

Динамическая фазировка многоканального непрерывного лазерного излучения с использованием стохастического градиентного алгоритма

В.А.Волков, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, С.В.Тютин, С.В.Хохлов, Д.А.Чапарин

Проведены расчетные и экспериментальные исследования фазового сложения (фазировки) многоканального лазерного пучка с помощью итеративного стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма. В расчетах исследована работа СПГ алгоритма, найден приемлемый диапазон амплитуд пробных сдвигов фазы и определены параметры алгоритма, позволяющие достичь требуемого числа Штреля за минимальное число итераций. Создан экспериментальный стенд с модуляторами фазы на основе ниобата лития, управление которыми осуществляется многоканальным электронным блоком с микроконтроллером, обрабатывающим сигналы в режиме реального времени. При ширине полосы отклика системы 3.7 кГц и тепловых искажениях фазы в полосе частот около 10 Гц экспериментально продемонстрировано фазовое сложение 16 непрерывных лазерных пучков. Данные экспериментов полностью согласуются с результатами расчетов.

Ключевые слова: фазировка многоканального непрерывного лазерного излучения, стохастический параллельный градиентный алгоритм.

1. Введение

Возможность активной когерентной фазировки излучения непрерывных лазеров (например, волоконных) привлекает внимание многих исследователей в связи с перспективой создания мощных лазерных устройств с предельно малой расходимостью (см., напр., [1–5]). При параллельном суммировании N_f лазерных каналов и увеличении энергии системы в N_f раз по сравнению с одноканальным случаем, когерентное сложение выходных пучков позволяет повысить мощность излучения в N_f^2 раз благодаря взаимной фазировке излучения в параллельных каналах [6]. В работах [7–11] сообщается о применении итерационной процедуры фазировки излучения непрерывных одномодовых лазеров, основанной на методе стохастического параллельного градиентного спуска [12]. Данный подход имеет итерационный характер и не требует определения ни фазы, ни разности фаз отдельных лазерных пучков, что является большим его преимуществом.

В настоящей работе для фазировки непрерывного многоканального лазерного излучения применяется один из вариантов вышеуказанного подхода – стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм, который используется и в адаптивной оптике [13, 14]. Цель работы – расчетно и экспериментально продемонстрировать эффективность применения СПГ алгоритма для активной фазировки многоканального пучка.

В.А.Волков, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В. Копалкин, С.М.Куликов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, С.В.Тютин, С.В. Хохлов, Д.А.Чапарин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37;
e-mail: wolf-87ph@yandex.ru, garanin@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 12 марта 2013 г., после доработки – 10 апреля 2013 г.

2. Схема СПГ-фазировки параллельных лазерных каналов

Принципиальная схема когерентной фазировки непрерывного лазерного излучения с помощью СПГ алгоритма в геометрии «одноканальный задающий генератор + система усилителей» показана на рис.1. Управление модуляторами фазы осуществляется в соответствии с СПГ-процедурой с помощью компьютера и многоканального блока управления. Небольшая часть прошедшего через усилители 4 пучка многоканального излучения отводится с помощью пластины 6 и фокусируется линзой 7 на фотоприемник 8. Фотоприемник измеряет в фокальной плоскости линзы определенную целевую функцию – осевую интенсивность, мощность излучения, прошедшего через малую приосевую диафрагму, размер пучка и т. п. СПГ алгоритм реализован в схеме «предиктор–корректор», т. е.

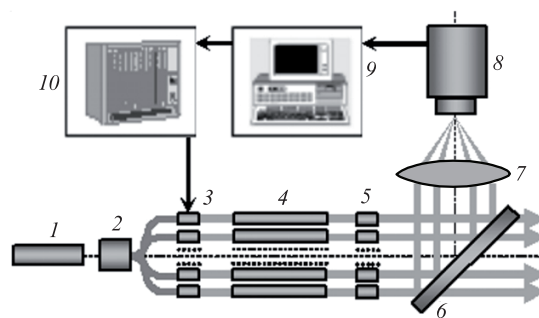


Рис.1. Схема когерентного активного фазирования волоконных лазеров с использованием СПГ-процедуры:

1 – задающий генератор; 2 – разветвитель пучка на N_f пучков; 3 – модуляторы фазы; 4 – усилители; 5 – оптические изоляторы; 6 – ответвитель излучения (светоделительная пластина); 7 – линза; 8 – фотоприемник; 9 – компьютер; 10 – многоканальный блок управления модуляторами фазы.

каждая итерация состоит из двух этапов [13, 14]. На первом этапе с помощью блока управления модуляторами фазы 10 параллельно производятся относительно малые пробные случайные малые сдвиги фазы в каналах, после чего анализируется изменение выбранной целевой функции. По результатам анализа на втором этапе параллельно осуществляются дополнительные поправочные сдвиги фазы в каналах, в результате чего целевая функция возрастает по сравнению с исходной. После коррекции регистрируется новое значение целевой функции, совершается очередная итерация и т.д., пока целевая функция, согласно некоторому критерию, не достигнет предельного значения.

3. Оптимизация СПГ алгоритма

В расчетах для определенности полагается, что блок параллельных усилителей имеет квадратную упаковку, а распределения фазы и интенсивности на выходе каждого усилителя являются однородными. Считается, что многоканальный пучок излучения на выходе имеет случайный разброс фаз по каналам с равномерным распределением фаз в интервале $[-\pi, +\pi]$, т. е. фазовый набег излучения от разветвителя до выхода усилителя в разных каналах различен и усилители в процессе работы испытывают разный нагрев. Достичь равенства фаз на выходе усилителей можно путем подачи определенных фазовых сдвигов в каналы с помощью модуляторов фазы.

Пусть после m -й итерации СПГ алгоритма мы имеем на выходе набор фаз $\varphi_n^{(m)}$ (неизвестный нам) и целевую функцию $Q_m = Q(\varphi^{(m)})$ (известную нам). На первом этапе $(m + 1)$ -й итерации вносятся случайные относительно малые сдвиги фаз в каналах $\tilde{\varphi}_n^{(m+1)} = \varphi_n^{(m)} + \delta\varphi_n^{(m)}$, где $n = 1, 2, \dots; N_f$ – номер лазерного канала. В расчетах $\delta\varphi_n^{(m)}$ принимают одинаковое по модулю (и случайное по знаку)

значение α . После первого этапа целевая функция принимает значение \tilde{Q}_m . На втором этапе $(m + 1)$ -й итерации происходит корректировка фаз: $\varphi_n^{(m+1)} = \varphi_n^{(m)} + \gamma\beta(Q_m, \tilde{Q}_m) \times \delta\varphi_n^{(m)}$, где $\gamma = \text{const}$, а β зависит от значений целевой функции [15]. В работе [15] показано, что при $\delta\varphi_n^{(m)} < 1$ и $\Delta\varphi_n^{(m)} = \gamma\beta\delta\varphi_n^{(m)} < 1$ каждый шаг итерационного процесса приводит к возрастанию целевой функции. Величины $\delta\varphi_n^{(m)}$ и $\Delta\varphi_n^{(m)}$ определяют параметры α и γ соответственно; их правильный выбор важен для сходимости СПГ алгоритма. Например, при фиксированном α имеется оптимальное значение γ , которое обеспечивает минимальное количество итераций для достижения заданного числа Штреля.

Процедура определения оптимального параметра γ была проведена для 4-, 9- и 16-канального лазерного пучка [15]. В качестве целевой функции была выбрана осевая мощность суммарного излучения. Оптимальное значение γ определялось после усреднения зависимости осевой мощности излучения от номера итерации по множеству (1000) реализаций исходного распределения фаз в каналах на выходе усилителей. На рис.2,а и б показаны расчетные зависимости оптимального значения γ от α , а также среднего числа итераций $\langle N \rangle$ при оптимальном значении γ , которое необходимо для получения числа Штреля 0.8 и 0.9 для 9-канального пучка. Число Штреля $St = Q_n/Q_{\text{max}}$, где Q_n – осевая мощность суммарного излучения на n -й итерации; Q_{max} – осевая мощность сфазированного излучения. Аналогичные результаты для случая 16 каналов показаны на рис.2,в и г.

Как видно из рис.2,а и в, зависимость оптимального значения γ от пробного фазового сдвига α слабо связана с числом каналов. Согласно рис.2,б и г среднее число итераций $\langle N \rangle$ минимально при малых α и слабо зависит от этого параметра. С увеличением α значение $\langle N \rangle$ начинает расти и эффективность СПГ алгоритма снижается. Зависимость среднего числа итераций, необходимого для до-

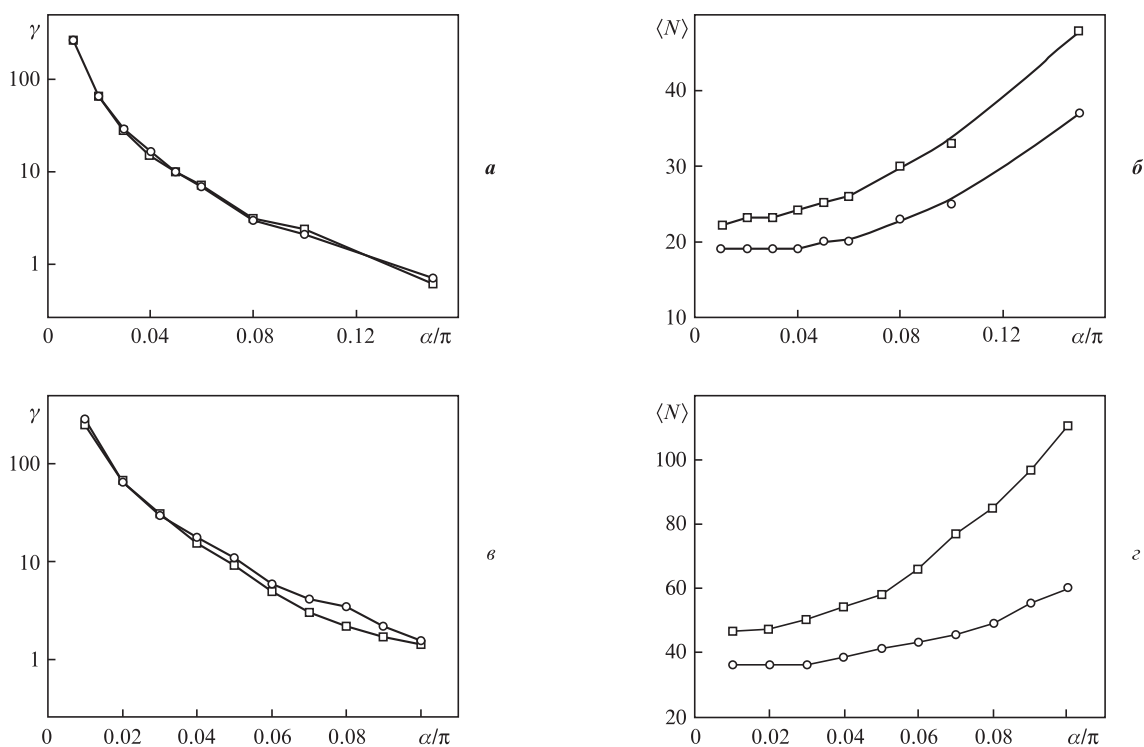


Рис.2. Усредненная зависимость оптимального значения γ (а, в) и среднего числа итераций $\langle N \rangle$ (б, г), требуемых для достижения заданного числа Штреля 0.9 (□) и 0.8 (○), от сдвига фазы α для 9- (а, б) и 16-канального (в, г) лазерного пучка.

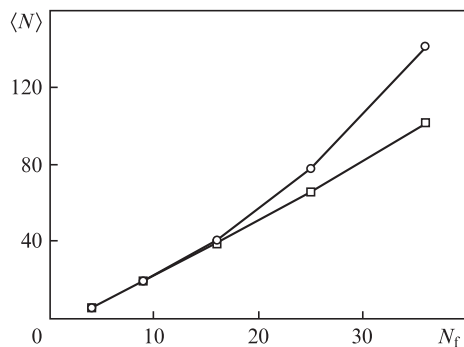


Рис.3. Зависимость среднего числа итераций $\langle N \rangle$, требуемых для достижения числа Штреля 0.8, от числа фазиремых каналов N_f при $\alpha = 0.05\pi$ (о) и 0.03π (□).

стижения числа Штреля 0.8, от числа каналов при разных α показана на рис.3. При $\alpha = 0.05\pi$ оптимальное значение γ было равно 10, при $\alpha = 0.03\pi$ оно составило 30.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что оптимальным параметром фазировки многоканального лазерного излучения с использованием СПГ алгоритма является диапазон амплитуды пробного фазового сдвига α от 0.01π до 0.04π . При этом скорость сходимости для достижения требуемого числа Штреля максимальна, и наблюдается линейный рост числа итераций с числом фазиремых лазерных каналов. Выбор α менее 0.01π в эксперименте проблематичен, т. к. изменение целевой функции на первом этапе итерации может быть меньше уровня шумов.

4. Фазовое сложение 16 лазерных пучков в эксперименте

Экспериментальная демонстрация работы СПГ алгоритма при наличии нестационарных оптических искажений проводилась для лазерного пучка, состоявшего из 16 каналов [16]. Изменение фазового набега в канале производилось подачей на каждый модулятор фазы напряжений от многоканального блока управления. Случайные сдвиги напряжения, подаваемые на модуляторы фазы на первом этапе итерации, в экспериментах принимали значения $\pm \Delta U$, т. е. были одинаковыми по абсолютному значению, но имели случайный знак. Схема эксперимента по фазовому сложению 16 непрерывных лазерных пучков показана на рис.4.

Излучение непрерывного лазера 1 ($\lambda = 532$ нм, мощность $P = 200$ мВт, ширина линии $\delta\lambda = 0.0057$ нм, длина когерентности ~ 5 мм) после расширения и коллимации

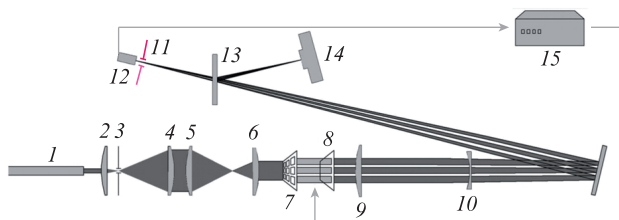


Рис.4. Схема эксперимента по фазовому сложению 16 непрерывных лазерных пучков:

1 – непрерывный лазер; 2, 4, 5, 6 – линзы; 3 – диафрагма; 7 – непрозрачный экран, формирующий пучок; 8 – сборка фазовых модуляторов; 9, 10 – двухлинзовая фокусирующая система; 11 – диафрагма; 12 – фотодиод; 13 – светоделительная пластина; 14 – CCD-камера; 15 – блок управления.

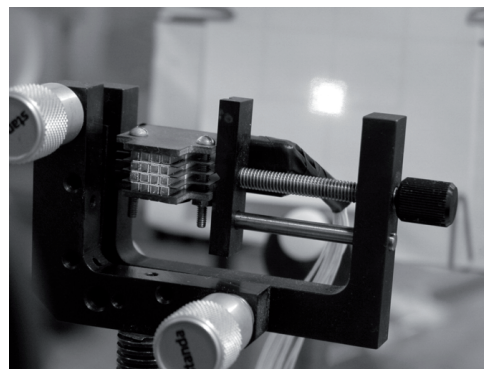
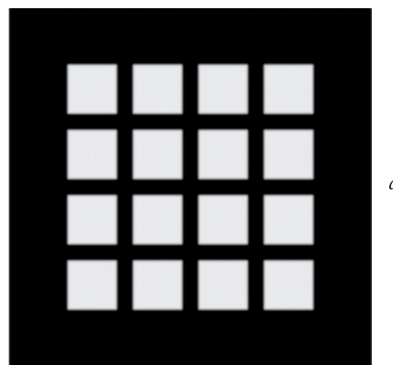


Рис.5. Экран (а) и 16-канальная сборка фазовых модуляторов (б).

проходит через непрозрачный экран 7 с 16 отверстиями размером 2×2 мм в квадратной упаковке с зазором между отдельными отверстиями 0.4 мм (рис.5,а), в результате чего формируется 16-канальный пучок. Далее многоканальное излучение попадает на сборку из 16 фазовых модуляторов 8 на основе кристалла LiNbO_3 . Размер модулятора $2 \times 2 \times 20$ мм, геометрия сборки модуляторов аналогична геометрии отверстий на экране (рис.5,б).

Линзы 9 и 10 (фокусные расстояния $f_1 = 750$ мм и $f_2 = -120.2$ мм соответственно) образовывали двухлинзовую систему с эквивалентным фокусным расстоянием $F_{\text{eqv}} = f_1 f_2 / (f_1 + f_2 - d) = 20$ м и расстоянием между линзами $d = 635$ мм. Для визуализации процесса светоделительное зеркало 13 отводило часть излучения на матрицу CCD-камеры 14. Изначально фазы отдельных пучков рассогласованы, и распределение интенсивности суммарного пучка в дальней зоне имеет случайный характер.

Распределение мощности излучения суммарного пучка в дальней зоне регистрировалось CCD-камерой, его полная мощность – фотодиодом 12, который находился за диафрагмой 11 диаметром 1 мм, помещенной в фокальную плоскость фокусирующей системы линз 9, 10. В этих условиях фотодиод регистрировал мощность излучения, содержащуюся в угле 3.85×10^{-5} рад при дифракционной расходимости сфазированного пучка 1.13×10^{-4} рад, которая и служила целевой функцией. Такой выбор целевой функции в эксперименте более целесообразен в связи с тем, что она, как величина интегральная, менее зашумлена по сравнению с осевой мощностью – локальной характеристикой пучка. Сигнал с фотодиода поступал на осциллограф для визуализации процесса фазировки и на вход микроконтроллера, который выдавал команды блоку управления, подающему напряжения на каждый из фазовых модуляторов. Таким образом, система являлась замкнутой.

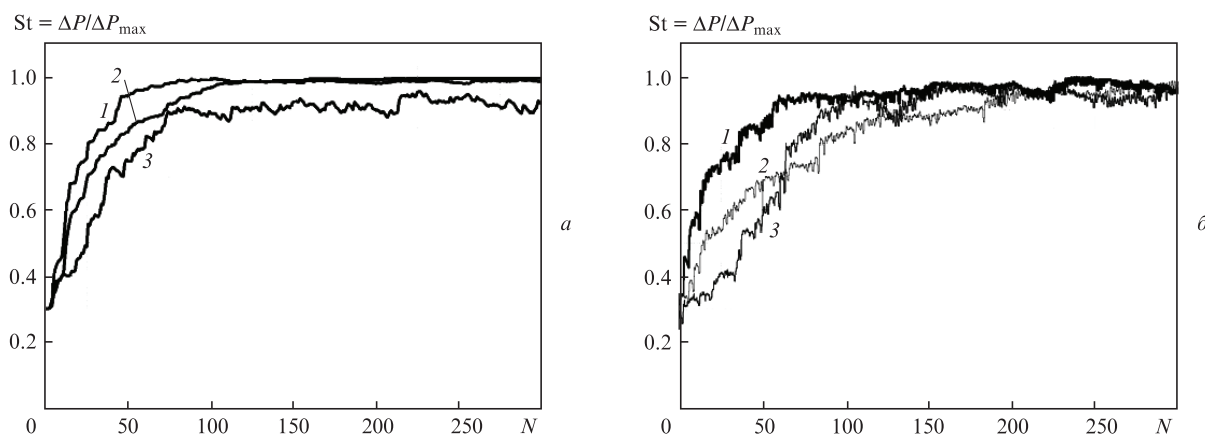


Рис.6. Зависимость числа Штреля от количества итераций при шаговом напряжении $\Delta U = 4$ В (фазовый сдвиг $\alpha = 0.027\pi$) и $\gamma = 25$ (1), 15 (2), 35 (3) в расчете (а) и эксперименте (б).

В широкоапертурную (100×100 мм) часть параллельного пучка, расположенную между линзами 4 и 5, от тепловентилятора направлялся теплый поток воздуха, создающий турбулентные атмосферные искажения. Подавая напряжение на фазовые модуляторы в соответствии с СПГ-процедурой, можно добиться полной компенсации искажений. Стоит отметить, что если в эксперименте СПГ алгоритм приволил к превышению предельного напряжения (± 300 В) на каком-либо из модуляторов, то, чтобы остаться в пределах динамического диапазона, на данном модуляторе автоматически осуществлялся скачок напряжения в обратном направлении, приводящий к изменению фазы на 2π . В этом случае изменения фазы в канале, которое могло бы повлиять на работу алгоритма, не происходит, а требуемое изменение напряжения остается в доступном для данного блока управления диапазоне и может далее как увеличиваться, так и уменьшаться.

Экспериментальные и расчетные результаты для 16-канального лазерного пучка, полученные при шаговом напряжении на первом этапе каждой итерации $\Delta U = 4$ В, что отвечает фазовому сдвигу $\alpha = 0.027\pi$ для $\lambda = 0.532$ мкм, показаны на рис.6. Параметр γ брался различным вблизи оптимального значения $\gamma = 25$ для сдвига $\alpha = 0.027\pi$ (см. рис.2,б). Здесь число Штреля $St = \Delta P_n / \Delta P_{max}$, где ΔP_n – мощность суммарного излучения, прошедшего через диафрагму на n -й итерации; ΔP_{max} – мощность сфазированного излучения.

Из рис.6 видно хорошее согласие расчета с экспериментом. При данной конфигурации оборудования время одной итерации составляет 0.28 мс. Для достижения числа Штреля $St = 0.8$ при $\alpha = 0.027\pi$ требуется 37 итераций, что занимает около 10 мс. Видно, что при отклонении параметра γ от оптимального значения $\gamma = 25$ количество итераций, необходимых для обеспечения сходимости СПГ алгоритма, растет.

На рис.7 приведены расчетные и экспериментальные зависимости числа Штреля при шаговом напряжении $\Delta U = 8$ В, соответствующем фазовому сдвигу $\alpha = 0.053\pi$. Видно, что при увеличении фазового сдвига на первом этапе итерации время фазировки, как и предсказывают расчеты, растет, увеличиваясь до 12 мс, что соответствует 44 итерациям.

После экспериментальной оптимизации СПГ алгоритма по параметрам γ и α была проведена динамическая компенсация тепловых фазовых искажений, характерная частота которых не превышала 10 Гц. Ширина полосы системы управления составила 3.7 кГц. Процесс компенсации иллюстрируют рис.8 (распределение мощности пучка в дальней зоне на CCD-камере) и рис.9 (динамика изменения целевой функции, т.е. доли мощности пучка в малом угле в дальней зоне, в течение 50 с).

При неработающей системе управления в дальней зоне наблюдается постоянно меняющаяся картина, характерная для расфазированного излучения (см. рис.8,а),

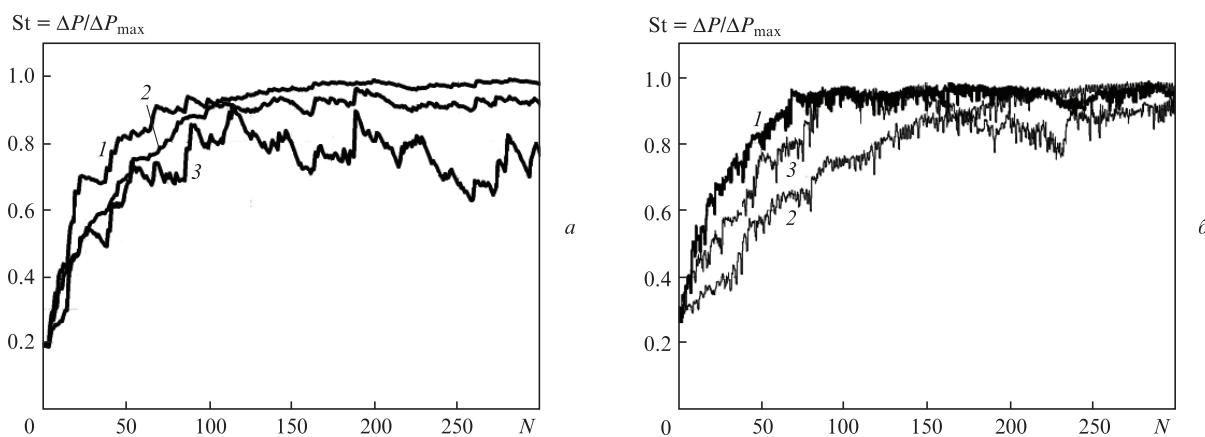


Рис.7. Зависимость числа Штреля от количества итераций при шаговом напряжении $\Delta U = 8$ В (фазовый сдвиг $\alpha = 0.053\pi$) и $\gamma = 9$ (1), 4 (2), 14 (3) в расчете (а) и эксперименте (б).

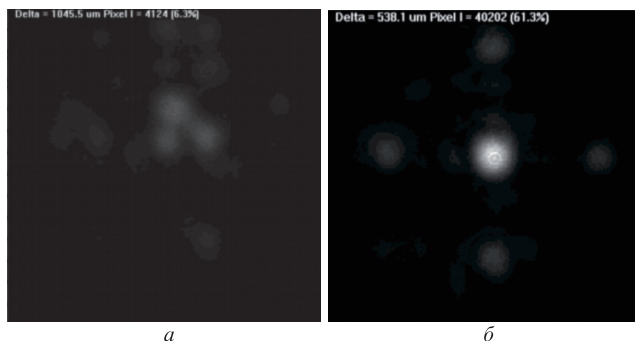


Рис.8. Мгновенная картина многоканального лазерного пучка в дальней зоне без компенсации (а) и с компенсацией (б) тепловых фазовых искажений.

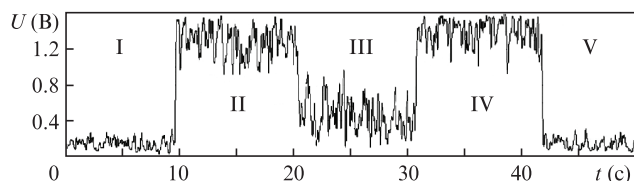


Рис.9. Осциллограмма сигнала фотодиода при различных режимах работы СПГ алгоритма: обратная связь выключена (I, V), включена (II, IV), приостановлена (III).

поэтому сигнал, регистрируемый в дальней зоне фотодиодом, минимален (рис.9). При включении СПГ алгоритма, т. е. обратной связи, осевая мощность излучения увеличивалась почти на порядок и многоканальный лазерный пучок фазировался (рис.8,б и 9). В режиме паузы, когда управляющие напряжения на модуляторах фиксируются в определенный момент и далее не изменяются, статическая дефазировка каналов устраняется, а ее динамическая компонента продолжает искажать картину пучка. Последующее включение СПГ алгоритма приводит к росту интенсивности до максимума.

5. Заключение

Таким образом, с помощью двухэтапного итерационного СПГ алгоритма проведены расчетное и экспериментальное исследования фазировки многоканального лазерного излучения при наличии динамических искажений фазы в каналах. На первом этапе каждой итерации производятся параллельные пробные фазовые сдвиги в каналах и измеряется соответствующее значение целевой функции (осевой мощности многоканального излучения или доли его мощности в заданном малом угле), на вто-

ром этапе на основе измеренного значения целевой функции проводится параллельная коррекция фазовых сдвигов. Рассчитан оптимальный диапазон амплитуды пробных фазовых сдвигов и соответствующие ему не зависящие от числа каналов оптимальные параметры СПГ алгоритма, при которых скорость сходимости максимальна. Создан экспериментальный стенд для фазировки 16-канального пучка непрерывного лазера ($\lambda = 532$ нм) с модуляторами фазы на основе ниобата лития и электронным блоком управления с микроконтроллером. При ширине полосы отклика системы управления 3.7 кГц продемонстрировано фазовое суммирование 16-канального пучка непрерывного лазера с турбулентными искажениями фазы в каналах в полосе частот около 10 Гц. Экспериментально показано, что оптимальные параметры СПГ алгоритма обеспечивают максимальную скорость сходимости. Данные экспериментов находятся в хорошем согласии с результатами расчетов.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования СПГ-фазировки усилительных каналов при создании мощных непрерывных лазеров в геометрии «одноканальный ЗГ + система усилителей». Отметим, что описанный подход может быть использован для коррекции излучения широкого класса непрерывных лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-00397-а).

1. Fan T.Y. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 567 (2005).
2. Brusselbach H. et al. *Opt. Lett.*, **30**, 1339 (2005).
3. Huo Y., Cheo P.K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **22**, 2345 (2005).
4. Greem B., Won B. Roh, Alley T.G. *Opt. Lett.*, **30**, 2415 (2005).
5. Augst S.J. et al. *Opt. Lett.*, **29**, 474 (2004).
6. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
7. Liu L. et al. *Proc. SPIE Int.Soc. Opt. Eng.*, **5895**, 58950P (2005).
8. Yu C.X. et al. *Electron. Lett.*, **42**, 1024 (2006).
9. Kansky J.E. et al. *Proc. SPIE Int.Soc. Opt. Eng.*, **6306**, 63060G (2006).
10. Liu L. et al. *Proc. SPIE Int.Soc. Opt. Eng.*, **6708**, 67080K (2007).
11. Жоу П., Ванг К., Ли К. и др. *Квантовая электроника*, **39**, 981 (2009).
12. Vorontsov M.A., Sivokon V.P. *J. Opt. Soc. Am.*, **15**, 2745 (1998).
13. Гаранин С.Г., Маначинский А.Н., Стариков Ф.А., Хохлов С.В. *Автометрия*, **48**, 30 (2012).
14. Garanin S.G., Khokhlov S.V., Manachinsky A.N., Starikov F.A. *Advances in Science and Technology* (Switzerland: Trans Tech. Publ., 2013, vol. 82, p. 75).
15. 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* (2013) (в печати).
16. Tyutin S.V., Dolgoplov Yu.V., Kopalkin A.V., et al. *Techn. Program 15th Intern. Conf. Laser Optics "LO-2012"* (St.Petersburg, 2012, ThR4-p18, p. 57).