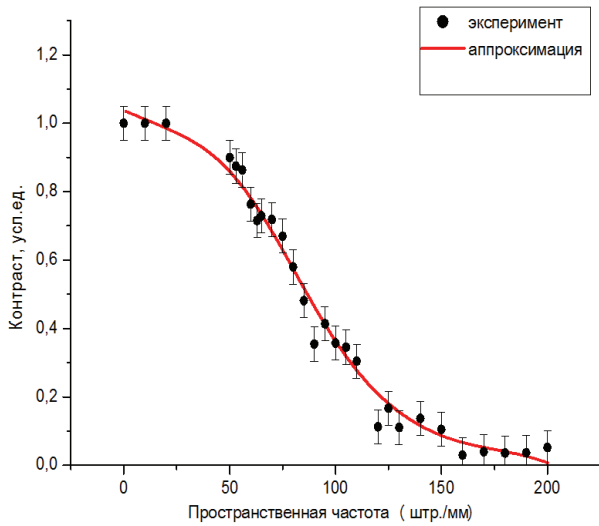


Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика

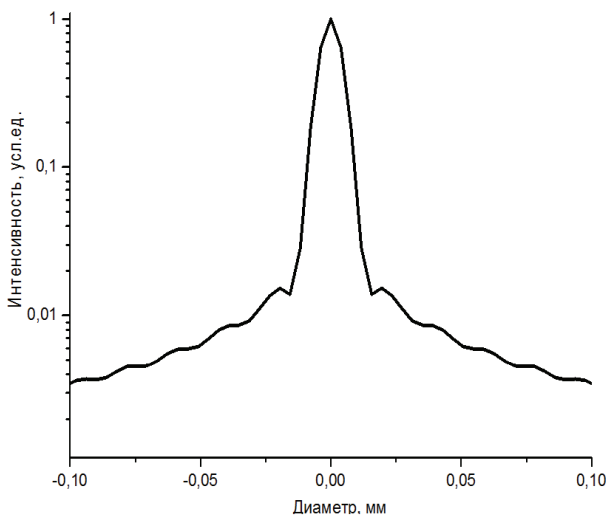


Рис. 7. Функция рассеяния точки

С одной стороны, динамический диапазон системы позволяет регистрировать объекты с контрастом до 0,025. Следовательно, разрешения системы достаточно для передачи интерференционной структуры. С другой стороны, по графику ЧКХ видно, что пространственные частоты в интервале 150–200 штр./мм передаются со слабым контрастом (менее 0,1). Это позволяет предположить, что периферийные интерференционные кольца, обладающие малой толщиной и яркостью, могут быть не зарегистрированы в голографическом изображении. Последующая обработка голограммы шаблоном, включающим эти кольца, приведет к дополнительному зашумлению восстановленного изображения.

Для улучшения качества регистрации голограмм можно наметить два направления: первое – повышение контраста регистрации высоких пространственных частот, второе – уточнение пределов разрешения и корректировка восстановительного шаблона с целью улучшения соотношения сигнал/шум в восстанавливаемых изображениях.

Выводы

1. Предложен вариант схемы телецентрической системы для оптической голографии, содержащий две телецентрические подсистемы – подсистему увеличения и подсистему переноса.

2. Результаты моделирования в среде Zemax телецентрической системы показывают, что предлагаемый вариант системы удовлетворяет требованиям к разрабатываемому устройству – обеспечивается телецентрический эффект, оптическое увеличение и перенос изображения.

3. В системе переноса наблюдается незначительный астигматизм, исправление которого – одно из направлений оптимизации разрабатываемой системы.

4. Взаимодействие подсистемы увеличения и подсистемы переноса позволяет частично компенсировать растяжение вдоль оптической оси.

5. Экспериментально показано обеспечение телецентрического эффекта при переносе голограммы в зону регистрации.

6. Экспериментально исследована ЧКХ системы, получен расчетный профиль ФРТ, показаны ограничения разрешающей способности при регистрации голограмм.

Литература

1. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography / Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., et al. // LA-UR-14-24722 2014-06-25 (URL: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-14-24722>).