

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗИРОВКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ГРАДИЕНТНОГО АЛГОРИТМА

С. В. Тютин, М. В. Волков, С. М. Куликов, С. Н. Носов, С. В. Хохлов, Д. А. Чапарин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Возможность активной когерентной фазировки излучения параллельных непрерывных лазеров (например, волоконных) привлекает внимание многих исследователей в связи с перспективой создания мощных лазерных устройств с предельными значениями их расходимости. При параллельном сложении  $N_f$  волоконных лазерных каналов и увеличении энергии системы в  $N_f$  раз по сравнению с одноканальным случаем когерентное сложение выходных пучков позволяет повысить яркость излучения до  $N_f^2$  раз из-за роста общей апертуры системы. Но реализовать последнее условие можно только при условии строгой взаимной фазировки излучения в параллельных каналах. Общая идея этого подхода заключается в использовании пучка излучения с большой длиной когерентности, который делится на несколько пучков, каждый из которых усиливается в отдельном усилителе. Усиленные пучки фазированы между собой, что приводит к повышению яркости суммарного излучения в среднем в  $N_f$  раз по сравнению с нефазированной конфигурацией тех же пучков излучения.

Типичная принципиальная схема когерентной фазировки на примере лазеров на оптическом волокне показана на рис. 1. Она включает задающий генератор 1, разветвитель пучка на  $N$  пучков 2,  $N$  модуляторов фазы 3 на входе усилителей,  $N$  усилителей 4, оптические изоляторы 5, ответвитель излучения 6, роль которого может играть светоделительная пластина, линза 7, фотоприемник 8, компьютер 9, блок управления входными модуляторами фазы 10.

Выходное излучение лазера линзой 7 фокусируется на фотоприемник, и проводится анализ его выходного сигнала. Смысл анализа сводится к максимизации некоторого функционала (функции многих переменных, количество которых равно числу фазированных каналов), который называется целевой функцией или метрикой. Целевая функция определяется на основе логики решаемой задачи. Ею может быть осевая яркость излучения, доля мощности в некотором угле, энергетический радиус пучка, одна из функций резкости и т. п. В случае фазировки в качестве целевой функции в расчетах целесообразно выбрать осевую яркость излучения, а в реальных экспериментах – долю мощности в некотором малом угле с тем,

чтобы снизить влияние флуктуаций плотности потока излучения. Многоканальный блок напряжений формирует набор напряжений, подаваемых на каждый из модуляторов, что позволяет изменять фазу излучения в отдельном пучке. При приближении в изменении напряжений на модуляторах возможна полная фазировка излучения отдельных пучков и, как следствие, увеличение осевой яркости суммарного пучка до предела, определяемого дифракционной расходимостью на его суммарной апертуре.

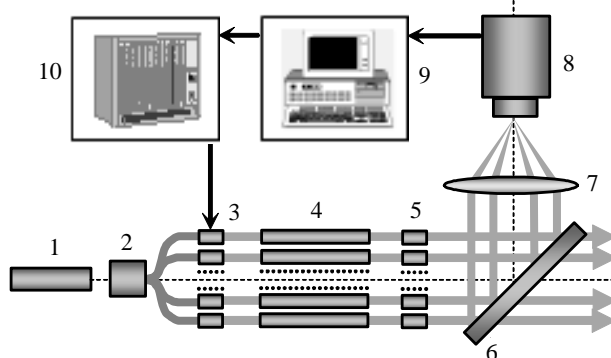


Рис. 1. Схема когерентной активной фазировки волоконных лазеров с использованием СПГ-процедуры: 1 – задающий генератор; 2 – разветвитель пучка; 3 – модуляторы фазы; 4 – усилители; 5 – оптические изоляторы; 6 – делитель пучка; 7 – линза; 8 – фотоприемник; 9 – компьютер; 10 – многоканальный блок напряжений

В работе представлены результаты экспериментальных исследований фазировки лазерных пучков с помощью модернизированной системы управления напряжением, подаваемым на фазовые модуляторы из ниобата лития. С помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма (СПГ-алгоритма) осуществлена итеративная динамическая фазировка 16 лазерных пучков. Работа системы фазировки обеспечивалась программным обеспечением, позволявшим анализировать регистрируемую фотоприемником мощность излучения на оптической оси, и, в соответствии с алгоритмом, используя многоканальный блок напряжений, в замкнутом цикле вырабатывать необходимые для фазировки наборы напряжения на фазовых модуляторах.

Модернизированная система управления блоком напряжений позволяет работать на частоте до 3,7 кГц. При этом время фазировки занимает 40 мс. Такие параметры позволяют проводить динамическую фазировку многоканального лазерного пучка и корректировать фазовые искажения по апертуре пучка, возникающие вследствие прохождения им протяженных воздушных трасс.

## Экспериментальные результаты фазировки многоканального лазерного пучка

### Схема эксперимента и экспериментальная отладка СПГ-алгоритма

Экспериментальная схема СПГ-фазировки показана на рис. 2.

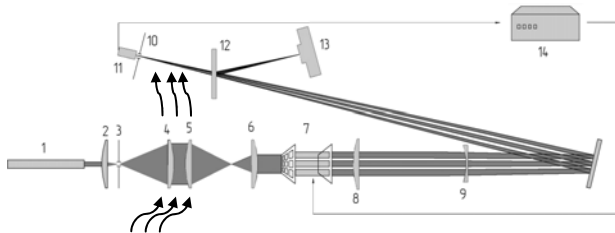


Рис. 2. Оптическая схема эксперимента: 1 – непрерывный лазер  $\lambda = 532$  нм, длина когерентности 5 мм; 2–6 – система формирования лазерного пучка; 7 – сборка фазовых модуляторов; 8, 9 – двухлинзовая фокусирующая система; 10 – диафрагма; 11 – фотодиод; 13 – CCD-камера; 14 – многоканальный блок напряжений

Излучение лазера VD-IIIА ( $\lambda = 532$  нм, мощность  $P = 200$  мВт, ширина линии  $\delta\lambda = 0,057$  нм, длина когерентности  $\sim 5$  мм) после расширения и коллимации проходило через многоканальную оптическую сборку, состоящую из 16 фазовых модуляторов на основе  $\text{LiNbO}_3$  с подведенными к боковым поверхностям электродами. Линзы 8 и 9 (фокусные расстояния  $f_1 = 1000$  мм и  $f_2 = -120,2$  мм соответственно), образовывали двухлинзовую систему с эквивалентным фокусом 26 м ( $F_{\text{экв}} = f_1 f_2 / (f_1 + f_2 - d)$ ,  $d = 740$  мм – расстояние между линзами). Клин 12 ( $R = 4\%$ ) отводил часть излучения на CCD матрицу камеры GenTec Veamage Focus II для визуализации процесса. Основная часть излучения проходила через клин 12 и поступала на фотодиод через диафрагму 10 диаметром 1 мм. В этих условиях фотодиод регистрировал мощность излучения, содержащуюся в угле  $3,85 \times 10^{-5}$  рад при дифракционной расходимости сфазированного пучка  $1,13 \times 10^{-4}$  рад. И фотодиод 11, и камера 13 располагались в фокальной плоскости двухлинзовой системы. Сигнал фотодиода поступал на осциллограф для визуализации процесса фазировки и на вход микроконтроллера, который выдавала команды для блока питания, подающего независимые напряжения на каждый фазовый модулятор. Таким образом, система является замкнутой.

Модуляторы имели размеры  $2 \times 2 \times 20$  мм, зазор между отдельными модуляторами равнялся 0,4 мм. Оптическая сборка, состоящая из фазовых модуляторов, делила излучение лазера на 16 независимых пучков.

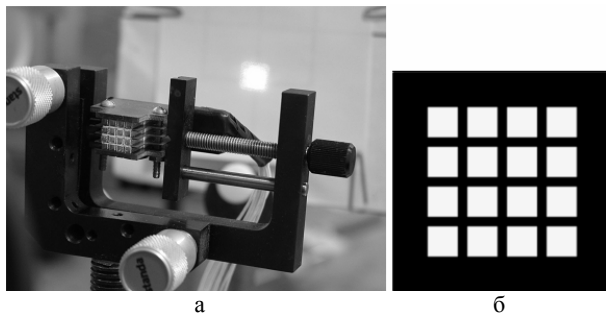


Рис. 3. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) 16-канальной сборки

Изначально фазы отдельных пучков были рассогласованы таким образом, что дальняя зона суммарного пучка имела вид случайного распределения.

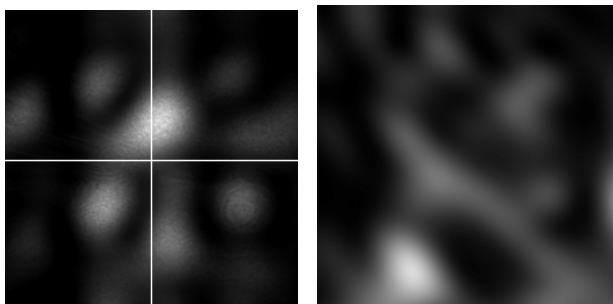


Рис. 4. Типичные распределения интенсивности излучения дефазированной 16-канальной системы в дальней зоне

Подавая напряжение на фазовые модуляторы в соответствии с СПГ-процедурой, можно добиться полной фазировки системы. Расчетное и полученное в эксперименте распределение интенсивности в пучке в дальней зоне при достижении полной фазировки показано на рис. 5. Центр рисунка соответствует положению оптической оси системы.

Лазерный пучок, направляемый на сборку фазовых модуляторов, формировался двумя телескопами, составленными из линз 2, 4 и 5, 6. В отдельных экспериментах в широкоапертурную ( $100 \times 100$  мм) часть параллельного пучка, расположенную между линзами 4 и 5, направлялся теплый поток воздуха от тепловентилятора. Направленный поперек пучка поток создавал турбулентные завихрения, моделировавшие атмосферные искажения, и максимально изменял фазу между отдельными каналами.

Блок питания модуляторов позволяет изменять значения напряжений для каждого канала в пределах от  $-300$  до  $+300$  В. Это значение является близким к значению, соответствующему сдвигу фазы на  $2\pi$ . Возможна ситуация, при которой требуемое значе-

ние сдвига фазы в канале еще не наступило, а предел напряжения, подаваемого на него, уже достигнут. В этом случае алгоритм все равно фазировал систему из 16 пучков, подогнав значения фазы в остальных каналах к значению фазы в канале, в котором достигнуто предельное значение напряжения.

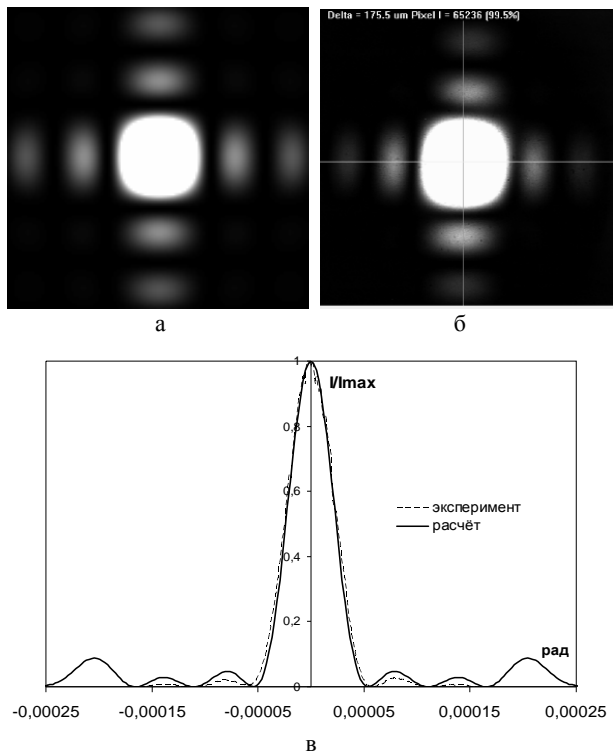


Рис. 5. Расчетное (а) и экспериментальное (б) распределения суммарной интенсивности в дальней зоне 16 сфазированных лазерных пучков и сечение распределений по оси  $x$  (в)

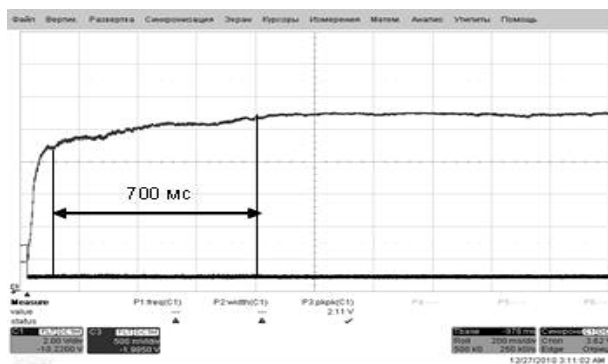


Рис. 6. Выходной сигнал фотоприемника, соответствующий процессу фазировки при достижении предельного значения напряжения на одном из каналов

Но на это требовались дополнительные итерации, и, следовательно, увеличивалось и время фазировки.

На рис. 6 показана осциллограмма выходного сигнала фотоприемника, показывающая процесс фазировки во времени для этого случая. Из приведен-

ной осциллограммы видно, что максимальная интенсивность на оси пучка достигалась примерно через 700 мс после начала работы алгоритма фазировки – это время, необходимое для того, чтобы алгоритм установил значения напряжений на других модуляторах в пределах допустимого диапазона, при которых фаза во всех каналах одинакова.

Чтобы уменьшить время, необходимое для фазировки, в работу контроллера с помощью программатора были внесены изменения. Суть их заключается в том, чтобы при достижении предельного значения напряжения на каком либо из каналов на нем автоматически осуществлялся скачок напряжения в обратном направлении, приводящий к изменению фазы на  $2\pi$  ( $U_{2\pi}$ ). В этом случае изменения фазы в канале, которое могло бы повлиять на работу алгоритма, не происходит, а величина требуемого напряжения остается в доступном для данного блока управления диапазоне и может изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения своего значения.

Для того, чтобы внести в программу алгоритма поправку, учитывающую описанную выше особенность, необходимо знать значения напряжения  $U_{2\pi}$  для каждого отдельного модулятора.

Это значение было определено экспериментально. Для этого были выбраны два канала в центре сборки, через которые проходило излучение. В дальней зоне наблюдались интерференционные полосы (рис. 7).

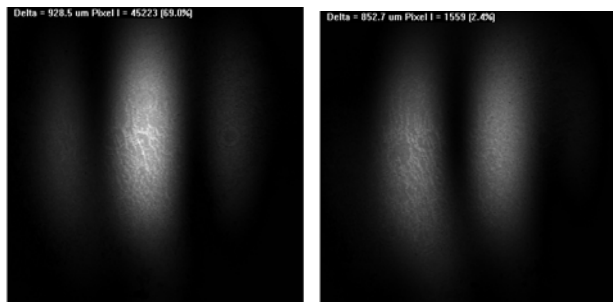


Рис. 7. Изображение дальней зоны при интерференции излучения двух каналов

При подаче напряжения на один из каналов положение полос изменяется. Шаг напряжения, при котором белая полоса, расположенная на оптической оси системы, будет полностью замещена соседней белой полосой, и соответствует изменению фазы на  $2\pi$ .

Для точного измерения величины напряжения, соответствующего сдвигу фазы в канале на  $2\pi$ , измерялась зависимость выходного сигнала фотодиода от величины напряжения, подаваемого на модулятор. Была получена осциллограмма, на которой один канал показывает изменение напряжения (подаваемого на фазовый модулятор) во времени, а другой – изменение интенсивности излучения на оптической оси в дальней зоне.

## Динамическая фазировка многоканального лазерного пучка

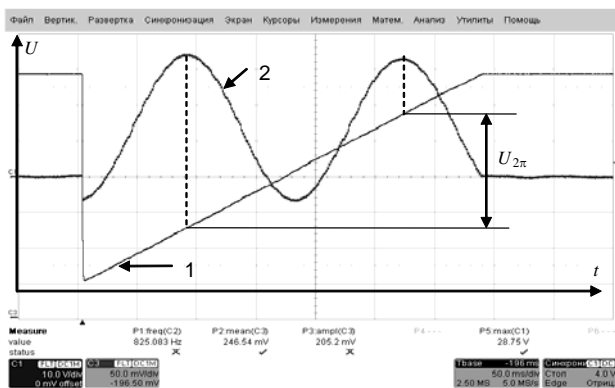


Рис. 8. Зависимость величины выходного сигнала фотодиода (2) и напряжения, подаваемого на модулятор (1), от времени. Масштаб напряжения на модуляторе 100 В/дел, масштаб временной оси 50 мс/дел

По осциллограмме, приведенной на рис. 10, можно с достаточной точностью определить шаг напряжения, соответствующий сдвигу фазы на  $2\pi$ . Этот метод определения сдвига фазы был применен для всех каналов. Анализ полученных осциллограмм позволил получить массив значений напряжений для каждого канала.

После внесения изменений в программу работы контроллера, с учетом полученных значений напряжения  $U_{2\pi}$ , фаза в каждом канале может изменяться в любом направлении. Фактически больше не существует предельного значения напряжения при фазировке. Время фазировки после внесения этих изменений сократилось до 40 мс (рис. 9).

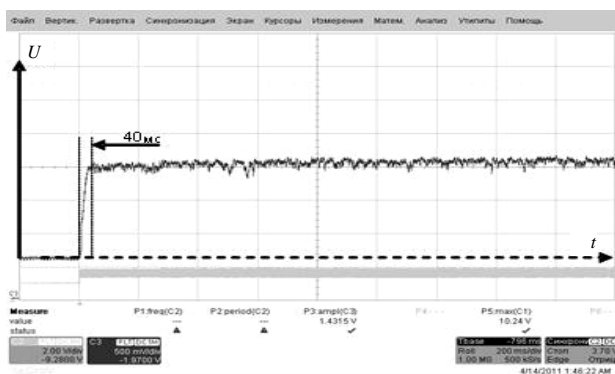


Рис. 9. Зависимость величины выходного сигнала фотодиода от времени после введения скачка фазы на  $2\pi$ . Масштаб напряжения 500 мВ/дел, масштаб временной оси 200 мс/дел.

При прохождении лазерным пучком большого расстояния в атмосфере фаза в каждой точке его апертуры произвольным образом меняется. Происходит это вследствие турбулентных завихрений воздуха, меняющих в небольшом диапазоне показатель преломления среды. В результате волновой фронт лазерного пучка искажается, а его интенсивность в дальней зоне снижается. Компенсировав фазовые искажения по апертуре, можно получить дифракционную расходимость и максимальную яркость излучения.

После увеличения частоты алгоритма и скорости фазировки с помощью нового контроллера компенсации тепловых фазовых искажений была проведена в динамике. Тепловентилятор, создавая турбулентные завихрения воздуха (рис. 2), непрерывно менял фазу в каждом канале произвольным образом. Процесс фазировки иллюстрируется на рис. 10 (изображение дальней зоны пучка на CCD-камере) и рис. 11 (изменение интенсивности пучка в дальней зоне во времени). При неработающем алгоритме в дальней зоне наблюдалась постоянно меняющаяся картина расфазированного излучения (рис. 10,а). Вследствие этого интенсивность пучка, регистрируемая в дальней зоне фотодатчиком, была минимальна (рис. 11). При включении СПГ-алгоритма фаза каждого канала корректировалась в динамике с частотой около 3,7 кГц, многоканальный лазерный пучок фазировался (рис. 10,б), мощность излучения на оптической оси увеличивалась до максимального значения. В режиме паузы, когда управляющие напряжения на модуляторах фиксируются и не изменяются, пучок частично сфазирован и его интенсивность уменьшается до одной трети от максимального значения. Повторное включение алгоритма приводит к росту интенсивности до максимума.

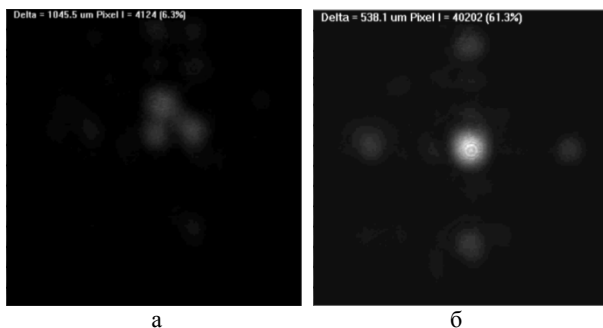


Рис. 10. Изображения дальних зон суммарного лазерного пучка без компенсации (а) и с компенсацией (б) тепловых фазовых искажений

Значения напряжений  $U_{2\pi}$  для каналов фазовой сборки модуляторов

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16
360	300	300	300	320	300	320	300	310	300	310	310	290	300	300	310

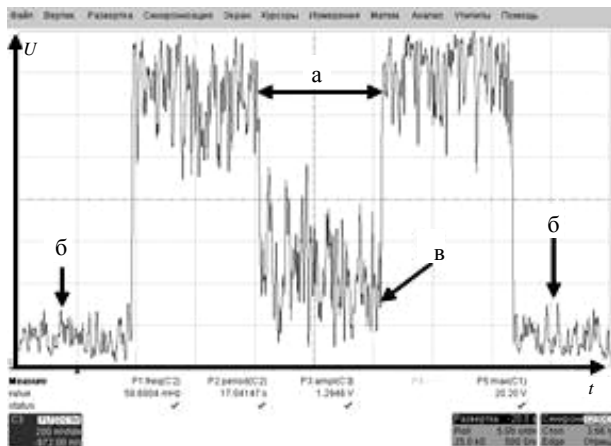


Рис. 11. Осциллограмма сигнала фотодатчика при включенном (а), выключенном (б) и в режиме паузы (в) работы СПГ-алгоритма. Масштаб времени 5 с/дел, напряжения – 200 мВ/дел

Проведенные эксперименты показали возможность применения системы фазировки на основе СПГ-алгоритма для коррекции фазовых искажений в динамическом режиме.

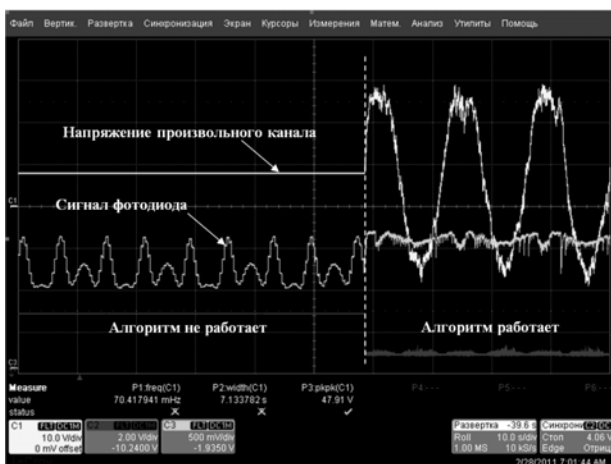


Рис. 12

Одной из основных задач создания мощного оптоволоконного лазера с когерентным сложением пучков параллельных лазерных усилителей является фазировка излучения всех каналов лазера после прохождения им системы усилителей. После прохождения излучения через блок усилителей каждый отдельный пучок будет иметь свою собственную фазу колебаний. Это связано с тем, что каждый усилитель имеет отличные друг от друга параметры. С помощью оптической сборки из фазовых модуляторов, работающей под управлением СПГ-алгоритма, была продемонстрирована возможность полной фазировки 16-канального непрерывного лазера. Для этого на один из каналов сборки подавался синусоидальный сигнал амплитудой в 300 В, имитирующий уход фазы в этом канале за счет усиления от 0 до  $2\pi$ . При выключенном алгоритме за счет ухода фазы в этом опорном канале

мощность излучения на оптической оси в дальней зоне изменялась, с той же периодичностью. При включении алгоритма все каналы оставались сфазированными, повторяя форму напряжения опорного канала. Это иллюстрирует кривая напряжения, взятого с произвольного канала, отличного от опорного.

## Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию фазировки лазерных пучков с применением стохастического параллельного градиентного алгоритма. В предыдущих работах была показана работоспособность методики и теоретически рассчитана и оптимизирована процедура фазировки при различном числе суммируемых лазерных каналов. Данная работа является очередным этапом в разработке и апробации выбранной модели фазировки. В качестве фазовых модуляторов использовались электрооптические модуляторы на основе поперечного эффекта Поккельса в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$ . В работе представлены результаты экспериментальных исследований фазировки лазерных пучков с помощью модернизированной системы управления напряжением, подаваемым на фазовые модуляторы. Частота работы системы достигла 3,7 кГц (время отдельной итерации  $\sim 0,27$  мс). При этом время фазировки занимает 40 мс.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- 1) Собран экспериментальный стенд для исследования процесса фазировки многоканального лазерного излучения.

- 2) Проведена модернизация системы управления напряжением питания, подаваемым на фазовые модуляторы, в результате чего тактовая частота алгоритма была увеличена до 3,7 кГц.

- 3) Проведена экспериментальная отработка СПГ-алгоритма, позволившая уменьшить время фазировки до 40 мс.

- 4) Проведены эксперименты и продемонстрирована динамическая фазировка 16 лазерных пучков, фаза которых искажалась турбулентным потоком нагретого воздуха.

- 5) Продемонстрирована возможность динамической фазировки непрерывного многоканального лазера с параллельным сложением излучения.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования СПГ-фазировки усилительных каналов при создании мощных многоканальных непрерывных лазеров в геометрии «одноканальный ЗГ + многоканальный усилитель». Отметим, что описанный подход может быть применен не только к волоконным, но и другим непрерывным лазерам. Крайне важно, что его можно использовать для коррекции фазовых искажений, приобретенных лазерным пучком при его прохождении через протяженные воздушные трассы, организуя работу системы по принципу «мишень в петле обратной связи».

## Литература

1. Fan T. Y. Laser beam combining for High-Power, High-Radiance Sources // *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2005. Vol. 11. P. 567.
2. Brusselbach H. et al. Self-organizing coherence in fiber laser arrays // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30. P. 1339.
3. Huo Y., Cheo P. K. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers // *JOSA B* 22. 2005. P. 2345–2349.
4. Greem B., Won B. Roh, Alley T. G. Phasing of a two-channel continuous wave master oscillator-power amplifier by use of a fiber phase conjugate mirror // *Optics Lett.* 2005. Vol. 30. P. 2415.
5. Augst S. J. et al. Coherent beam combining and phase noise measurements of Yb fiber amplifiers // *Ibid.* 2004. Vol. 29. P. 474–476.
6. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
7. Liu L. et al. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller // *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5895.
8. Yu C. X. et al. Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2D fibre array // *Elect. Lett.* 2006. Vol. 42, N 18. P. 1024–1025.
9. Kansky J. E. et al. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count // *Proc. SPIE*. 2006. Vol. 6306. P. 63060G.
10. Liu L. et al. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners // *Ibid.* 2007. Vol. 6708. P. 67080K.