

ВОЛОКОННЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

PACS 42.55.Wd; 42.60.Fc; 42.79.Np

Фазировка семиканальной непрерывной оптоволоконной лазерной системы с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма**М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, Д.Н.Синявин, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, С.В.Тютин, С.В.Хохлов, Д.А.Чапарин**

Осуществлено фазовое сложение (фазировка) семиканальной оптоволоконной лазерной системы, построенной по схеме задающий генератор–блок усилителей, с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма. Контроль модуляторов фазы на основе ниобата лития осуществляется многоканальным электронным блоком управления с микроконтроллером, обрабатывающим сигналы в режиме реального времени. Продемонстрирована динамическая фазировка лазерной системы при ширине полосы системы 14 кГц, время фазировки составило 3-4 мс.

Ключевые слова: фазовое сложение, волоконный лазер, стохастический параллельный градиентный алгоритм.

1. Введение

Максимальная энергия и яркость излучения лазера ограничиваются возможностями конкретной активной среды. При полном их использовании дальнейший рост лазерной энергии и яркости эффективно обеспечивается сложением излучения в нескольких каналах. Наиболее привлекательное решение данной задачи – создание многоканальных лазерных систем в геометрии задающий генератор (ЗГ)–блок параллельных усилителей с взаимной фазировкой излучения в каналах [1]. Один из вариантов когерентного фазового сложения связан с детектированием фаз [2]. К преимуществам этого подхода можно отнести независимость времени фазировки от числа фазированных каналов, к недостаткам – сложность архитектуры системы, высокую чувствительность к шумам. Это обусловило интерес к более простым в реализации подходам, без измерения относительной или абсолютной фазы, например к итеративному алгоритму стохастического параллельного градиентного спуска (см., напр., [3, 4]).

В настоящей работе для активной фазировки семиканальной оптоволоконной лазерной системы в геометрии ЗГ–блок параллельных усилителей используется стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм [5], использующий аналогично алгоритму СПГ спуска принцип параллельности подачи напряжения на модуляторы фазы и стохастичности первого этапа итерации. СПГ алгоритм является двухэтапной итеративной процедурой и при условии оптимизации его параметров позволяет достичь увеличения осевой яркости многоканального излучения на каждой итерации [6]. В работе [7] нами была проведена динамическая фазировка шестнадцатиканального лазерного пучка, сформированного из излучения ЗГ

без усиления. Цель настоящей работы – экспериментально продемонстрировать динамическую активную СПГ фазировку лазерной системы с семью оптоволоконными усилителями.

2. Схема эксперимента

Схема эксперимента по фазировке семиканального оптоволоконного лазера представлена на рис. 1. Задающий генератор 1 (длина волны $\lambda = 1064$ нм) собран по двухкаскадной схеме, включающей одночастотный полупроводниковый диодный лазер 2 и волоконный иттербиевый предусилитель 4 с диодом накачки 3. Иттербиевый предусилитель представляет собой волокно с двумя коаксиальными сердцевинами в единой оболочке. Внешняя сердцевина – пассивная, многомодовая (диаметр 50 мкм) – используется для ввода излучения накачки. Другая сердцевина активная, легированная ионами Yb^{3+} , одномодовая (диаметр 4 мкм). Длина волокна предусилителя около 15 м. Ширина линии излучения ЗГ, измеренная волоконным кольцевым интерферометром, равна 2.5 МГц. Мощность излучения на выходе ЗГ составляет 150 мВт, степень поляризации – 0.98.

Система деления излучения задающего генератора на усилители 6 состоит из трех каскадов делителей. Первый каскад делит излучение ЗГ на два канала, второй – на четыре, третий – на восемь. Один канал в дальнейшем не использовался. Коэффициент каждого делителя для $\lambda = 1064$ нм составляет 50/50. После системы деления излучение каждого канала заводится в оптоволоконные усилители 8, аналогичные предусилителю 4, который применялся в ЗГ. Накачка всех усилителей осуществляется лазерным диодом 15 мощностью 9 Вт через многоканальный разветвитель 7. Коэффициент усиления каждого из усилителей равен 8, мощность выходного суммарного излучения составляет около 1 Вт.

Усиленное излучение коллимируется и поступает на фазовые модуляторы 10 из кристаллов ниобата лития Z-среза с нанесёнными на их боковые поверхности электродами. Линейные размеры модуляторов равны $4 \times 4 \times 45$ мм. Модуляторы работают на основе попереч-

М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, Д.Н.Синявин, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, С.В.Тютин, С.В.Хохлов, Д.А.Чапарин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: wolf-87ph@yandex.ru

Поступила в редакцию 15 июля 2014 г.

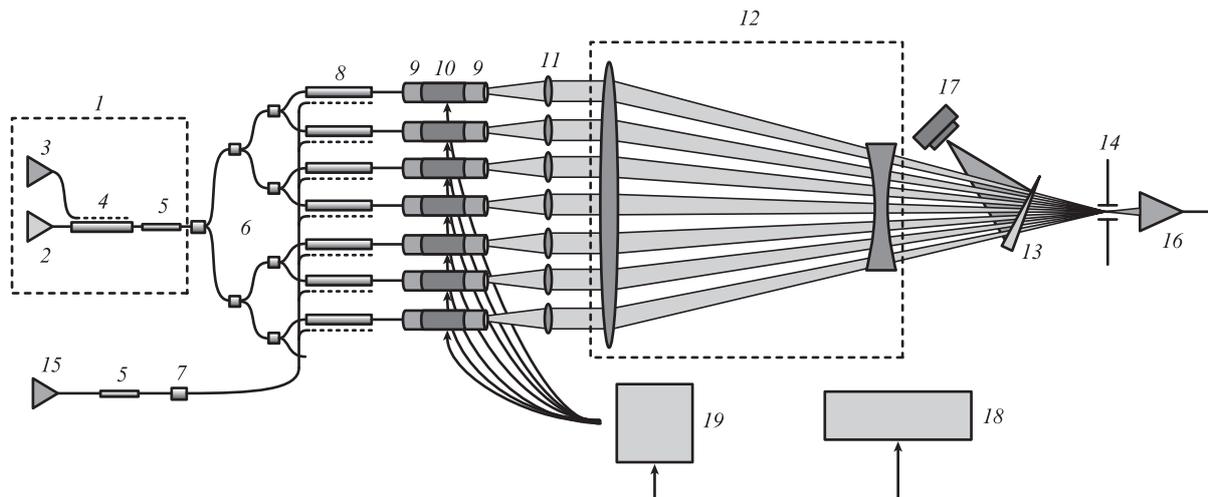


Рис.1. Схема эксперимента по фазировке семиканального оптоволоконного лазера:

1 – 3Г; 2 – одночастотный диодный лазер; 3 – диод накачки предусилителя; 4 – предусилитель; 5 – изоляторы; 6 – система деления излучения; 7 – многоканальный разветвитель; 8 – усилители; 9 – коллиматоры; 10 – фазовые модуляторы; 11 – сборка линз; 12 – двухлинзовая система; 13 – клин; 14 – диафрагма; 15 – диод накачки усилителей; 16 – фотодиод; 17 – CCD-камера; 18 – осциллограф; 19 – блок управления фазовыми модуляторами.

ного электрооптического эффекта в режиме модуляции фазы.

После фазовых модуляторов излучение поступает на семь расположенных в гексагональной упаковке линз, закрепленных в металлической оправе. На выходе линз излучение представляет собой семь плоскопараллельных пучков. Изображение ближней зоны семи лазерных пучков на выходе линз в эксперименте показано на рис.2. После коллимации излучение поступает на двухлинзовую систему 12 (рис.1) с эквивалентным фокусом 45 м. В фокусе системы линз помещается диафрагма диаметром 0.8 мм. Излучение, прошедшее через диафрагму, регистрируется фотодиодом 16. В этих условиях фотодиод регистрирует мощность семиканального излучения в угле 0.017 мрад. Для визуализации процесса часть излучения, отражённая от клина 13, поступает на матрицу CCD-камеры 17, также расположенную в фокальной плоскости двухлинзовой системы. Выходной сигнал фотодиода по-

ступает на быстродействующий 32-разрядный микроконтроллер, непосредственно встроенный в блок управления, который параллельно в соответствии с СПГ алгоритмом формирует напряжения, подаваемые на каждый фазовый модулятор. Таким образом, система фазировки является замкнутой. Тактовая частота работы системы фазировки в замкнутом цикле составила 14 кГц.

3. Результаты экспериментов и расчетов

Для фазировки излучения на выходе усилителей требуется, чтобы фазы выходного излучения в каналах были одинаковы в каждый момент времени, но не обязательно неизменны во времени. Очевидно, быстрые сдвиги фазы излучения 3Г, вызванные конечной шириной его линии, влияния не оказывают, т. к. они передаются на все усиленные каналы практически синхронно при данной длине когерентности излучения. Кроме постоянной разности фаз в каналах, вызванной различной оптической длиной пути излучения в разных участках разветвителя и различной длиной усилителей (см. рис.1), имеет место дополнительная дефазировка, которая случайным образом меняется во времени. Причина этого – наличие в оптоволоконных усилителях фазовых колебаний (фазового шума) [8]. Основными источниками фазовых колебаний являются тепловые процессы, механический резонанс, акустический и сейсмический шумы. Сразу после включения лазера наблюдаются наиболее существенные фазовые колебания с амплитудой до 20λ в полосе частот до 1 Гц. После установления режима теплового равновесия максимальная амплитуда фазовых колебаний в усилителях уменьшается до λ/3. Отметим также, что оптические неоднородности в среде распространения излучения от выхода усилителей до системы регистрации также могут приводить к дополнительной динамической дефазировке.

Результатом рассогласования фаз излучения отдельных усилителей является постоянное изменение распределения интенсивности излучения многоканального пучка в дальней зоне. Примеры такого распределения приведены на рис.3.

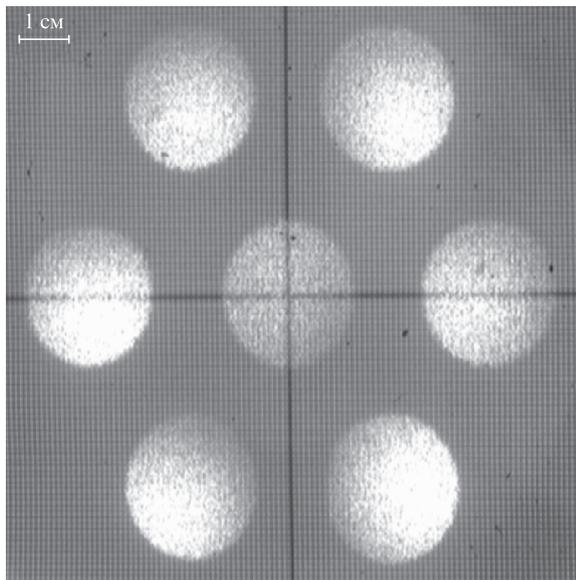


Рис.2. Изображение семи лазерных пучков на выходе линз в ближней зоне в эксперименте.

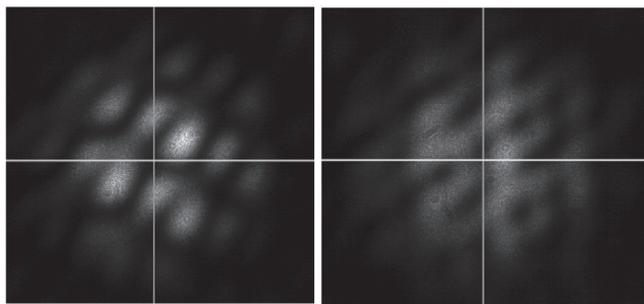


Рис.3. Примеры распределения интенсивности излучения семи волоконных лазерных каналов в дальней зоне в случае рассогласования фаз.

При включении обратной связи в системе фазировки фотодиод 15, расположенный на оптической оси в фокальной плоскости двухлинзовой системы, регистрирует мощность излучения, заключённого в малом телесном угле, и передает этот сигнал на блок управления напряжениями, подаваемыми на фазовые модуляторы. Используя это значение мощности в качестве целевой функции, система фазировки, работая в замкнутом цикле по СПГ алгоритму, должна обеспечить постоянную синфазность излучения всех лазерных каналов вне зависимости от исходных значений фазы в них. Для наибольшей скорости сходимости СПГ алгоритма определялись оптимальные его параметры [6, 7], которые использовались и в экспериментах.

Картины расчетного и экспериментального мгновенных распределений интенсивности излучения семи сфазированных каналов волоконного лазера в дальней зоне, а также соответствующие прописи по одной из координат представлены на рис.4.

Зависимость выходного сигнала фотодиода от времени при включении/выключении и в режиме паузы обратной связи показана на рис.5. Интенсивность излучения

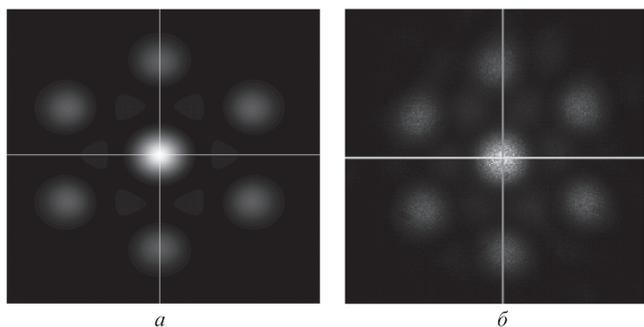


Рис.4. Расчётное (а) и экспериментальное (б) распределения интенсивности I семи сфазированных каналов оптоволоконного лазера в дальней зоне и их пропись по координате y (θ) (тонкая кривая – эксперимент, жирная кривая – расчет).

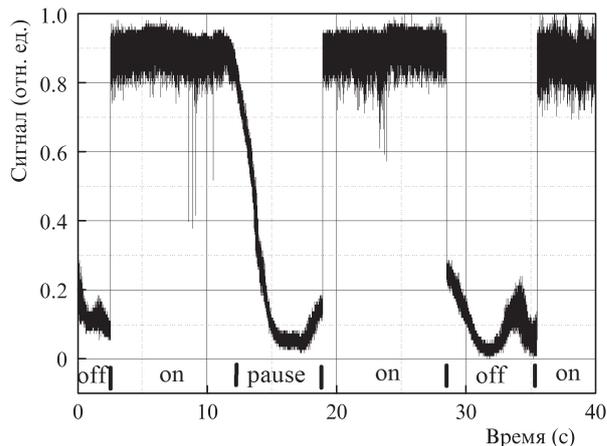


Рис.5. Зависимость выходного сигнала фотодиода от времени в процессе фазировки при включенной (on) и выключенной (off) обратной связи.

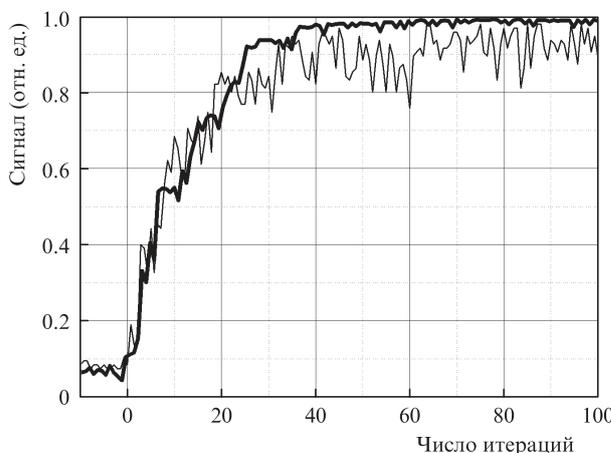


Рис.6. Экспериментальная (тонкая кривая) и расчетная (жирная кривая) зависимости выходного сигнала фотодиода от числа итераций в процессе фазировки.

(сигнал с фотодиода, расположенного на оптической оси) при включении обратной связи (режим on на рис.5) в среднем увеличивается в семь раз по сравнению со случаем дефазировки и в 49 раз по сравнению со случаем, когда работает один канал. После остановки обратной связи (режим pause на рис.5) значения напряжений на фазовых модуляторах остаются неизменными, и сигнал фотодиода падает с максимального до минимального значения за 1-3 с, т.е. излучение вновь становится дефазированным.

Экспериментальная и расчетная зависимости выходного сигнала фотодиода от числа итераций СПГ алгоритма показаны на рис.6. Нулевая итерация на рис.6 соответствует моменту времени $t = 2.562$ с (первое включение обратной связи) на рис.5. При включении обратной связи сигнал возрастает до максимального значения за 21-27 итераций СПГ алгоритма и удерживается на этом уровне, что при данной ширине полосы системы соответствует 3-4 мс. Полученные данные подтверждают результаты расчетов, приведенные в работах [6, 7].

4. Заключение

Исследована фазировка многоканальных лазерных систем в схеме одноканальный ЗГ–блок параллельных усилителей с помощью двухэтапного итеративного СПГ

алгоритма. Создан экспериментальный стенд семиканальной волоконной лазерной системы ($\lambda = 1064$ нм) мощностью около 1 Вт с модуляторами фазы на основе ниобата лития и электронным блоком управления с микроконтроллером. При ширине полосы системы 14 кГц продемонстрирована динамическая фазировка излучения семиканальной оптоволоконной лазерной системы. Время фазировки составляет 3-4 мс. Данные экспериментов находятся в хорошем согласии с результатами расчетов.

Полученные результаты показывают перспективность использования СПГ фазировки усилительных каналов при создании мощных непрерывных лазеров в геометрии одноканальный ЗГ–блок параллельных усилителей.

1. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
2. Anderegg J. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6102**, 61020U 1-5 (2006).
3. Liu L. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5895**, 58950P (2005).
4. Vorontsov M.A., Sivokon V.P. *J. Opt. Soc. Am. A*, **15**, 2745 (1998).
5. Гаранин С.Г., Маначинский А.Н., Стариков Ф.А., Хохлов С.В. *Автометрия*, **48**, 30 (2012).
6. Волков В.А., Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В., Чапарин Д.А. *Квантовая электроника*, **43** (9), 852 (2013).
7. Волков В.А., Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В. *Труды РФЯЦ ВНИИЭФ*, **19**, 404 (2014).
8. Augst S.J., Fan T.Y., Sanchez A. *Opt. Lett.*, **29**, 474 (2004).