

АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2007 г. А. А. Александров; А. В. Кудряшов, доктор физ.-мат. наук; А. Л. Рукосуев;
Т. Ю. Черезова, канд. физ.-мат. наук; Ю. В. Шелдакова

ООО "Адопт", Москва

E-mail: kud@nightn.ru

Представлена адаптивная оптическая система, предназначенная для фокусировки излучения мощных технологических лазеров. Система состоит из корректора волнового фронта, измерителя волнового фронта и программно-аппаратной системы управления корректором. В качестве корректора используется гибкое биморфное зеркало. Для анализа качества фокусировки излучения используется M^2 -датчик, позволяющий оценить такие параметры лазерного излучения, как диаметр, угол расходимости, параметр качества M^2 . Управление биморфным зеркалом осуществляется с помощью комбинированного метода, построенного на основе градиентных методов поиска экстремума и генетического алгоритма. Система позволяет корректировать aberrации низких порядков и оценивать эффективность фокусировки лазерного излучения.

Коды OCIS: 140.0140.

Поступила в редакцию 28.04.2006.

Введение

Для решения многих задач современной лазерной физики требуется достигнуть наибольшей плотности энергии излучения на поверхности мишени. Так, например, при взаимодействии излучения фемтосекундного лазера с различными материалами необходимо получить наибольшую плотность энергии в фокусе объектива. Однако, как показали последние эксперименты в различных лабораториях, достижение максимальных плотностей мощности невозможно без использования методов адаптивной оптики [1, 2].

В настоящее время адаптивные оптические системы используются для формирования и коррекции излучения в современных лазерах [1, 2]. С помощью таких систем можно не только компенсировать искажения волнового фронта, но и управлять модовым и спектральным составом излучения. Нами разработана адаптивная оптическая система, предназначенная для формирования и коррекции лазерного излучения. Она состоит из трех основных частей: корректора волнового фронта на основе биморфного зеркала, измерителя волнового фронта гартмановского типа и программно-аппаратной системы управления корректором. Однако даже получив плоский волновой фронт, добиться наилучшей фокусировки не удастся, поскольку измеритель волнового фронта располагается, как правило, перед фокусирующим элементом, и адаптивная система во время коррекции не может учесть aberrации, возникшие после фокусирующего элемента. Поэтому не менее важной частью адаптивной системы является датчик, позволяющий оценить эф-

фективность фокусировки, проанализировать распределение интенсивности, измерить диаметр пучка, угол расходимости, параметр качества M^2 .

M^2 -датчик для адаптивной системы

Для решения проблемы измерения и дальнейшей обработки распределения интенсивности можно использовать видеокамеру, расположенную в фокальной плоскости фокусирующего элемента. В нашей лаборатории разработан M^2 -датчик [3, 4], позволяющий не только получать распределение интенсивности, но также вычислять другие параметры лазерного излучения, информация о которых важна во время процесса коррекции: диаметр пучка, угол расходимости, параметр качества M^2 , эллиптичность пучка (рис. 1). Все измерения соответствуют международному стандарту ISO 11146 [5].

Анализируемый пучок считается эллиптическим, и диаметры пучка d_x, d_y рассчитываются с ис-

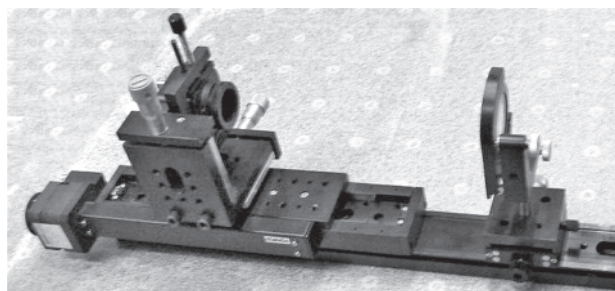


Рис. 1. Фотография M^2 -датчика.

пользованием вторых моментов функции распределения интенсивности $I(x, y, t)$

$$d_x(t) = 4\sqrt{x^2(t)}, \quad d_y(t) = 4\sqrt{y^2(t)}, \quad (1)$$

где x^2 и y^2 – вторые моменты распределения интенсивности:

$$\begin{aligned} x^2(t) &= \iint (x - \bar{x})^2 I(x, y, t) dx dy / \iint I(x, y, t) dx dy, \\ y^2(t) &= \iint (y - \bar{y})^2 I(x, y, t) dx dy / \iint I(x, y, t) dx dy. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь \bar{x} , \bar{y} – первые моменты распределения интенсивности, которые имеют смысл координат центра тяжести пучка,

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \iint x I(x, y, t) dx dy / \iint I(x, y, t) dx dy, \\ \bar{y} &= \iint y I(x, y, t) dx dy / \iint I(x, y, t) dx dy. \end{aligned} \quad (3)$$

Для сравнения реального пучка с дифракционным в процессе коррекции удобно использовать параметр качества M^2 . Параметр M^2 является отношением ширины пучка к ширине моды TEM_{00} . Параметр качества пучка всегда ≥ 1 , причем $M^2 = 1$ только для идеального гауссова пучка. Значение M^2 оценивается по формуле

$$M_x^2 = \pi d_x d_{0x} / 4\lambda f, \quad M_y^2 = \pi d_y d_{0y} / 4\lambda, \quad (4)$$

где d_{0x} , d_{0y} – диаметр перетяжки пучка (распределение интенсивности в ближней зоне), d_x , d_y – диаметр пучка в фокусе линзы с фокусным расстоянием f (распределение интенсивности в дальней зоне).

Перетяжка пучка в случае устойчивого резонатора с выходным плоским зеркалом, как правило, находится в плоскости этого зеркала. Диаметр перетяжки пучка d_{0x} , d_{0y} можно измерять в плоскости, находящейся на расстоянии f перед фокусирующей линзой [6]. Данную линзу следует располагать вблизи выходного окна лазерного резонатора на расстоянии больше фокусного. При измерении d_x , d_y для определения положения фокальной плоскости линзы проводится несколько измерений диаметра пучка вдоль оси распространения, а затем видеокамера устанавливается в положение, соответствующее минимальному измеренному диаметру. К сожалению, для пучков с ярко выраженным астигматизмом данный метод не может быть корректно применен [5].

Система апертурного зондирования

Для эффективной фокусировки излучения, прошедшего через оптически неоднородную среду, предпочтительно использовать метод апертурного

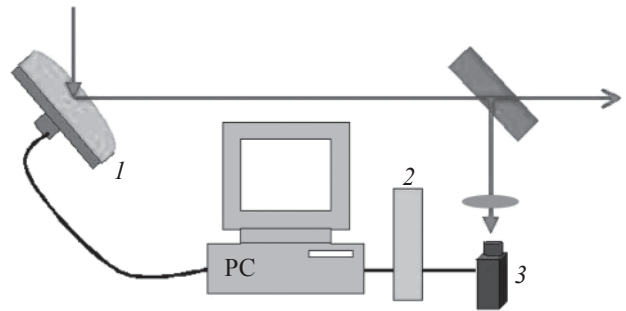


Рис. 2. Система апертурного зондирования. 1 – корректор волнового фронта, 2 – блок управления, 3 – датчик.

зондирования [7]. Стандартная система апертурного зондирования состоит из корректора волнового фронта, электронного блока управления корректором, датчика сигнала ошибки и программного обеспечения для определения управляющих напряжений (рис. 2). Метод апертурного зондирования (или пробных возмущений) заключается в измерении реакции на небольшие, преднамеренно вносимые, фазовые искажения. Контролируемым параметром в этом случае может являться либо яркость излучения, либо распределение интенсивности, либо некоторый функционал, зависящий от входного распределения фазы излучения [8]. Эффекты, за которые ответственны разные виды фазовых искажений, разделяют либо по частоте, либо по времени. В первом случае возбуждаются малые гармонические колебания $a_i \sin(\omega_i t)$ с амплитудой a_i различных участков корректора с различными частотами ω_i . Дальнейший спектральный анализ результирующего сигнала позволяет установить величину и направление необходимых для оптимизации системы изменений формы волнового фронта. Такой метод следует использовать при больших скоростях изменения фазовых искажений (турбулентность и пр.). Во втором случае возбуждение колебаний отдельных участков корректора осуществляется последовательно во времени. Этот метод требует больших временных затрат, но достаточно устойчив и малочувствителен к шумам.

Результатом работы системы является формирование волнового фронта, который можно представить в следующей форме:

$$\Phi(x, y, t) = \sum_{i=1}^N l_i(x, y) U_i(t). \quad (5)$$

Каждый управляющий сигнал $U_i(t)$ вызывает некоторое искажение $l_i(x, y)$ волнового фронта, N – число степеней свободы системы или число независимых управляющих воздействий U_i .

Алгоритмы управления системами апертурного зондирования

При стремлении достигнуть наилучшей фокусировки излучения необходимо ввести некоторую числовую характеристику, по значению которой можно судить о степени достижения цели. Реальная световая волна распространяется в анализаторе лишь на этапе регистрации, далее же рассматривается математическая модель, включающая информацию о реально зарегистрированных распределениях интенсивности. Выбранный критерий должен, с одной стороны, зависеть лишь от измеряемых величин, а с другой, – отражать цель, ради которой вводится адаптация. Можно сформулировать некоторую оценку критерия качества фокусировки в виде

$$J = \int r(x, y) I(x, y, t) dx dy, \quad (6)$$

где $r(x, y)$ – область мишени, в пределах которой требуется сконцентрировать излучение, $I(x, y, t)$ – распределение интенсивности в плоскости объекта фокусировки.

Адаптивная оптическая система в процессе своей работы оптимизирует некоторый функционал путем соответствующего изменения фазы световой волны. Для организации процесса оптимизации критерия J необходимо иметь возможность измерять пространственное распределение интенсивности в пределах области r . Во время коррекции необходимо максимизировать интенсивность принимаемого сигнала [8]. При этом диаметр сфокусированного пучка должен приближаться к дифракционному пределу. Таким образом, приходится оптимизировать одновременно два параметра: диаметр фокального пятна и пиковую интенсивность. В идеальном случае функция J имеет один экстремум. Однако оптимизировать одновременно два параметра достаточно сложно, так как диаметр может как уменьшаться, так и увеличиваться с увеличением пиковой интенсивности. Поэтому за основной параметр мы приняли диаметр и во время коррекции добивались максимальной пиковой интенсивности при минимальном размере фокального пятна.

Как уже было отмечено, решением задачи фокусировки являются значения управляющих параметров U_i , при которых (5) достигает минимума. Поиск экстремума функций многих переменных является сложной математической проблемой [9]. В адаптивной оптике дело осложняется тем, что поиск экстремума необходимо проводить достаточно быстро. В противном случае вид оптимизируемой функции будет меняться в процессе поиска экстремума. К настоящему времени разработано и исследовано большое число методов оптимизации функций многих переменных. В существующих

адаптивных системах для поиска экстремума критерия используются градиентные методы.

Градиентные методы поиска экстремума функции

Итерационный характер градиентных алгоритмов хорошо согласуется с общими принципами работы систем адаптивной оптики [7]. В адаптивных системах оптимизация критерия осуществляется с помощью системы автоматического регулирования, а итерационный процесс представляет собой реальный переходный процесс в этой системе. Любой градиентный метод заключается в построении последовательности управляющих воздействий по правилу

$$U_i^{k+1} = U_i^k + h_i^k j(U_1^k, \dots, U_N^k). \quad (7)$$

Здесь $\{h_i^k\}$ – длина шага, $j(U_1^k, \dots, U_N^k)$ – градиент критерия качества J на k -м шаге итерационного процесса оптимизации. Градиентные методы, как и все итерационные методы, предполагают выбор начального приближения $\{U_i^0\}$ – исходного состояния корректора волнового фронта. При этом необходимо иметь хорошее начальное приближение, в противном случае система попадает в локальный экстремум. В общем случае в качестве начального приближения выбирается любая точка $\{U_i^0\}$. Последовательные приближения строятся по следующей схеме:

- 1) в точке U_i^k выбирают направление спуска S^k ,
- 2) находят $(k + 1)$ -е приближение по формуле $U^{k+1} = U^k + h^k S^k$.

Направление S^k выбирают таким образом, чтобы обеспечить неравенство $j(U^{k+1}) < j(U^k)$ пока не дойдем до минимума функции, после которого она начинает возрастать.

При достаточно больших абберрациях входного поля критерий качества J имеет сложную структуру, что в конечном итоге приводит к появлению локальных экстремумов, в окрестности которых система может оставаться сколь угодно долго. Одним из элементарных способов предотвращения выхода системы на локальные экстремумы является удвоение шага. Выбирают $h^k = h^{k-1}$. Если при этом $j(U^{k+1}) < j(U^k)$, то либо переходят к следующей $(k + 2)$ -й итерации, либо выбирают $h^k = 2h^{k-1}$. Если значение $j(U^{k+1})$ меньше его предыдущего значения, то процесс удвоения можно продолжать до тех пор, пока убывание не прекратится. На начальном этапе имеет смысл использовать большие $\{h_i^k\}$, что позволяет локализовать окрестность глобального минимума. Существуют различные способы выбора значений $\{h_i^k\}$. Вопрос выбора шага не может быть решен без учета шумов, т. е. нерегулярных воздействий, дестабилизирующих систему.

Шумы, влияющие на поведение системы, могут иметь различное происхождение и различаются по своим статистическим свойствам [8]. При оценке предельных возможностей различных оптических систем обычно учитывают шум, связанный с дискретной природой процесса регистрации светового поля. Как известно, флуктуации тока на выходе идеального фотоприемника удовлетворяют равенству

$$\langle i^2 \rangle = 2eI\Delta f, \quad (8)$$

где i – шумовая составляющая фототока, I – его среднее значение, e – заряд электрона, Δf – полоса регистрируемых частот. Шум, порождаемый потоком квантов, принципиально неустраним и не может быть меньше величины (8). В реальных фотоприемниках шум, как правило, превышает указанную величину, однако характер зависимости шума от среднего тока и полосы частот сохраняется. Существуют шумы и другой природы: флуктуации интенсивности излучения лазера – в этом случае мощность флуктуаций пропорциональна квадрату среднего тока

$$\langle i^2 \rangle = m^2 I^2, \quad (9)$$

где m – глубина паразитной модуляции, и флуктуации излучения за счет распространения в атмосфере. Влияние шума наиболее существенно вблизи положения оптимальной настройки корректора. Таким образом, с приближением к оптимальному состоянию системы амплитуду шага следует уменьшать, тогда система станет совершать случайные блуждания в окрестности положения настройки с малой амплитудой.

Обсудим один из самых распространенных методов, связанных с вычислением градиента, – метод покоординатного спуска, в котором на каждой итерации изменяется лишь один из компонентов. Данный метод сводит задачу поиска значения функции нескольких переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации: на каждом шаге рассматривается функция j при фиксированных значениях всех переменных, кроме i -й. На первом этапе выбирается некоторое начальное приближение $\{U_i^0\}$, шаг h , а также направление S изменения U_i . Шаги в выбранном направлении осуществляются до тех пор, пока целевая функция будет изменяться в требуемую сторону (уменьшаться в случае поиска минимума). Как только это условие нарушается, т. е. точка экстремума по направлению пройдена, делается один шаг в обратном направлении. И эта точка считается точкой экстремума по исследуемому направлению.

Таким образом, процесс коррекции лазерного излучения с использованием метода покоординатного спуска включает в себя следующие шаги:

1. Случайным образом выбирается напряжение, которое подается на все каналы управления, после чего измеряются диаметр фокального пятна и пиковая интенсивность и вычисляется целевая функция.

2. Напряжение на одном из каналов изменяется на выбранную величину h в заданном направлении S .

3. Изменение напряжения на данном канале осуществляется до тех пор, пока целевая функция будет изменяться в требуемую сторону, т. е. пока диаметр фокального пятна будет уменьшаться при одновременном увеличении пиковой интенсивности.

4. После этого осуществляется переход к следующему элементу корректора.

Взаимозависимость каналов управления (модальность корректора) приводит к тому, что все субапертуры зеркала не могут быть настроены последовательно за один цикл. Процесс коррекции может продолжаться неограниченно, в результате чего система будет асимптотически приближаться к состоянию оптимальной настройки.

Экспериментальная установка

Эффективность выбранного алгоритма исследовалась на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис. 3. Лазерный пучок диаметром 30 мм (длина волны $\lambda = 0,635$ мкм) направлялся на корректор волнового фронта (биморфное зеркало № 1). Затем излучение попадало на второе биморфное зеркало, которое использовалось в качестве фазового экрана. При подаче напряжений на электроды зеркала № 2 фаза световой волны искажалась. Биморфное зеркало № 1 имело 17 управляемых электродов. В фокальной плоскости системы располагался M^2 -датчик, с помощью которого регистрировались изображения интенсивности в фокальном пятне. Управляющие воздействия определялись согласно алгоритму (7).

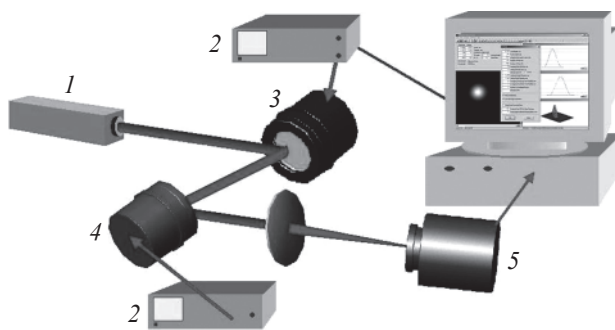


Рис. 3. Схема тестовой установки. 1 – лазер, 2 – блок управления, 3 – биморфное зеркало № 1, 4 – биморфное зеркало № 2, 5 – M^2 -датчик.

Таблица 1. Оценка частоты работы системы

Резонансная частота зеркала	5000 Гц
Реальная частота работы зеркала	$5000/10 \approx 500$ Гц
17 электродов	$500/17 \approx 30$ Гц
Вся процедура выполняется за 5–6 итераций	$30/6 \approx 5$ Гц

Таблица 2. Коррекция лазерного излучения

№ измерения	1	2	3	4	5
M_x^2	4,8	3,7	3,2	2,6	1,5
M_y^2	3,3	3,1	3,4	2,2	1,6

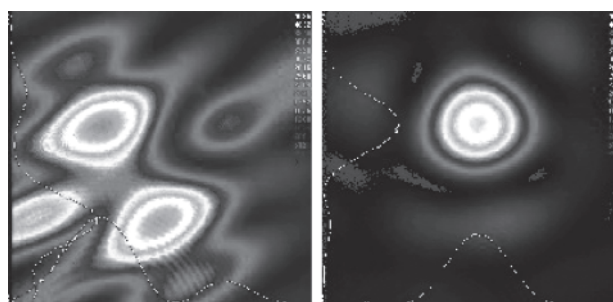
**Рис. 4.** Распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы.

Быстродействие работы всей системы определялось в первую очередь свойствами зеркала № 1, время обработки массивов распределений интенсивности на быстродействие системы не влияло, так как современное развитие компьютерной техники позволяет выполнять большое количество расчетов за сравнительно малые промежутки времени. Резонансная частота используемого зеркала составляла 5000 Гц (табл. 1). Реальная частотная полоса работы корректора в 10 раз меньше: 500 Гц. Так как мы использовали зеркало с 17-ю электродами, общая частота составит $500/17 = 30$ Гц. Вся процедура коррекции требует не менее 5–6 итераций: $30/6 = 5$ Гц. Это сравнительно медленно, но такая частота работы системы позволяет успешно компенсировать медленно меняющиеся aberrации.

Результаты

В табл. 2 приведен результат работы адаптивной системы в одном из лабораторных экспериментов. Начальное распределение интенсивности в фокальной плоскости системы представлено на рис. 4(1). После нескольких шагов работы системы параметр качества M^2 улучшился более чем в 2 раза (рис. 4(5)). Эффективность работы оценивалась по двум параметрам: значению M^2 и времени адаптации. Время сходимости системы существенно зависело от внесенных aberrаций. Так при использовании в качестве фазового экрана оконного стекла компенсация осуществлялась в течение 2–3 с.

Описанный выше подход был использован для коррекции излучения высокоомощного титан-сапфирового (TiS) лазера в Институте атомной энергетики (JAERI, Япония) (рис. 5). Данный лазер имеет фемтосекундную длительность импульсов, что обеспечивает пиковую мощность излучения на уровне около 40 ТВт. В результате проведенных экспери-

**Рис. 5.** Распределение интенсивности в дальнем поле до и после коррекции.

ментов было показано, что использование разработанной нами адаптивной системы позволяет значительно улучшить фокусировку излучения этого лазера – нам удалось сфокусировать до 75% энергии его излучения в пределах первого дифракционного максимума.

Заключение

В результате данной работы разработана адаптивная оптическая система, которая позволяет управлять рядом параметров лазерного излучения и, в частности, корректировать статические или медленно меняющиеся aberrации мощного лазерного излучения, формировать пучки с параметром качества M^2 менее 1,5.

Результаты экспериментов по использованию данной системы при работе с различными лазерами (в том числе, с тераваттными TiS-лазерами) позволяют сделать вывод о том, что методы адаптивной оптики дают возможность в значительной мере улучшить фокусировку мощного лазерного излучения. Таким образом, адаптивные оптические системы на базе M^2 -датчика могут быть рекомендованы при создании высокоомощных лазерных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baumhacker H., Pretzeler G., Witte K.J., Hegelich M., Kaluza M., Karsch S., Kudryashov A., Samarkin V., Rukosuev A. Correction of wavefront distortions and fluence profile modulation by closed-loop adaptive optics in a multi-stage TiS laser // Opt. Lett. 2002. V. 27. № 17. P. 1570–1572.
2. Wattellier B., Fuchs J., Zou J.P., Chanteloup J.C., Bandulet H., Michel P., Lobaune C., Depierreux S., Kudryashov A., Aleksandrov A. Single laser hot spot generation for laser-plasma interaction physics using a dielectric-coated bimorph deformable mirror // JOSA. B. 2003. V. 20. № 8.
3. Seldakova J.V., Cherezova T.Yu., Kudryashov A. Low-cost M^2 -sensor for the adaptive optical system // Proc. SPIE. 2002. V. 4493. P. 285–293.
4. Sheldakova Yu.V., Cherezova T.Yu., Kudryashov A.V. Analysis of the laser intensity distribution // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 367–372.
5. Document ISO/DIS 11146. International Organization for Standardization. 1996.
6. Roundy K. Propagation factor quantifies laser beam performance // Laser Focus World. 1999. V. 12. P. 119–122.
7. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. Управляемые оптические системы. М.: Наука, 1988.
8. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.
9. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980.