

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

Н. А. Каменева, В. Г. Каменев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Введение

Для регистрации дисперсной фазы во время ударно-волнового нагружения 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.

Поскольку оптическая система предназначена для газодинамических опытов, существует необходимость удаления регистрирующей аппаратуры от зондируемого объема. Однако телецентрические системы имеют ограничения на соотношение увеличения изображения и области его формирования. Поэтому для обеспечения одновременного переноса и увеличения изображения целесообразно использовать две телецентрические подсистемы. Таки образом, в системе присутствуют уничтожаемый узел, располагаемый в непосредственной близости от исследуемого объекта и увеличивающий изображение в 10–20 раз для регистрации на ПЗС-камеру, и сохраняемый узел, расположенный в защищенном помещении и переносящий увеличенное изображение на расстояние нескольких метров (оптимальное расстояние переноса 2,5–7 метров).

Одним из методов регистрации пыления является цифровая динамическая голография. Цифровая обработка регистрируемого изображения с помощью вычисления интеграла Френеля – Кирхгофа позволяет получить информацию о трехмерном расположении микроскопических объектов в пределах зондированного объема.

Итак, разрабатываемое устройство должно обеспечивать:

- телецентрический ход лучей;
- отсутствие aberrаций, влияющих на запись голограмм;
- пространственное разрешение объектов до 1 мкм;
- увеличение изображения не менее чем в 10 раз;
- перенос изображения на расстояние 2,5–7 метров.

Моделирование оптического тракта предлагаемой системы в среде проектирования ZEMAX

Для анализа телецентрического эффекта и для проверки на наличие aberrаций в системе в среде ZEMAX была создана решетка с источниками излучения. Шаг решетки составляет 100 мкм, а сборка в целом представляет собой куб, содержащий 3×3×3 источника.

Было решено использовать в качестве моделей объективов линзы с эквивалентным фокусным расстоянием. В качестве линз были использованы дуплеты из стекол BK7 и SF3 с компенсацией сферической aberrации. Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем – подсистемы увеличения и оптического ретранслятора (рис. 1). В подсистеме увеличения телепозитив и теленегатив моделировались с помощью линзовых дуплетов.

Телепозитив в оптическом ретрансляторе 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 оптического ретранслятора моделировался с помощью тонкой длиннофокусной двояковыпуклой линзы.

Область источников излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора размером 4×4 мм и разрешением 500×500 пикселей. Также детектором контролировались фокусировка лучей и расстояние переноса изображений. На рис. 2 представлены полученные детектором изображения смоделированных источников. Можно отметить, что на данных изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения.

На рис. 3 представлены координаты точек исходного объекта, промежуточного и конечного изображений. Промежуточное изображение, помимо того что было увеличено в 10 раз за счет увеличения смоделированного первого узла, было вытянуто вдоль оптической оси в 39 раз по сравнению с разме-

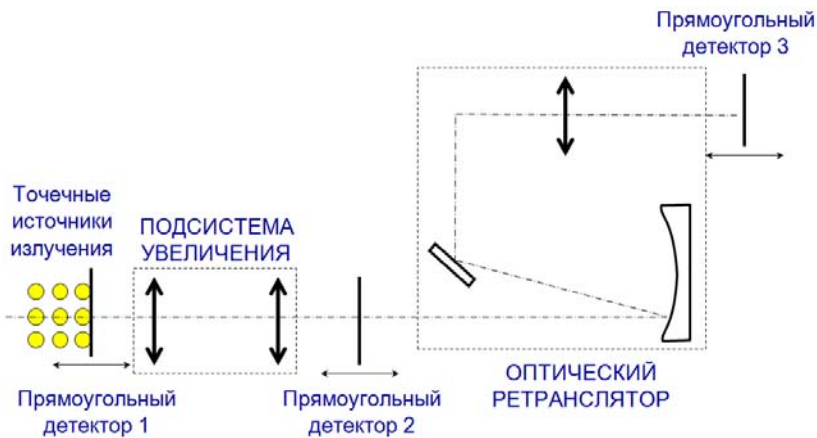


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемой оптической системы, состоящей из двух телецентрических подсистем, в среде ZEMAX

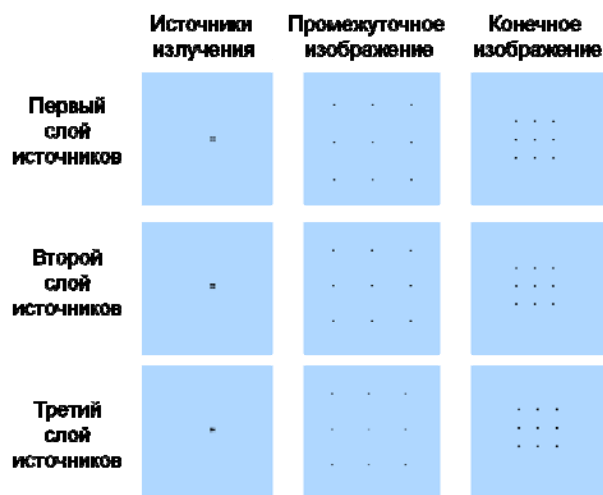


Рис. 2. Изображения слоев трехмерной сетки источников излучения, промежуточного изображения и окончательного изображения источников, представленные в одном масштабе

рами в других плоскостях. Данный эффект достаточно характерен для телецентрических систем [1]. Также следует отметить, что порядок расположения слоев в промежуточном изображении оказывается «вывернутым на изнанку» – плоскости, находящиеся ближе к системе увеличения, переносятся дальше, и наоборот.

Конечное изображение по сравнению с промежуточным было сжато в 4 раза вдоль оптической оси и увеличено в 10 раз по сравнению с исходными размерами решетки.

Приведенные на рис. 3 трехмерные графики показывают, что слои изображения источников переносятся линейно, с одинаковым увеличением и без искажений.

Также было промоделировано влияние расстояния между оптическим ретранслятором и объектом на оптическое увеличение системы в целом. В модели варьировалось данное расстояние и фокус тонкой линзы – теленегатива оптического ретранслятора. Параметры подбирались так, чтобы изображение формировалось практически вплотную к линзе. По

мере удаления от объекта изображение формировалось все ближе к заднему фокусу зеркала ретранслятора, что создавало ограничение на максимальный фокус линзы, а значит – на увеличение системы. Поскольку зеркало и линза ретранслятора образуют телецентрическую систему, ее увеличение определяется формулой (1):

$$\Gamma_{\text{рет}} = \frac{F_{\text{л}}}{F_3}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{рет}}$ – увеличение ретранслятора, $F_{\text{л}}$ – фокусное расстояние теленегатива оптического ретранслятора, F_3 – фокусное расстояние зеркала оптического ретранслятора.

Общее увеличение системы оценивается второй формулой (2):

$$\Gamma_{\text{общ}} = \frac{F_{\text{л}}}{F_3} \cdot \Gamma_{\text{ув}}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{ув}}$ – увеличение увеличивающей подсистемы.

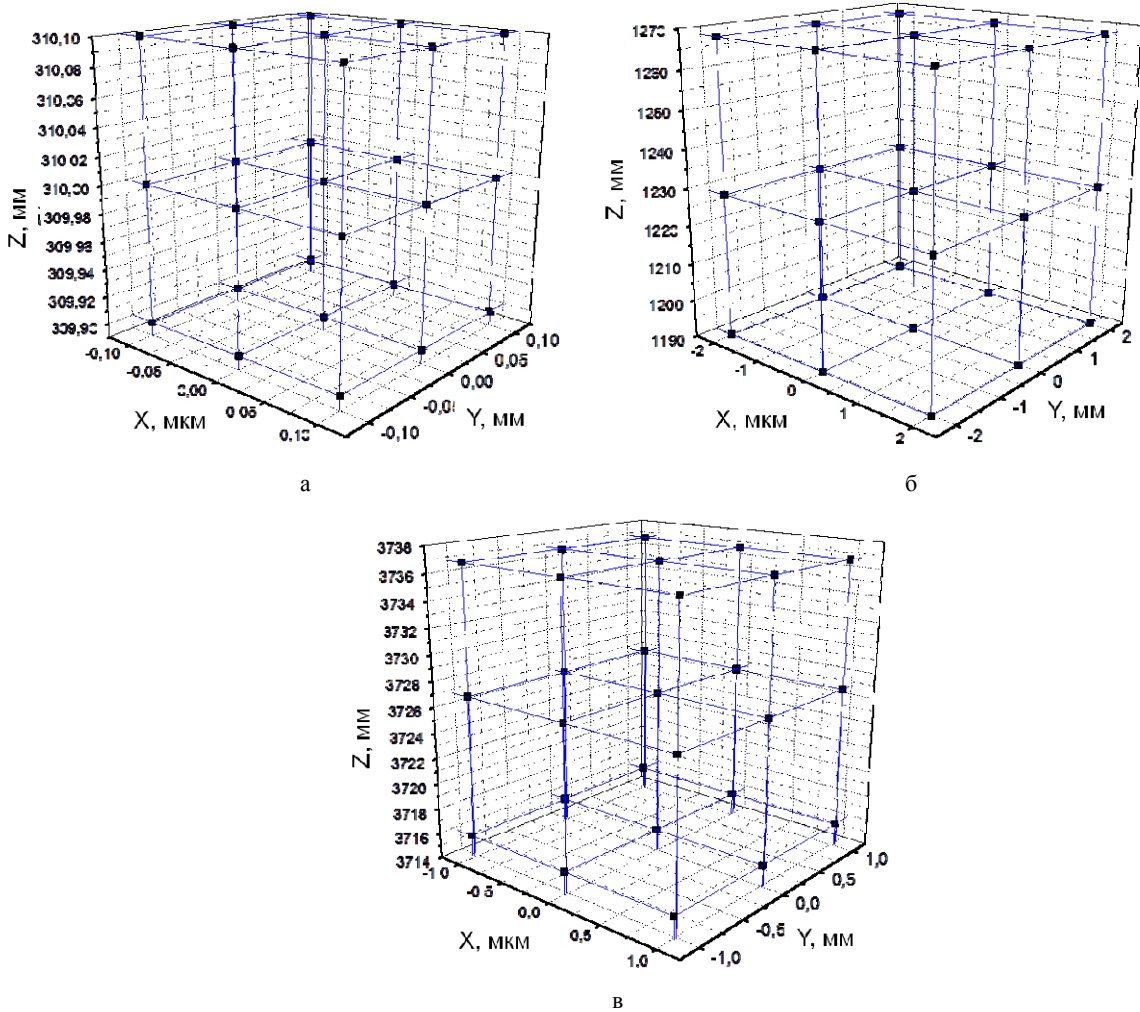


Рис. 3. Трехмерные графики: а – исходной решетки, б – промежуточного изображения, в – окончательного изображения

Таким образом, на основе зависимости предельного фокуса линзы от расстояния можно установить связь между увеличением системы и расстоянием до объекта. Эта зависимость показана на рис. 4.

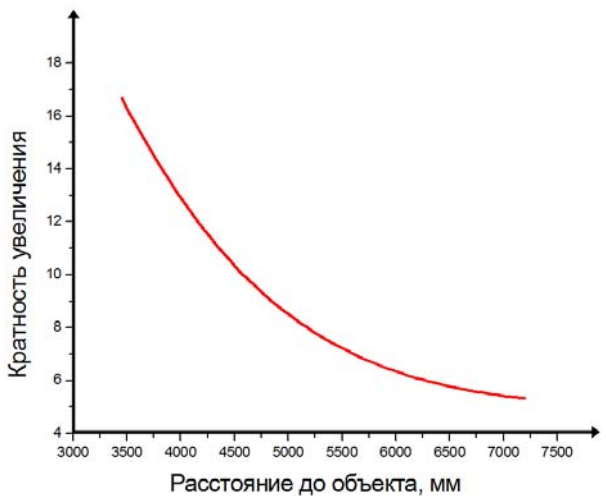


Рис. 4. Зависимость увеличения системы от расстояния до объекта

Для проверки на наличие в системе aberrаций была рассчитана функция рассеяния точки (ФРТ) для промежуточного и конечного изображений. На рис. 5а 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. 5б показана ФРТ для конечного изображения. В данном случае наблюдается астигматизм, приводящий к растягиванию пятна рассеяния в вертикальном направлении. Ширина на полувысоте в горизонтальном направлении – 300 нм, и здесь разрешение ограничивается дифракцией. В вертикальном направлении ширина на полувысоте составляет около 2 мкм. Однако поскольку на оптический ретранслятор передается уже увеличенное изображение, а размер пиксела используемой ПЗС-матрицы составляет 6 мкм, то такой астигматизм не будет зарегистрирован камерой.

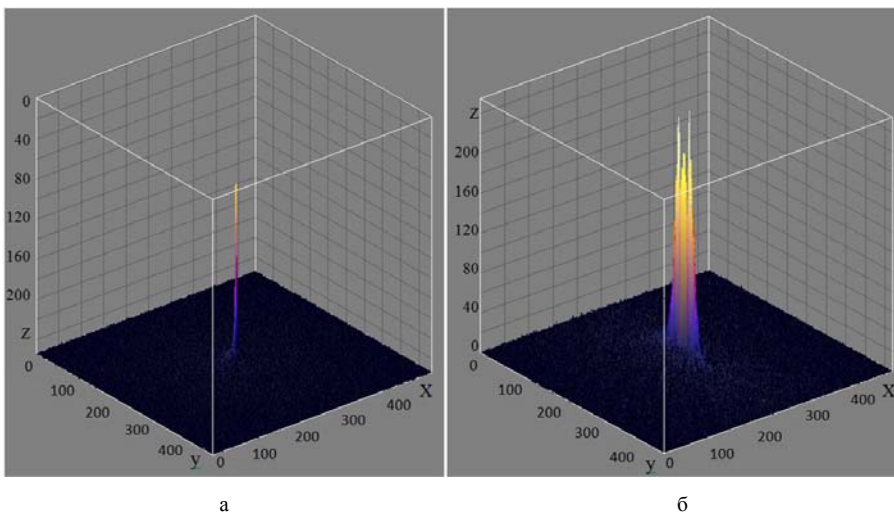


Рис. 5. ФРТ (цена деления по x и y – 0,02 мкм, z – усл. ед.): а – для промежуточного изображения, б – для конечного изображения

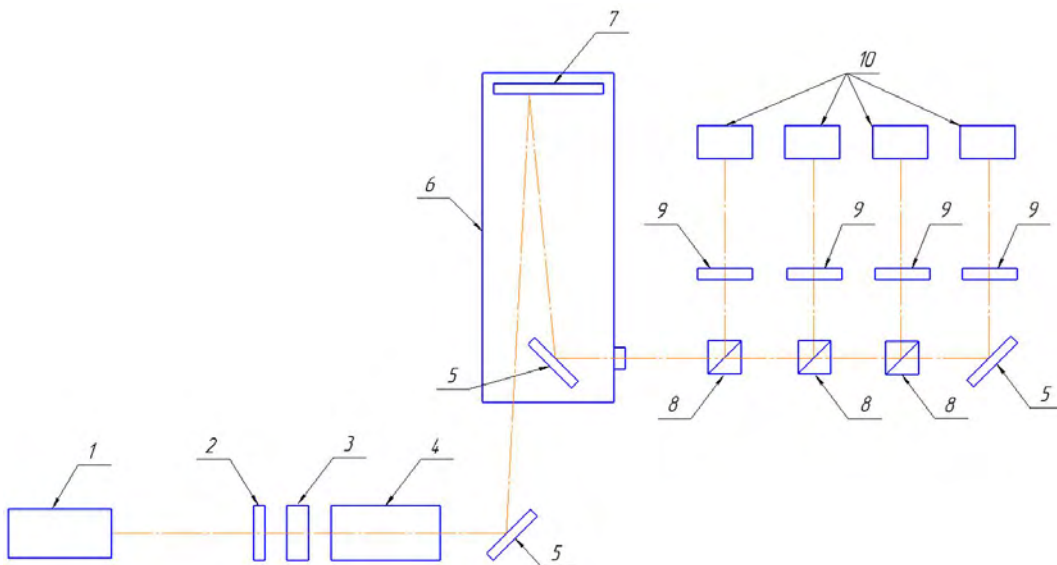


Рис. 6. Схема оптической телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм: 1 – система подсветки; 2 – мира USAF 1951; 3 – микрообъектив; 4 – объектив; 5 – поворотное зеркало; 6 – телескоп; 7 – вогнутое зеркало телескопа; 8 – светоделительный куб; 9 – линза с фокусным расстоянием 1000 мм; 10 – ПЗС-камера

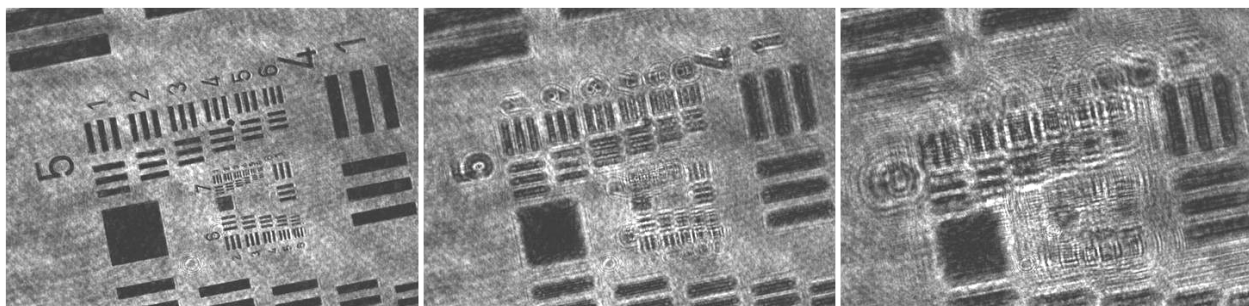
Экспериментальная обработка телецентрической системы

Для проведения экспериментов был собран макет по представленной на рис. 6 схеме. На схеме представлены две телецентрические подсистемы. Подсистема увеличения состоит из микрообъектива и телеобъектива, расположенных вблизи исследуемого объекта. Оптический ретранслятор состоит из собирающего зеркала телескопа и линз с фокусными расстояниями 1000 мм. В серии экспериментов вместо исследуемого объекта устанавливалась мира USAF 1951.

Многоканальность может быть использована для расширения динамического диапазона регистрируемого сигнала, для многокадровой съемки с разделением во времени, а также для снижения уровня шумов за счет усреднения сигналов.

В экспериментах телецентричность тоже контролировалась. На рис. 7 представлены кадры миры при ее смещении вдоль оптической оси. На первом кадре мира находится в объектной плоскости, на втором она смещена на 2 мм, на третьем – на 5 мм. Заметно, что разрешение изображения падает, однако его размер не меняется.

Для получения графика зависимости телецентрического эффекта от расположения миры последняя регистрировалась с перенастройкой регистратора. Затем были выбраны контрольные точки в одних и тех же местах на всех полученных изображениях миры, по значениям которых строился трехмерный график (рис. 8). По графику можно заметить, что размер изображения не зависит от расстояния до объекта. Таким образом доказано достижение телецентрического эффекта системой.



0 мм

2 мм

5 мм

Рис. 7. Регистрация миры USAF 1951 при ее смещении вдоль оптической оси

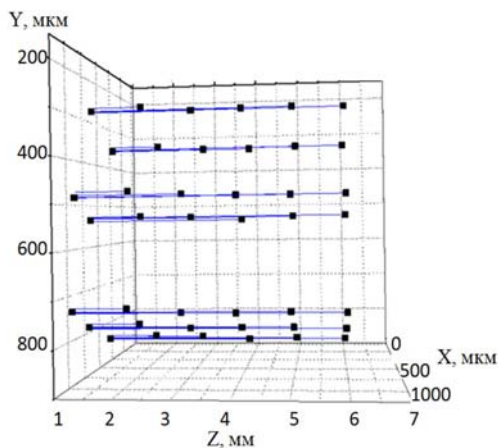


Рис. 8. Регистрация телецентрического эффекта

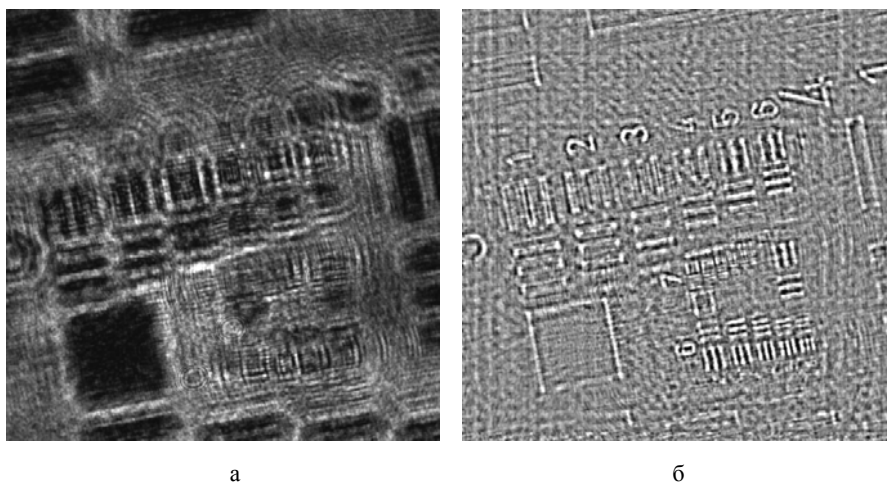


Рис. 9. Голограмма: а – миры, б – результат восстановления изображения [4]

Для определения предельных характеристик по разрешению, производилась регистрация цифровых голограмм миры при различных её положениях относительно фокальной плоскости и неизменных настройках системы. Использовалось когерентное коллимированное излучение с длиной волны 532 нм.

На рис. 9а показана цифровая голограмма миры, зарегистрированная на расстоянии 4 мм от плоскости построения изображения. На рис. 9б показан результат восстановления изображения из цифровой голо-

граммы. Следует отметить, что на восстановленном изображении идентифицируются все позиции миры, хотя исходная голограмма зарегистрирована на таком расстоянии от плоскости построения изображения, на котором при использовании некогерентного источника зарегистрировать позиции миры было бы невозможно. Таким образом, цифровая голография позволяет расширить область резко изображаемого пространства почти на порядок с сохранением разрешения до 225 п.л./мм [4].

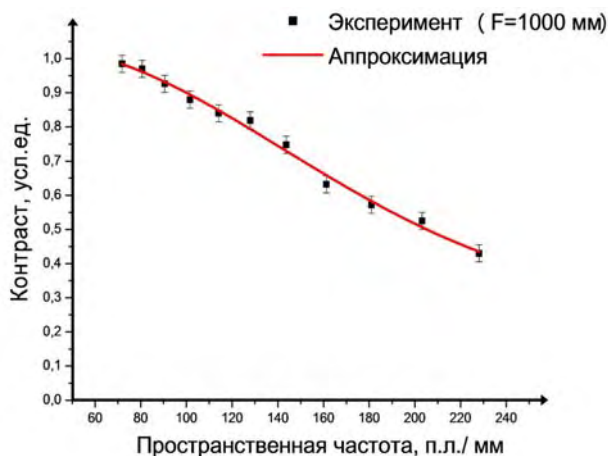


Рис. 10. Кривая ЧКХ исследуемой системы с оптическим увеличением 20^x

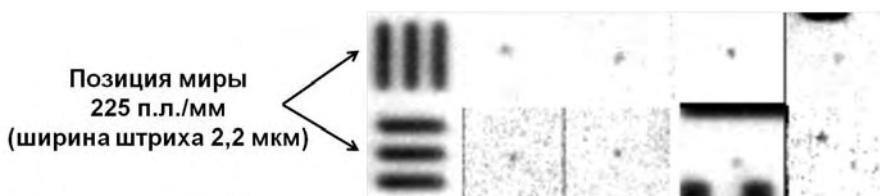


Рис. 11. Микронные частицы, зарегистрированные исследуемой системой

Для оценки способности оптической системы передавать тонкую интерференционную структуру, необходимо иметь данные о частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) системы. На рис. 10 представлена ЧКХ с использованием в подсистеме увеличения микрообъектива, увеличивающего в 20 раз. Для наименьшей позиции миры наблюдается контраст 0,4. Используемая мира не позволяет установить предел по разрешению.

На мире было обнаружено значительное количество пылинок и загрязнений размером около 1 мкм. На рис. 11 они приведены в одном масштабе с наименьшей позицией миры USAF 1951.

Выводы

1. Предложен и обоснован вариант схемы телецентрической системы для цифровой голографии, содержащий две телецентрические подсистемы – подсистему увеличения и оптический ретранслятор.
2. Моделирование показало, что наиболее оптимальное расстояние оптического ретранслятора от объекта исследования – до 5000 мм.
3. Расчетами экспериментально показано обеспечение телецентрического эффекта;
4. Расчетами и экспериментально показано обеспечение пространственного разрешения объектов до 1 мкм.

5. Расчетами и экспериментально показано отсутствие aberrаций, влияющих на запись голограмм.

6. Продемонстрировано увеличение изображения в 20 раз.

Литература

1. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography / Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., at al. // LA-UR-14-24722 2014-06-25 (URL: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-14-24722>).
2. Sorenson, D. Particle Distribution Measurements Using in-line Fraunhofer Holography / D. Sorenson, R. Malone, B. Frogget, C. Ciarcia, T. Tunnell, R. Flurer // SPIE, Santa Fe, NM – October 1996. P. 10035.
3. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., Tunnel T. H., Mallone R. M. Ejecta particle size distribution for shock loaded Sn and Al metals // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92, N 10. P. 5830.
4. Каменева Н. А. Устройство для регистрации цифровых голограмм быстротекающих газодинамических процессов на основе телецентрической оптической системы: Магистр. дис.: 12.04.02. Москва, 2019. С. 76.