

Фазировка 7-канальной непрерывной оптоволоконной лазерной системы с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма

Работа посвящена фазовому сложению (фазировке) 7-канальной оптоволоконной лазерной системы, построенной по схеме «задающий генератор + блок усилителей». Контроль модуляторов фазы на основе ниобата лития осуществляется многоканальным электронным блоком управления с микроконтроллером, обрабатывающим сигналы в режиме реального времени с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма. Динамическое фазовое сложение экспериментально продемонстрировано при ширине полосы системы 7,1 кГц, время полной фазировки системы составило 3–4 мс.

**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**

Введение

Максимальная энергия и яркость излучения лазера ограничиваются потенциалом конкретной активной среды. При полном использовании этого потенциала дальнейший рост его энергии и яркости возможен только при сложении 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 сложения с активной фазировкой лазерных каналов – это использование фазовых детекторов [2]. К преимуществам подхода можно отнести независимость от числа фазированных каналов, к недостаткам – необходимость измерения относительных фазовых сдвигов, что сильно усложняет архитектуру системы, повышает чувствительность к шумам. По-

этому возникает интерес рассмотрения более простых подходов, без измерения относительной или абсолютной фазы, например итеративного алгоритма стохастического параллельного градиентного спуска [3].

В настоящей работе для активной фазировки 7-канальной оптоволоконной лазерной системы в геометрии $3Г$ + блок *параллельных усилителей* используется стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм [4, 5], сходный с алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска [3, 6] по использованию принципа 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].

Цель работы – экспериментально продемонстрировать динамическую активную СПГ фазировку семи параллельных усилительных каналов волоконного лазера.

Схема эксперимента

Схема эксперимента по фазировке 7-канального оптоволоконного лазера представлена на рис. 1. Задающий генератор 1 (длина волны $\lambda = 1064$ нм) собран по двухкаскадной схеме, состоящей из одночастотного полупроводникового диодного лазера 2 и волоконного иттербиевого предусилителя 4 с диодом накачки 3. Волоконный предусилитель представляет собой двухсердцевинное волокно в единой оболочке. Одна 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.

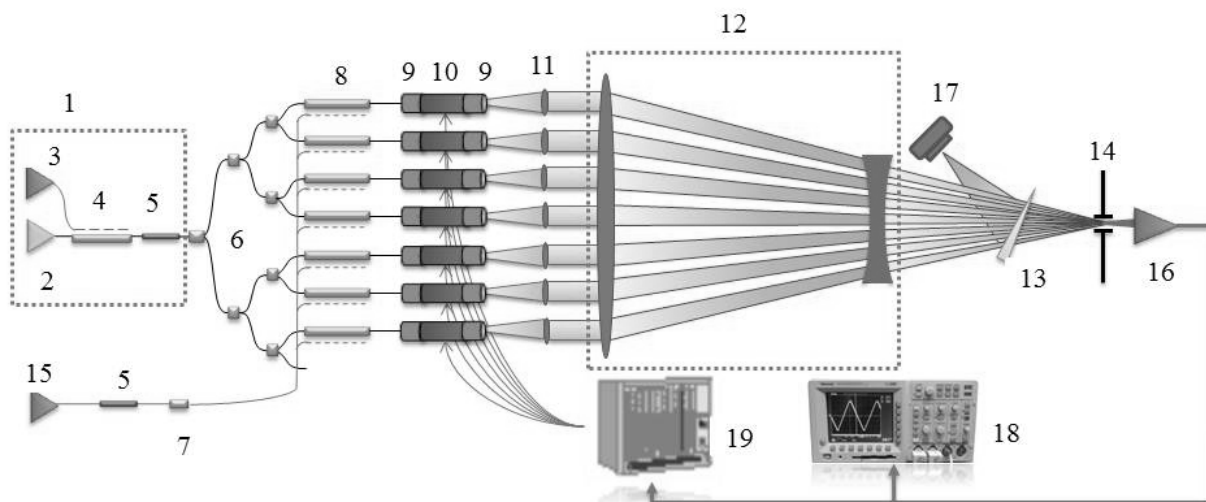


Рис. 1. Схема эксперимента по фазировке 7-канального оптоволоконного лазера: 1 – $3Г$, 2 – одночастотный диодный лазер, 3 – диод накачки предусилителя, 4 – предусилитель, 5 – изоляторы, 6 – система деления излучения, 7 – многоканальный разветвитель, 8 – усилители, 9 – коллиматоры, 10 – фазовые модуляторы, 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

Ширина линии излучения ЗГ, измеренная волоконным кольцевым интерферометром, равна 2,5 МГц (длина когерентности 80 м, $\Delta\nu \sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$). Мощность излучения на выходе ЗГ 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 $\lambda = 1064 \text{ нм}$ 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 около 1 Вт. Усиленное излучение коллимируется и поступает на фазовые модуляторы 10 из кристаллов ниобата лития Z-среза с нанесенными на их боковые поверхности электродами. Линейные размеры модуляторов $4 \times 4 \times 45 \text{ мм}$. Модуляторы работают на основе поперечного электрооптического эффекта в режиме модуляции фазы. После фазовых модуляторов излучение поступает на семь коаксиально расположенных 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.

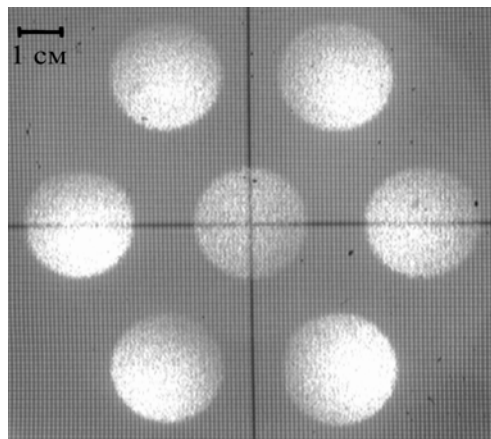


Рис. 2. Семь лазерных пучков на выходе линз в ближней зоне в эксперименте

После коллимации излучение поступает на двухлинзовую систему 12 (см. 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 7-канального излучения в угле 0,017 мрад. Для визуализации процесса часть излучения, отраженная от клина 13, поступает на матрицу CCD-камеры 17, также расположенную в фокальной плоскости двухлинзовой системы. Выходной сигнал фотодиода поступает на быстродействующий 32-разрядный микроконтроллер, непосредственно встроенный в блок управления, который параллельно в соответствии с СПГ алгоритмом формирует напряжения на каждый фазовый модулятор. Таким образом, система фазировки является замкнутой. Тактовая частота работы системы фазировки в замкнутом цикле составила 7,1 кГц.

Результаты экспериментов и расчетов

Для фазировки излучения на выходе усилителей требуется, чтобы фазы выходного излучения были одинаковы по каналам в каждый момент времени, но не обязательно неизменны во времени. Очевидно, быстрые сбои фазы излучения ЗГ, вызванные конечной шириной его линии, влияния не оказывают, так как они передаются на все усилительные 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), существует дополнительная разность фаз, которая непрерывно и произвольным образом меняется. Причина этого – наличие в оптоволоконных усилителях фазовых колебаний (фазового шума) [7]. Максимальные по амплитуде фазовые колебания наблюдаются сразу же после включения лазера и составляют 20λ , частота этих колебаний порядка 1 Гц. Связано это главным образом с температурными изменениями показателя преломления в оптоволоконке. После установления режима теплового равновесия фазовые колебания также наблюдаются в усилительных каналах, но максимальная амплитуда уменьшается до $\lambda/3$. Частота таких колебаний также порядка 1 Гц.

Основными источниками фазовых колебаний являются тепловые колебания, механический резонанс, акустический и сейсмический шумы. Отметим также, что оптические неоднородности в среде распространения излучения от выхода усилителей до системы регистрации также могут приводить к дополнительной дефазировке.

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

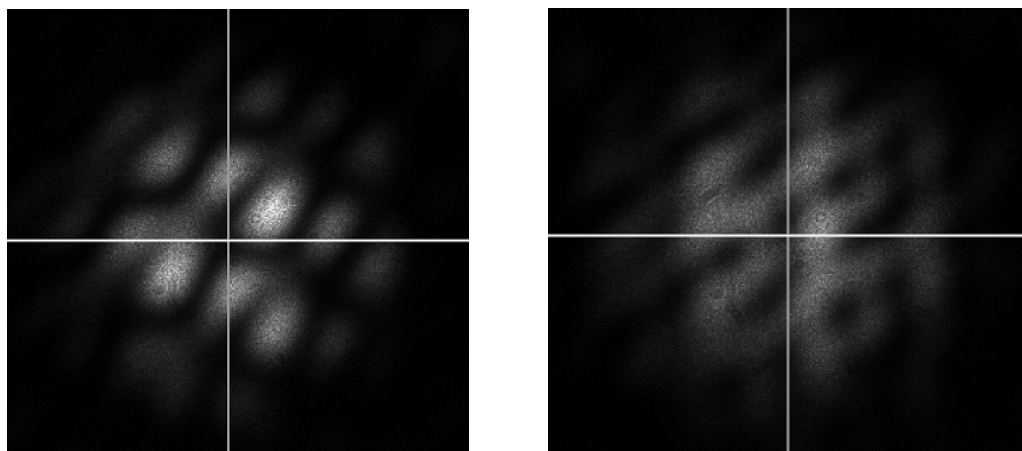


Рис. 3. Примеры распределения интенсивности излучения семи волоконных лазерных каналов в дальней зоне в случае рассогласования фаз

При включении обратной связи в системе фазировки фотодиод 16 (см. рис. 1), расположенный на оптической оси в фокальной плоскости двухлинзовой системы, регистрирует мощность излучения, заключенного 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, обеспечивает постоянную синфазность излучения всех лазерных каналов вне зависимости от исход-

ных значений фазы в них. Для наибольшей скорости сходимости СПГ алгоритма использовались оптимальные параметры, рассчитанные в [5, 6].

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

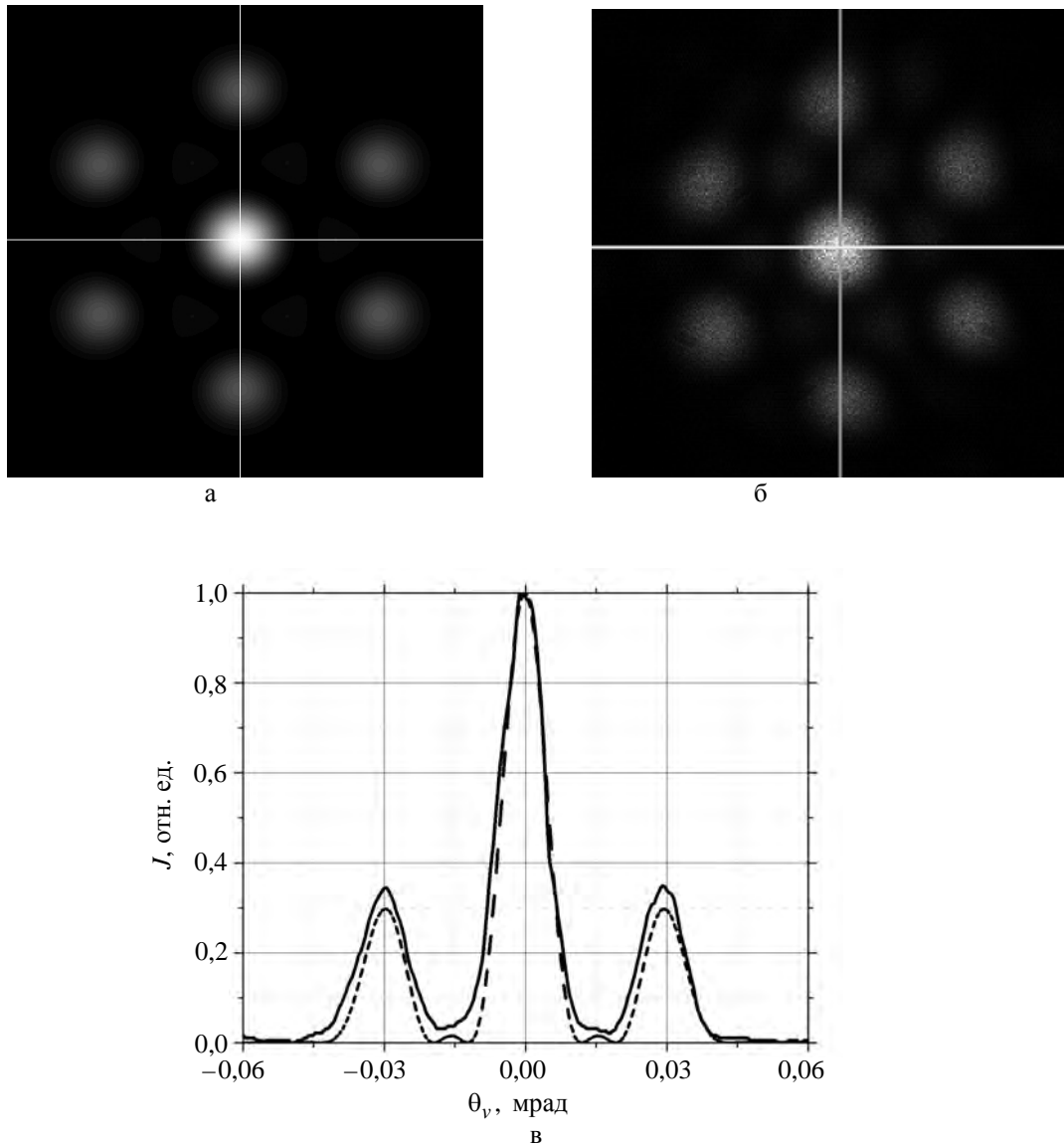


Рис. 4. Расчетное (а) и экспериментальное (б) распределение интенсивности семи сфазированных каналов оптоволоконного лазера в дальней зоне и его пропись по координате y (в) (сплошная линия – эксперимент, пунктир – расчет)

Зависимость выходного сигнала фотодиода от времени при включении/выключении и в режиме паузы обратной связи показана на рис. 5. Интенсивность излучения (сигнал с фотодиода, расположенного на оптической оси) при включении обратной связи (режим «он») в среднем уве-

личивается в семь раз по сравнению с дефазированным случаем. После остановки обратной связи (режим «*pause*») значения напряжений на фазовых модуляторах остаются неизменными и сигнал фотодиода спадает с максимального значения до минимального за 1–3 с, т. е. излучение вновь становится дефазированным.

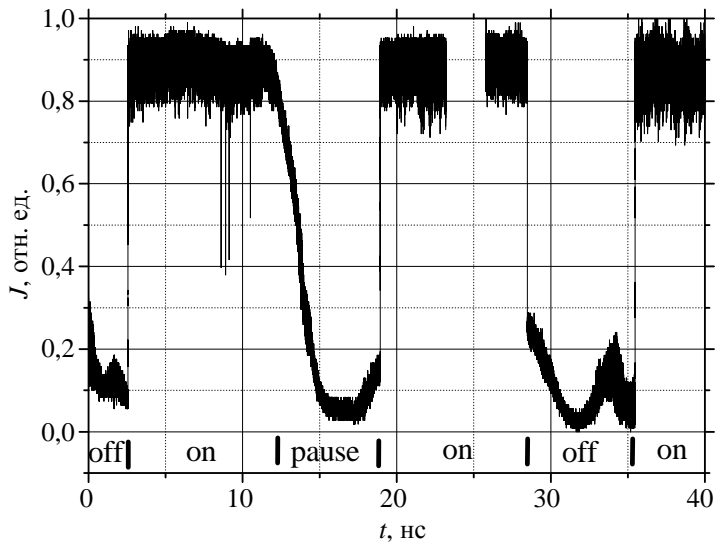


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала фотодиода от времени в процессе фазировки при выключенной и включенной обратной связи

Зависимость выходного сигнала фотодиода при первом включении обратной связи и расчетная зависимость числа Штреля от номера итерации СПГ алгоритма N показаны на рис. 6. Нулевая итерация соответствует моменту времени $t = 2,562$ с (первое включение обратной связи) на рис. 5.

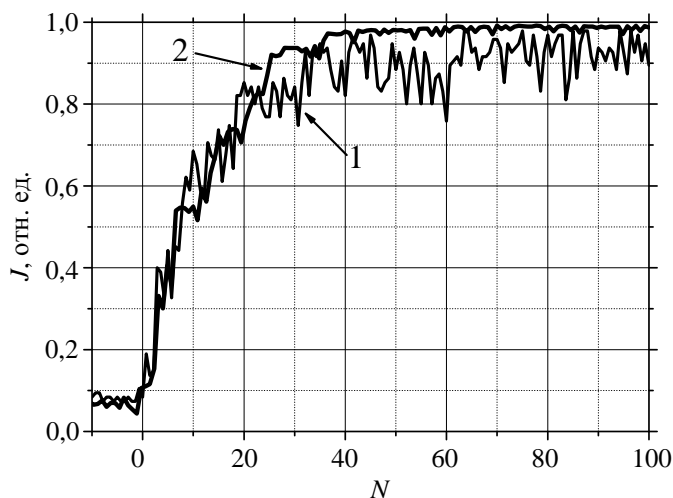


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала фотодиода (1) и расчетная зависимость числа Штреля (2) от номера итерации N в процессе фазировки

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 [5, 6].

Заключение

Статья посвящена исследованию фазировки многоканальных лазерных систем в схеме *одноканальный ЗГ + блок параллельных усилителей* с помощью двухэтапного итеративного СПГ алгоритма. Создан экспериментальный стенд для активной фазировки 7-канальной волоконной лазерной системы ($\lambda = 1064$ нм) с модуляторами фазы на основе ниобата лития и электронным блоком управления с микроконтроллером. При ширине полосы системы 7,1 кГц продемонстрирована динамическая фазировка излучения 7-канальной оптоволоконной лазерной системы. Результаты экспериментов находятся в хорошем согласии с результатами расчетов и показывают перспективность использования СПГ фазировки усилительных каналов при создании мощных непрерывных лазеров в геометрии *одноканальный ЗГ + блок параллельных усилителей*. Отметим, что описанный подход может быть применен к большому классу непрерывных лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-00397-а).

Список литературы

1. Лиханский В. В., Напартович А. П. Излучение оптически связанных лазеров // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 3. С. 101–143.
2. Anderegg J., Brosnan S., Cheung E. et al. Coherently coupled high-power fiber arrays // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6102. P. 1–5.
3. Liu L., Vorontsov M. et al. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5895. P. 1524–1532.
4. Vorontsov M. A., Sivokon V. P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction // Opt. Soc. of America. 1998. Vol. 15, N 10. P. 2745–2751.
5. Гаранин С. Г., Маначинский А. Н., Стариков Ф. А. и др. Фазовая коррекция лазерного излучения с помощью адаптивных оптических систем в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 30–37.
6. Волков В. А., Волков М. В., Гаранин С. Г. и др. Динамическая фазировка многоканального непрерывного лазерного излучения с использованием стохастического градиентного алгоритма // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 9. С. 852–856.
7. Augst S. J., Fan T. Y., Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of Yb fiber amplifiers // Opt. Lett. 2004. Vol. 29. P. 474–479.

Phase Locking of Seven-Channel Continuous Wave Fiber Laser System by Using Stochastic Parallel Gradient Algorithm

M. V. Volkov, S. G. Garanin, U. V. Dolgoplov, A. V. Kopalkin, S. M. Kulikov,
D. N. Sinyavin, F. A. Starikov, S. A. Sukharev, S. V. Tyutin,
S. V. Khohlov, D. A. Chaparin

The work is devoted to phase locking of seven-channel continuous wave fiber laser system based master oscillator + multichannel power amplifier scheme by stochastic parallel gradient algorithm. The control of phase modulators on the basis of lithium niobate is performed by the special electronic block with a microcontroller, which processes the signal in real-time operation mode. The dynamic phase locking of laser system has been demonstrated at the system bandwidth 14 kHz, the time of phasing was 3–4 ms.