УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Улучшение параметров волнового фронта лазерного излучения в экспериментах на многоканальной лазерной установке нового поколения

С.А.Бельков, В.О.Васюкевич, Г.Н.Качалин, А.О.Липатов, А.Н.Маначинский, Ю.В.Шагалкин, А.В.Яхлов

Приведено описание твердотельной мощной многоканальной лазерной установки нового поколения. Представлены характеристики элементов адаптивной системы в составе восьмиканального модуля лазерной установки. Описан, исследован и апробирован метод коррекции волнового фронта на выходе усилительного тракта модуля установки с использованием полиномов Цернике. Экспериментально получены результаты коррекции «тепловых» аберраций в усилительном тракте, вызванных нагревом активных элементов, – амплитуда волнового фронта PV = 0.71 мкм и его среднеквадратичное отклонение от плоского RMS = 0.11 мкм. Приведены результаты апробации метода коррекции для остальных каналов модуля.

Ключевые слова: адаптивная система, деформир уемое зеркало, датчик волнового фронта, аберрации, полиномы Цернике.

1. Введение

В настоящее время в ряде ведущих стран мира созданы или создаются лазерные установки нового поколения с мегаджоульным уровнем энергии: NIF (США), LMJ (Франция), Shenguang IV (Китай) [1–6]. Одним из важных применений данных установок, в том числе многоканальной мощной лазерной установки мегаджоульного уровня энергии, созданной в России (рис.1), является облучение и сжатие мишеней с термоядерным топливом – проведение экспериментов по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) [7]. Для достижения «зажигания» необходимо осуществить доставку в мишенную камеру взаимодействия – место расположения мишени – 192 лазерных



Рис.1. Многоканальная лазерная установка мегаджоульного уровня для проведения исследований по ЛТС.

С.А.Бельков, В.О.Васюкевич, Г.Н.Качалин, А.О.Липатов, А.Н.Маначинский, Ю.В.Шагалкин, А.В.Яхлов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр-Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: an_lip@bk.ru

Поступила в редакцию 19 июля 2024 г., после доработки – 19 декабря 2024 г., принята в печать – 20 декабря 2024 г.

пучков с наносекундной длительностью (разделённых на 24 лазерных модуля по 8 каналов в каждом) с суммарной энергией более 2 МДж, неплоскостностью волнового фронта RMS ≤ 0.2 мкм и расходимостью излучения $\theta \leq 5 \times 10^{-5}$ рад. Для получения такой энергии лазерного излучения (ЛИ) исходный лазерный импульс задающего генератора подаётся на вход главного усилителя, использующего четырёхпроходную схему прохождения уси-



Рис.2. Оптическая схема лазерной установки.

ливаемого импульса по активной среде, которая накачивается мощными импульсными лампами накачки. Создаваемая в ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» установка представляет собой четырёхпроходный твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 1.053$ мкм. В качестве активной среды используются активные дисковые элементы (АДЭ) из фосфатного стекла, легированные ионами неодима. Усилительная система состоит из двух усилительных блоков, разделённых пространственными фильтрами. Оптическая схема лазерной установки представлена на рис.2.

В усилителе У1 располагаются 11 АДЭ, в усилителе У2 - семь таких элементов. После завершения формирования импульса задающего генератора в системе формирования опорного излучения (СФОИ) он через транспортный пространственный фильтр (ТПФ) вводится в канал главного усилителя. ТПФ представляет собой телескоп, образованный софокусно установленными линзами с фокусным расстоянием F ~ 30 м. Лазерный импульс вводится через фокальную плоскость ТПФ и направляется в сторону деформируемого зеркала (ДЗ) через кюветный пространственный фильтр (КПФ), образованный софокусно установленными линзами с фокусным расстоянием $F \sim 15$ м, через усилители У2 и У1. Затем, отразившись от ДЗ, импульс возвращается в ТПФ и с помощью зеркала, расположенного за перетяжкой по ходу пучка, выводится из ТПФ под углом 90° и направляется в реверсор. В реверсоре располагается оптический затвор Поккельса (ЗП), включающий в себя два скрещённых поляризатора и ячейку Поккельса (ЯП). Отразившись от торцевого зеркала реверсора, лазерное излучение вновь направляется в сторону ДЗ через усилители У2 и У1. Затем, после второго отражения от ДЗ, излучение в четвёртый раз проходит через усилители и направляется на выход из усилительного тракта.

После выходной линзы ТПФ расположен узел отбора. Излучение, прошедшее через узел отбора, направляется в сторону транспортных зеркал, а затем с помощью финального оптического модуля фокусируется на мишени в камере взаимодействия [8]. Излучение, отражённое от узла отбора, поступает в диагностический тракт для измерений. При этом энергия отражённого излучения примерно в 10⁴ раз меньше энергии излучения, прошедшего через узел отбора.

На протяжении всего пути, которое проходит ЛИ, располагается большое количество (более 100 с учётом четырёх проходов) оптических элементов, которые вносят фазовые искажения в лазерный пучок, увеличивая аберрации волнового фронта (ВФ). Такие аберрации называются статическими. В результате накачки активных элементов мощными лампами происходит нагрев АДЭ, что также приводит к появлению дополнительных искажений ВФ, называемых «тепловыми». Адаптивная система, применяемая на многопроходных лазерных установках нового поколения, позволяет скомпенсировать статические и «тепловые» фазовые искажения; это существенно облегчает юстировку оптического тракта, наведение на мишень, а также позволяет получить практически плоский волновой фронт (среднеквадратичное отклонение RMS ≤ 0.2 мкм, расходимость пучка $\theta \leq 5 \times 10^{-5}$ рад) на выходе из усилительного тракта, что является важным параметром при фокусировке лазерного излучения на мишень, особенно для мишеней непрямого сжатия, когда лазерный пучок облучает внутреннюю поверхность бокса, содержащего центральную капсулу с термоядерным топливом. В этом случае малая расходимость пучка обеспечивает ввод излучения в бокс через относительно небольшие отверстия. Поэтому можно утверждать, что технология управления параметрами волнового фронта излучения является ключевой в подобных установках [6].

2. Адаптивная система в составе многоканальной лазерной установки нового поколения

Регистрация, анализ и компенсация аберраций ВФ проводится с помощью адаптивной оптической системы, в состав которой входят: деформируемое зеркало (называемое также адаптивным), датчик волнового фронта (ДВФ) Шака – Гартмана, блок управления (БУ) формой поверхности адаптивного зеркала, а также система управления со специализированным программным обеспечением (два последних элемента образуют программн





Датчик волнового фронта

Комплект адаптивной системы на 1 модуль

Рис.3. Элементы адаптивной системы, применяемые на многоканальной лазерной установке.

но-аппаратный комплекс управления). Элементы адаптивной системы изображены на рис.3.

На многоканальной лазерной установке нового поколения используется адаптивная система фазового сопряжения. Плоскости расположения ДЗ и ДВФ сопряжены. Деформируемое зеркало находится за усилителем У1 (рис.2), и лазерный пучок отражается от него два раза после первого и третьего проходов через усилительный тракт. При этом система юстировки должна обеспечить отсутствие смещения пучков на деформируемом зеркале после первого и третьего проходов. Тогда каждая точка ДЗ будет сопряжена сама с собой, что обеспечит эффективную коррекцию. В многопроходной схеме с двойным отражением от ДЗ реализуется ситуация, при которой вклад данного зеркала удваивается. Таким образом, для коррекции аберраций требуется в два раза меньший прогиб зеркала по сравнению со схемой с одним отражением.

Датчик волнового фронта располагается в боксе диагностики, куда пучок поступает после отражения от узла отбора, расположенного на выходе установки. Такая схема расположения ДЗ и ДВФ типична для большинства известных лазерных установок. Лазерный пучок, прошедший через весь усилительный тракт, в котором возникают статические и «тепловые» аберрации, попадает на ДВФ. Аберрации диагностического тракта предварительно измеряются и при регистрации волнового фронта вычитаются. Таким образом, ДВФ измеряет волновой фронт пучка не в боксе диагностики, а на выходе установки.

Корректное измерение аберраций диагностического тракта является важной задачей. Например, в работах [9,10] описан метод измерения аберраций диагностического тракта при одновременном использовании двух датчиков – ДВФ и датчика, регистрирующего распределение интенсивности ЛИ в дальней зоне. Применение данного метода позволило при наличии динамических аберраций от потоков воздуха увеличить точность измерений, а также улучшить результаты коррекции и получить число Штреля S > 0.7. В нашем случае влияние динамических аберраций от потоков воздуха минимизировано, т. к. диагностический тракт находится в закрытых боксах.

По измеренному на выходе установки волновому фронту в системе управления рассчитываются напряжения, которые нужно подать на толкатели-пьезоприводы, располагаемые на тыльной стороне деформируемого зеркала для того, чтобы внести предыскажения его формы. Внесенные с помощью ДЗ предыскажения складываются со статическими и «тепловыми» аберрациями усилительного тракта, при этом на выходе формируется плоский волновой фронт. Математически работу адаптивной системы фазового сопряжения можно описать следующим образом. Из данных, полученных от пришедшего на датчик пучка, регистрируются фазовые искажения e^{iS} и определяется двумерное распределение S в показателе экспоненты. После этого формируются предыскажения в виде сопряжённого сигнала e^{-iS}, которые компенсируются под воздействием возмущающих факторов ($e^{-iS}e^{iS} = 1$) [11].

3. Элементы адаптивной системы

Деформируемое (адаптивное) зеркало имеет зеркальное интерференционное диэлектрическое покрытие с более чем 40 слоями напыления, выполненное на подложке из оптического ситалла СО115 толщиной 9 мм. (Основные технические характеристики зеркала приведены ниже.) Максимальная амплитуда корректируемых аберраций ВФ в замкнутом цикле с помощью подачи управляющих напряжений на пьезоприводы составляет 20 мкм, а в режиме ручной правки путём вращения поджимной гайки – порядка 50 мкм.

Апертура зеркала (мм)	406 × 406
Коэффициент отражения ($\lambda = 1.053$ мкм)	не менее 0.99
Лучевая прочность при $\tau = 3$ нс (Дж/см ²)	. не менее 20
Число управляющих элементов	61

Шаг подачи управляющих

напряжений (B) не более 0.1

Электромеханический гистерезис (%) не более 15

Неплоскостность поверхности ДЗ без напряжений

в пересчёте на ВФ с учётом двух отражений (мкм) . ±1* Временная нестабильность поверхности ДЗ

в пересчёте на ВФ с учётом двух

отражений (мкм/ч). не более 0.20*

^{*} Значения приведены для амплитуды PV волнового фронта.



Рис.4. Характерная гартманограмма, регистрируемая датчиком волнового фронта.

Датчик волнового фронта включает в себя ССDкамеру, линзовый растр, узел юстировки и моторизированный блок светофильтров. Линзовый растр является ключевым элементом ДВФ, который предназначен для формирования системы фокальных пятен на ССD-камере, смещения которых относительно центров субапертур растра определяются локальными наклонами ВФ. При выборе линзовых растров учитывается, что чем меньше размер линзы, тем больше число линз, размещаемых в зоне контроля датчика. При этом повышается пространственное разрешение датчика и точнее аппроксимируется измеряемый ВФ. На рис.4 показана характерная гартманограмма, регистрируемая ДВФ.

Ниже приведены основные технические характеристики ДВФ и ССD-камеры.

Технические характеристики датчика волнового фронта
Апертура пучка (мм)
Длина волны (мкм)1.053
Точность измерения амплитуды
волнового фронта (мкм) 0.1
Апертура линзового растра (мм)
Диаметр линзы растра (мм)
Фокус линзы растра (мм)
Число линз растра в пучке \hdots
Диаметр пятна на CCD-камере (мкм)

Технические характеристики ССД-камеры

Размер матрицы (мм)					1	0.	48	×	8.64
Число пикселей					.1	31	2	×	1082
Размер пикселя (мм)									8×8
Динамический диапазон (дБ)									60
Дискретность (бит)									10

Экспозиция (мкс)											
(0.83 с/50 нс шаг)											.10
Частота кадров											.54

4. Регистрация «тепловых» аберраций

D

Аберрации лазерного пучка, регистрируемые ДВФ, можно разделить на три основные составляющие: аберрации диагностического тракта, которые необходимо вычитать для получения аберраций пучка непосредственно на выходе усилительного тракта, статические аберрации усилительного тракта, обусловленные неточностью изготовления оптических элементов и их местоположения, и так называемые тепловые аберрации [12].

На измерения волнового фронта могут оказывать влияние вибрации элементов схемы, связанные с работой технологического оборудования, и колебания воздуха. Конструкции здания и оптических каналов многоканальной лазерной установки спроектированы так, что технологическое оборудование располагается в изолированных помещениях, а большая часть оптического тракта вакуумирована. Таким образом, влияние вибраций элементов схемы и колебаний воздуха минимизировано, поэтому этими аберрациями пренебрегаем.

Аберрации диагностического тракта не являются частью аберраций пучка, выходящего из усилительного тракта, поэтому их необходимо определить и вычитать каждый раз при коррекции результирующего волнового фронта, регистрируемого ДВФ. Определение аберраций диагностического тракта заключается в пропускании через него специального зондирующего пучка с минимальными (менее 1 мкм) собственными аберрациями ВФ, который заводится в селектирующую диафрагму последнего четвёртого прохода транспортного фильтра. Затем эти аберрации записываются в память управляющей программы, и дальнейшие расчёты проводятся за их вычетом.

Основными источниками статических аберраций являются неточности изготовления, позиционирования и юстировки оптических элементов усилительного тракта установки в отсутствие накачки. Низкочастотная составляющая статических аберраций может быть скомпенсирована адаптивной системой. С целью минимизации напряжений, подаваемых на пьезоприводы при финальной корректировке ВФ, а также увеличения точности юстировки лазерного канала при подготовке к эксперименту целесообразно придать начальной поверхности деформируемого зеркала такую форму, чтобы за четыре прохода по усилительному тракту результирующий ВФ на выходе усилительного тракта стал максимально плоским. Это достигается на первом этапе компенсации статических аберраций усилительного тракта при ручной настройке регулировочных гаек толкателей с обратной стороны ДЗ.

Дальнейшее повышение точности формирования плоского ВФ до значения PV ≈ 1 мкм проводится посредством подачи на пьезоприводы управляющих напряжений [13].

Тепловые аберрации возникают при прохождении лазерного излучения в эксперименте через усилители после срабатывания импульсных ламп накачки. При этом на выходе усилительного тракта формируется сильно неоднородный, расходящийся волновой фронт, по своим характеристикам не применимый для облучения мишеней.





Рис.5. Характерный расходящийся волновой фронт без работы адаптивной системы (a) и характерное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне, соответствующее расходящемуся волновому фронту (δ).

Характерный расходящийся ВФ и соответствующее распределение интенсивности ЛИ в дальней зоне показаны на рис.5. Обращает на себя внимание распределение интенсивности в дальней зоне (рис.5,б). Форма пятна фокусировки фиксирует наличие значительного астигматизма волнового фронта. Поэтому возникает необходимость регистрировать тепловые аберрации и впоследствии их компенсировать. Стоит отметить, что в зарегистрированных тепловых аберрациях содержатся не только искажения активной среды, вызванные вспышкой ламп накачки, но и искажения ВФ за счёт изменения формы поверхности ДЗ и разъюстировки оптического тракта, которые могут возникнуть за промежуток времени от момента завершения настройки адаптивной системы до момента проведения эксперимента. Это объясняет применение итеративного подхода для достижения ВФ с удовлетворительными параметрами.

Регистрация тепловых аберраций осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения следующим образом.

 Настройка экспозиции камеры ДВФ, определение положений центров тяжести пятен регистрируемой гартманограммы и расчёт поверхности ВФ. При низкой мощности юстировочного лазера или значительных перепадах в распределении интенсивности пучка неправильно подобранная экспозиция может привести к ошибкам в определении центров тяжести фокальных пятен и, соответственно, регистрируемой поверхности ВФ.

 Максимально возможное приближение ВФ к «плоскому» с помощью управляющих напряжений по непрерывному юстировочному излучению СФОИ и сохранение гартманограммы для последующего анализа и расчётов.

 Проведение эксперимента с накачкой усилителей импульсными лампами накачки (на деформируемое зеркало поданы напряжения, подобранные в предыдущем пункте), сохранение зарегистрированной гартманограммы.

После обработки гартманограммы с помощью специального программного обеспечения ВФ представляется в виде матрицы размером 40 × 40.

Для расчёта тепловых аберраций производится вычитание ВФ, полученного в п.2, из ВФ, зарегистрированного в эксперименте. Для того чтобы получить «обратные» тепловые аберрации (ВФ, который будет использован при настройке адаптивной системы в последующих экспериментах), каждый элемент матрицы нужно умножить на «–1». Характерный ВФ и распределение интенсивности в дальней зоне, получаемые в эксперименте с коррекцией адаптивной системой зарегистрированных обратных тепловых аберраций, показаны на рис.6, *а* и *б* соответственно. Здесь также обращает на себя внимание наличие остаточных аберраций в сфокусированном пучке.

5. Методы коррекции волнового фронта с применением обратных тепловых аберраций

Основным методом коррекции тепловых аберраций, возникающих при температурной деформации АДЭ, является формирование предыскажений ВФ. Поверхности ДЗ придаётся форма обратных тепловых аберраций, обеспечивающая после четырёхкратного прохождения ЛИ через усилители фазовую компенсацию аберраций, возникающих в усилительном тракте.

Чем точнее будет осуществлено приведение поверхности ДЗ к заданной форме, тем более точно будут скомпенсированы аберрации усилительного тракта и тем меньше будет отклонение ВФ от плоского на выходе установки. В одном эксперименте полностью скорректировать аберрации не удаётся, поэтому проводится серия экспериментов, в которых происходит итеративное приближение ВФ



Рис.6. Характерный волновой фронт с компенсацией тепловых аберраций (a) и соответствующее этому волновому фронту характерное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне (δ).

на выходе установки к плоскому путём вычитания из поверхности, использующейся для формирования предыскажений, недокомпенсированного ВФ, зарегистрированного в предыдущем эксперименте.

В ходе серии экспериментов с применением обратных тепловых аберраций на одном из модулей установки были получены данные, приведённые в табл.1.

Как видно из табл.1, метод итеративной коррекции с применением обратных тепловых аберраций на многоканальной лазерной установке оказался недостаточно эффективным. Причина – увеличение мелкомасштабной составляющей с каждой итерацией при вычитании волновых фронтов, из-за чего ДЗ не может сформировать предыскажения с требуемой точностью. Таким образом, с увеличением числа итераций увеличивается ошибка формирования предыскажений, что ухудшает результаты эксперимента.

Для уменьшения вклада мелкомасштабной составляющей при формировании предыскажений было предложено использовать при вычитании вместо поверхностей ВФ аппроксимирующие поверхности, полученные разложением на полиномы. Такие поверхности лучше формируются с помощью ДЗ. Для разложения можно использовать любые системы ортогональных (линейно независи-

Табл.1. Данные, полученные в ходе экспериментов с применением обратных тепловых аберраций на модуле установки.

Канал	PV (мкм)	RMS (мкм)	<i>θ</i> (рад)
Канал 1	2.75	0.4	1.2×10^{-4}
Канал 2	1.52	0.3	$1.3 imes 10^{-4}$
Канал 3	2.28	0.53	1.1×10^{-4}
Канал 4	1.88	0.32	2.8×10^{-4}
Канал 5	2.12	0.35	$8.2 imes 10^{-5}$
Канал 6	2.39	0.31	$9.0 imes 10^{-5}$
Канал 7	3.77	0.42	$1.3 imes 10^{-4}$
Канал 8	2.20	0.26	1.2×10^{-4}

мых) полиномов – Цернике, Лежандра, Лагерра и другие. Авторами было предложено осуществлять разложение по полиномам Цернике (до 10-го порядка), т.к. они описывают оптические аберрации – дефокусировку, астигматизм, кому и т.д.

Полиномы Цернике до 4-го порядка включительно приведены в табл.2. Индекс *j* обозначает номер полинома, индекс *n* – порядок полинома. Остальные полиномы Цернике до 10-го порядка представлены в работе [14].

Анализ тепловых аберраций при разложении по полиномам Цернике (рис.7) показал, что наибольший вклад в искажения АДЭ вносят полиномы до 8-го порядка включительно.

Математически метод формирования предыскажений с разложением на полиномы Цернике можно представить следующим образом. Если принять, что *X* – предыскаже-

Табл.2. Полиномы Цернике до 4-го порядка включительно.

j	n	т	$Z_n^m(\rho,\theta)$	Название аберрации
0	0	0	1	Константа
1	1	-1	$2\rho \sin\theta$	Горизонтальный наклон
2	1	1	$2\rho\cos\theta$	Вертикальный наклон
3	2	-2	$6^{1/2}\rho^2 \sin(2\theta)$	Косой астигматизм
4	2	0	$3^{1/2}(2\rho^2-1)$	Дефокусировка
5	2	2	$6^{1/2}\rho^2\cos(2\theta)$	Горизонтальный астигматизм
6	3	-3	$8^{1/2}\rho^3\sin(3\theta)$	Горизонтальный трилистник
7	3	$^{-1}$	$8^{1/2}(3\rho^3-2\rho)\sin\theta$	Горизонтальная кома
8	3	1	$8^{1/2}(3\rho^3-2\rho)\cos\theta$	Вертикальная кома
9	3	3	$8^{1/2}\rho^3\cos(3\theta)$	Косой трилистник
10	4	-4	$10^{1/2}\rho^4 \sin(4\theta)$	Косой четырёхлистник
11	4	-2	$10^{1/2}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Косой вторичный астигматизм
12	4	0	$5^{1/2}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Сферическая аберрация
13	4	2	$10^{1/2}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Горизонтальный вторичный астигматизм
14	4	4	$10^{1/2} \rho^4 \cos(4\theta)$	Горизонтальный четырёх- листник



Рис.7. Гистограмма разложения волнового фронта тепловых аберраций по полиномам Цернике.

ния в виде обратных тепловых аберраций, разложенных на полиномы Цернике, а Y – результат эксперимента (недокомпенсированный ВФ), разложенный на полиномы Цернике, тогда $\bar{X} = X - Y$ является итерацией поверхности ВФ, используемой при формировании предыскажений в следующем эксперименте.

Отработка данного метода сначала проводилась на одном из каналов модуля – канале 3. В результате пяти итераций была подобрана поверхность ВФ, которая в неизменном виде использовалась при формировании предыскажений в последующей серии экспериментов.

Экспериментальный волновой фронт, полученный на канале 3, и характерное распределение интенсивности в дальней зоне показаны на рис.8. Сравнив полученные характеристики ВФ (PV = 0.71 мкм, RMS = 0.11 мкм) канала 3 с результатами для того же канала, приведёнными в работе [13] (PV = 1.38 мкм, RMS = 0.22 мкм), можно отметить существенное улучшение параметров ВФ как по амплитуде, так и по среднеквадратичному отклонению от плоского. Также наблюдается улучшение формы фокального пятна в дальней зоне. По результатам серии из 15 экспериментов для канала 3 был выполнен расчёт параметра $w_{r,rms}$ – среднеквадратичного значения разности между одиночными последовательными результатами измерений $w_n(x, y)$ одного и того же волнового фронта и усреднённым волновым фронтом $\bar{w}_n(x, y)$ для этой серии экспериментов, представленного формулой [15]

$$w_{\rm r,rms} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{k} \left\{ \frac{\sum_{x=y} E_n(x,y) [w_n(x,y) - \bar{w}(x,y)]^2}{\sum_{x} \sum_{y} E_n(x,y)} - \left(\frac{\sum_{x=y} E_n(x,y) [w_n(x,y) - \bar{w}(x,y)]^2}{\sum_{x} \sum_{y} E_n(x,y)} \right)^2 \right\}^{1/2},$$

где $w_{r,rms}$ характеризует повторяемость (воспроизводимость) измерений; n – номер измерения; k – число измерений; $E_n(x, y)$ – распределение плотности энергии на регистраторе излучения (Дж/см²).



Рис.8. Экспериментальный волновой фронт канала 3 (а) и характерное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне (б).

Расчёты проводились в предположении, что фокальные пятна на гартманограмме не отличаются друг от друга по интенсивности, т.е. плотность энергии распределена равномерно по приёмнику лазерного излучения. В результате вычислений величина $w_{\rm r,rms}$ оказалась малой ($w_{\rm r,rms} = 0.09$ мкм), что свидетельствует о хорошей повторяемости экспериментальных волновых фронтов.

После получения таких результатов данный метод был апробирован на оставшихся каналах модуля лазерной установки. Результаты экспериментов с применением итерационного подхода и разложения по полиномам Цернике представлены в табл.3.

Табл.3. Результаты экспериментов с применением итерационного метода.

Канал	PV (мкм)	RMS (мкм)	<i>θ</i> (рад)
Канал 1	1.09	0.16	4.7×10^{-5}
Канал 2	0.93	0.14	4.4×10^{-5}
Канал 3	0.71	0.11	3.7×10^{-5}
Канал 4	0.88	0.13	4.1×10^{-5}
Канал 5	0.76	0.15	3.3×10^{-5}
Канал 6	0.78	0.13	3.8×10^{-5}
Канал 7	1.18	0.16	4.7×10^{-5}
Канал 8	1.04	0.14	4.7×10^{-5}

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что итерационный подход, включающий разложение ВФ на полиномы Цернике до 10-го порядка, позволил существенно улучшить параметры ВФ в экспериментах на выходе усилительных трактов модуля лазерной установки нового поколения, в частности существенно уменьшить расходимость излучения на выходе 8 каналов модуля установки.

Следует отметить, что если по волновому фронту, изображённому на рис.8,*a*, с помощью преобразования Фурье рассчитать распределение интенсивности излучения в дальней зоне, то получим расходимость $\theta = 2.6 \times 10^{-5}$ рад. Это значение меньше расходимости, рассчитанной по распределению интенсивности ЛИ в дальней зоне, $\theta = 3.7 \times 10^{-5}$ рад, приведённой на рис.8,*b*. Различие в расходимости можно объяснить мелкомасштабными неоднородностями, вносимыми преимущественно АДЭ, которые присутствуют в пучке и не регистрируются ДВФ.

6. Заключение

На основе анализа основных систем создаваемой во ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» лазерной установки нового поколения для проведения исследований по ЛТС определены основные типы искажений волнового фронта лазерного импульса, проходящего от задающего генератора через многопроходную усилительную систему. Представлены характеристики элементов адаптивной системы фазового сопряжения, используемой на лазерной установке для коррекции выходных характеристик лазерного излучения. Приведён алгоритм регистрации, коррекции и анализа полученных статических и тепловых аберраций. На восьми каналах модуля многоканальной лазерной установки нового поколения экспериментально получены волновые фронты тепловых аберраций, определены их форма и характеристики. Применённый метод по разложению «обратных» тепловых аберраций на полиномы Цернике и последующий анализ показали, что наибольший вклад вносят полиномы до 44 номера включительно, что соответствует 8-му порядку.

Предложен и апробирован в серии экспериментов итерационный метод коррекции тепловых аберраций, а также остаточных аберраций, включающий в себя разложение «обратных» тепловых аберраций на полиномы Цернике. По результатам 15 экспериментов на 3-м канале модуля были получены следующие параметры волнового фронта на выходе усилительного тракта: PV = 0.71 мкм, RMS = 0.11 мкм, $\theta = 3.7 \times 10^{-5}$ рад; при этом повторяемость измерений составила $w_{r, rms} = 0.09$ мкм. Данный метод также был применён ко всем восьми каналам модуля, показав свою эффективность.

- Spaeth M.L., Manes K.R., Kalantar D.H., et al. Fusion Sci. Technol., 69, 25 (2016).
- Schaffers K.I., Stolz C.J., Adams J.J., et al. Proc. SPIE, 12726 (2023); https//doi.org/10.1117/12.2684120.
- Miquel J.-L., Lion C., Vivini P. The 8th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013) (Нара, Япония, 2013); J. Phys.: Conf. Ser., 688, 012067 (2016).
- Denis V., Nicolaizeau M., Neauport J., et al. Proc. SPIE, 11666 (2021); https//doi.org/10.1117/12.2576671.
- Danson C.N., Haefner C., Bromage J., et al. *High Power Laser Sci.* Eng., 7, e54 (2019).
- Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках (М.: Техносфера, 2012).
- Belkov S.A., Garanin S.G., Shagalkin Yu.V. Proc. Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics & Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2013) (Moscow, Russia, 2013, p. 94).
- Бокало С.Ю., Гаранин С.Г., Григорович С.В. и др. Квантовая электроника, 37 (8), 691 (2007) [Quantum Electron., 37 (8), 691 (2007)].
- Котов А.В., Перевалов С.Е., Стародубцев М.В., Земсков Р.С., Александров А.Г. и др. Квантовая электроника, 51 (7), 593 (2021) [Quantum Electron., 51 (7), 593 (2021)].
- Soloviev A., Kotov A., Martyanov M., Perevalov S., Zemskov R., et al. Opt. Express, 30 (22), 40584 (2022).
- Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах (М.: ЦНИИатоминформ, 2005).
- 12. Sutton S., Erlandson A., London R., et al. Proc. SPIE, 3492, 665 (1999).
- Бельков С.А., Зималин Б.Г., Круглов П.Ю. и др. Квантовая электроника, 53 (11), 873 (2023).
- 14. Lakshminarayanan V., Fleck A. J. Mod. Opt., 58 (7), 545 (2011).
- ГОСТ Р ИСО 15367-2-2012 «Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений формы волнового фронта пучка лазерного излучения, часть 2».