

## Разработка макета семиканальной лазерной системы для физического моделирования мультиапертурного датчика волнового фронта

*П.А. Семёнов*

*Институт лазерной и оптической технологии, Москва*

**Аннотация:** В работе рассмотрена модель мультиапертурного датчика волнового фронта для активного управления лазерным пучком. Предложена стратегия восстановления фазы, на базе алгоритма Гершберга–Сэкстона, итерационного метода фазовой реконструкции оптических изображений. В работе приведены результаты экспериментального исследования по реконструкции фазового распределения с помощью указанного метода. Для этого был создан стенд по измерению волновых характеристик пучка и разработана модель семиканальной лазерной системы с различным фазовым сдвигом.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, мультиапертурные лазерные системы, датчик волнового фронта, алгоритм Гершберга–Сэкстона, восстановление изображений.

Для повышения эффективности использования современных лазерных технологий в машиностроении [1] требуется разработка новых типов источников излучения с малым углом расходимости, но высокой мощностью в пятне. С другой стороны, увеличение предельной мощности отдельного лазерного канала при минимальных потерях излучения ограничены, при этом качество пучка существенно снижается [2]. Одним из возможных способов для выполнения указанных требований, в настоящее время, является использование мультиапертурных оптических систем [3] со сложением нескольких лазерных пучков. Одной из основных задач при их построении является разработка системы управления и контроля отдельными лазерными каналами для достижения требуемого пространственного положения пучков на входе в систему наведения излучения, для стабильной и эффективной работы лазерного комплекса.

В большинстве практических случаев для контроля и управления качеством пучков широко используются адаптивные оптические системы на базе традиционных датчиков волнового фронта типа Шака-Гартмана в комбинации с гибкими адаптивными зеркалами [4]. Такие системы хорошо

отработаны и широко используются. Среди недостатков можно выделить их высокую стоимость, недостаточную скорость работы и достаточно сложную реализуемость при работе в системах с большим количеством лазерных источников.

Альтернативным способом может стать использование датчиков волнового фронта с применением итерационных алгоритмов восстановления и обработки изображений. Подобные системы уже используются для управления излучением в одноканальных системах [5], однако возможность применения этого принципа для компенсации искажений в многоканальных системах на сегодняшний день очень мало изучена.

В работе исследуется методика измерения и контроля лазерного пучка на основе адаптивной оптической системы с активной обратной связью и датчиком волнового фронта, с использованием алгоритма Гершберга-Сэкстона [6], принцип работы которого сводится к восстановлению фазового распределения в пучке, по распределениям интенсивностей в фокальной плоскости линзы и на её апертуре, с помощью последовательной итерационной процедуры.

Математическое моделирование алгоритма Гершберга-Сэкстона для мультиапертурных лазерных систем проводилось в работе [7], где была описана возможность его применения для систем с количеством каналов вплоть до 127. Кроме того, было отмечено, что при числе каналов больше 37 возникают такие начальные условия, при которых алгоритм сходится не к истинному решению, а начинает попадать в состояния локальных экстремумов [8]. Различные варианты исключения данной проблемы, основанные как на методах глобальной оптимизации, так и на способах редукции размерности задачи, рассматривались в работе [9]. Отмечено, что при использовании глобальной оптимизации типа «случайный мультистарт» вместе с блоковым принципом редукции, алгоритм Гершберга-Сэкстона

---

эффективно восстанавливает комплексную амплитуду поля однозначным образом.

В настоящей работе описаны результаты экспериментального исследования по использованию алгоритма Гершберга-Сэкстона в качестве мультиапертурного датчика волнового фронта. Для этого, был разработан экспериментальный лазерно-оптический стенд, схема которого на рис.1.

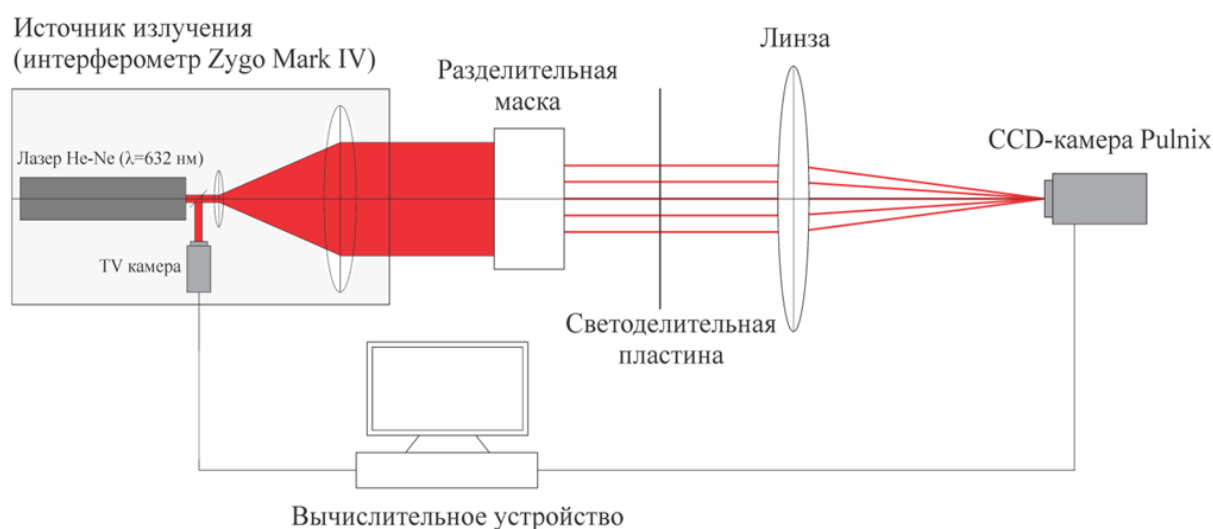


Рис. 1. – Схема эксперимента по восстановлению фазовой информации семи непрерывных пучков лазерного излучения

В качестве основного источника излучения, был использован интерферометр Zygo, лазерный пучок которого имеет равномерное поляризованное распределение. С выхода интерферометра излучение попадает на разделительную маску, моделирующую семиканальную лазерную систему с различным фазовым сдвигом в каждом канале. Конструкция разделительной маски, фазовые пластины и часть оптических элементов были изготовлены специально для эксперимента. С помощью светоделителя часть излучения отводится для регистрации распределения в плоскости изображения. В качестве измерителя распределения интенсивности применялась система измерения энергетических и

пространственных характеристик СИЭПХ-2 [10]. Основная часть излучения фокусируется линзой на поверхности приемника (CCD-камеры), где регистрируется изображение в фокальной плоскости пучка. Полученные распределения обрабатываются специализированным программным обеспечением, написанным на языке программирования Python 3.11, в котором реализовано восстановление фазового распределения с помощью алгоритма Гершберга–Сэкстона.

Разделительная маска (рис.2), разработанная и изготовленная специально для лазерного оптического стенда, состояла из корпуса, куда устанавливалась пластина с отверстиями, положение которой фиксировалось проволоочным стопорным кольцом. В пластине были установлены штифты для точного позиционирования следующих деталей – промежуточных резиновых прокладок и зеркала из алюминия с отверстиями, которое фиксировалось в корпусе резьбовым кольцом. Расстояние между отверстиями составляло 2.5 мм, при диаметре отверстий 4.5 мм каждое.

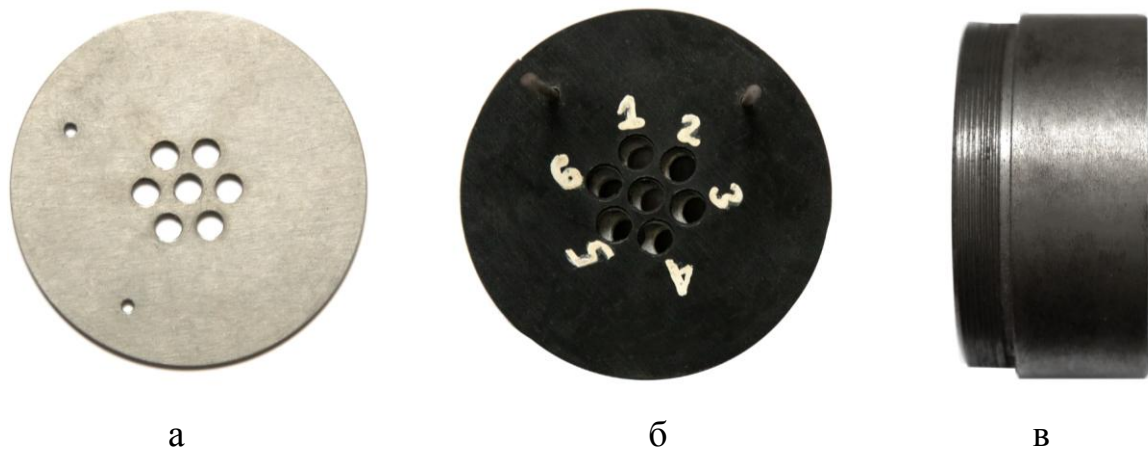


Рис. 2. – Разделительная маска: а - пластина с отверстиями, б - промежуточные резиновые прокладки, установленные на зеркале с помощью штифтов, в - корпус

Фазовый сдвиг относительно каждого канала в системе моделировался путём помещения в каждое отверстие разделительной маски специально изготовленных плоскопараллельных пластинок из оптического стекла заданной толщины. Толщина пластинок варьировалась в диапазон от 0,66 мм до 0,97 мм с шагом 0,05 мм. Для точного контроля изменения фазового сдвига оптическая схема была рассчитана с помощью пакета моделирования Optics Studio Zemax 2023. Затем, все фазовые пластины аттестовывались с помощью интерферометра Zygo, при этом для каждого значения толщины рассчитан соответствующий фазовый сдвиг.

Результаты проведённых на стенде измерений, показаны на рис. 3.

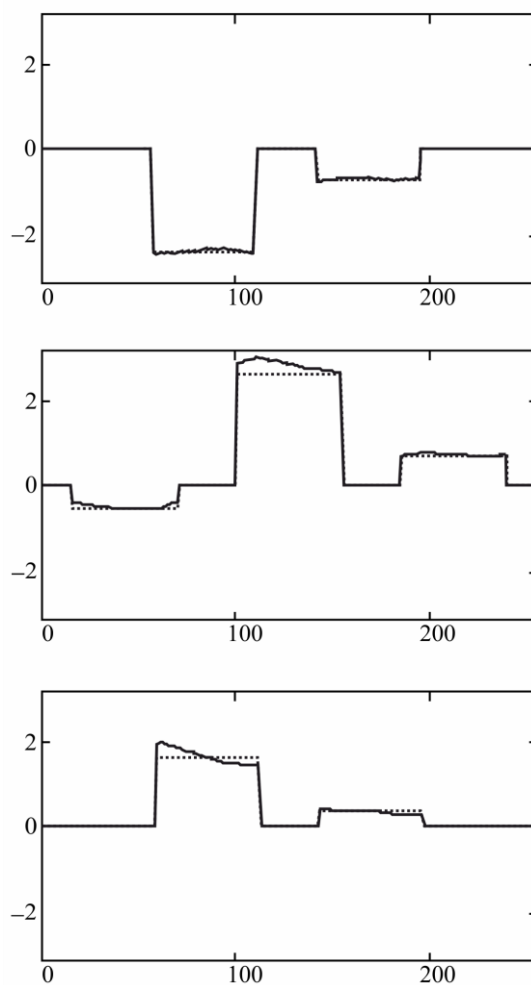


Рис.3. – Экспериментальное восстановление фазового распределения в стенде (пунктирная кривая – численное моделирование)

На рисунке изображены сечения восстановленного с помощью алгоритма Гершберга–Сэкстона фазового фронта в семиканальной системе. Фазовое поле восстанавливалось в среднем за 15-20 последовательных итерационных процедур. Точность измерения волнового фронта составила порядка  $\lambda/100$ , при этом основной вклад в ошибку составила точность юстировки и установки фазовых пластин.

### **Заключение**

В настоящей работе было продемонстрировано экспериментальное восстановление фазового поля в мультиапертурном лазерном пучке. Был создан макет и проведено физическое моделирование по восстановлению фазовой информации в семиканальной системе, подтверждающий результаты численного моделирования.

По итогам работы показана принципиальная возможность построения мультиапертурного датчика волнового фронта на основе алгоритма Гершберга-Сэкстона.

### **Литература**

1. Козлов В.Б., Истомин А.Б. Применение лазерных технологий в машиностроении // Главный механик. 2020. №8. С. 41-51.
  2. Dawson J. W., Messerly M. J., Heebner J. E., Pax P.H., Sridharan A.K., Bullington A.L., Beach R.J., Siders C.W., Barty C.P.J., Dubinskii M. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials // Proc. SPIE., 2010. V. 7686. P. 768611-1 – 768611-12.
  3. Фиговский О.Л. В интервале пяти лет появятся инновации, которые сегодня кажутся фантастикой // Инженерный вестник Дона, 2011. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643).
  4. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // УФН. 2014. Т.184. №6, С. 599 - 640.
-

5. Дементьев Д.В., Семёнов П.А. Подбор оптимальных характеристик спектра интенсивности барабанного альгофилтра на основе итерационных методов обработки // Инженерный вестник Дона, 2015. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3185>.

6. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik (Stuttgart). 1972. V. 35. №2. P. 237–246.

7. Польских С.Д., Семёнов П.А. Многоапертурный датчик волнового фронта для системы когерентного сложения лазерных пучков // Оптический журнал. 2016. Т.83. №6. С.7-13.

8. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a comparison // Appl. Optics. 1982. V. 21. №15. P. 2758–2769.

9. Семёнов П.А., Польских С.Д. Моделирование системы фазовой синхронизации лазерных излучателей на основе итерационных методов обработки изображений // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №3. С. 370-375.

10. Рузин М.В. Измерение физической и геометрической расходимости лазерного пучка во времени // Фотоника. 2017. Т.63. №3. С. 48-53.

### References

1. Kozlov B.V., Istomin A.B. Glavniy mehanik, 2020, №8. pp. 41-51.

2. Dawson J. W., Messerly M. J., Heebner J. E., Pax P.H., Sridharan A.K., Bullington A.L., Beach R.J., Siders C.W., Barty C.P.J., Dubinskii M. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials. Proc. SPIE., 2010. V. 7686. pp. 768611-1 – 768611-12.

3. Figovsky O. L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643).

4. Lukin V.P. UFN, V.184, №6, 2014. pp. 599 - 640.

5. Dementiev D.V., Semenov P.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3185](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3185).



6. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik (Stuttgart)*. 1972. V. 35. №2. pp. 237–246.
7. Pol'skikh S.D., Semenov P.A. *Opticheskiy zhurnal*, 2016, 83(6), pp. 7-13.
8. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a comparison. *Appl. Optics*. 1982. V. 21. № 15. pp. 2758–2769.
9. Semenov P.A., Pol'skikh S.D. *Komp'yuternaja optika*, 2015, 39(3), pp. 370-375.
10. Ruzin M.V. *Fotonika*, 2017, V.63, №3, pp. 48-53.