

Формирование контура обратной связи для фазового управления решеткой волоконных лазеров

В.В. Колосов^{1,2}, М.Е. Левицкий³, Т.Д. Петухов¹, Г.В. Симонова^{4*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский научный центр СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 10/4

³АО НВП «Топаз»

634055, г. Томск, пр. Академический, 2

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

Рассмотрены методы фазирования каналов излучения для реализации когерентного сложения линейно поляризованных полей узкополосных волоконных лазеров. Показана высокая эффективность работы внутреннего контура обратной связи, основанного на интерференции периферийных участков излучения фазированных каналов (гауссовых пучков). Этот метод прост в реализации, позволяет масштабировать мощность оптических фазированных решеток и не требует массивных оптических элементов. Приведены формулы для расчета оптической схемы для реализации контура обратной связи и результаты эксперимента по когерентному сложению трех пучков.

Ключевые слова: волоконный лазер, оптические фазированные решетки, когерентное сложение, контур обратной связи; fiber laser, optical phased arrays, coherent combining, feedback loop.

Введение

Исследование лазерных систем на основе оптических фазированных решеток широко обсуждается в связи с возможностью применения в задачах беспроводной оптической связи [1], масштабирования лазерной мощности с сохранением дифракционного качества пучка [2], транспортировки лазерной энергии на атмосферных трассах [3].

Оптическая фазированная решетка представляет собой совокупность дискретных однонаправленных оптических излучателей с возможностью управления фазой каждого отдельного излучателя. Такая схема позволяет компенсировать фазовые рассогласования отдельных каналов излучения, возникающие вследствие фазовых шумов как источников излучения, так и атмосферной турбулентности, и в широких пределах наращивать суммарную мощность излучения решетки с сохранением предельно высокой (дифракционной) яркости.

Типичная реализация фазированной решетки волоконных лазеров [2, 4] заключается в разделении линейно поляризованного излучения узкополосного лазера на множество каналов, в каждом из которых

располагается фазоуправляющий элемент, волоконный усилитель мощности и коллимирующая оптика. Полученная совокупность каналов излучения формируется в виде плотной решетки излучателей (субапертур) и образует синтезированную апертуру оптической решетки различной геометрии (квадратной, круговой, гексагональной и т.д.). Для регулирования состояния фазоуправляющих элементов используется многоканальный контроллер, вырабатывающий напряжения, пропорциональные величинам фазового рассогласования между отдельными каналами. Эти рассогласования определяются в результате анализа интерференционной картины, возникающей при наложении пучков отдельных каналов.

Теоретически в случае когерентного сложения N пучков осевая интенсивность синтезированного пучка возрастает в N^2 раз по сравнению с осевой интенсивностью отдельного субпучка. Однако на практике этот рост ограничен из-за дискретной геометрии синтезированной апертуры. Влияние архитектуры синтезированной апертуры оптической решетки для гексагонального расположения субапертур исследовано в [5]. Показано, что на распределение интенсивности синтезированного пучка в дальней зоне влияют два геометрических фактора: фактор заполнения субапертуры $f_{\text{sub}} = D_{\text{sub}}/D_{\text{com}}$ и фактор заполнения синтезированной апертуры $f_c = D_{\text{sub}}/l$, где D_{com} – световой диаметр гауссова субпучка; D_{sub} – диаметр апертуры отдельного субпучка; l – расстояние между центрами субапертур в решетке.

* Валерий Викторович Колосов (kvv@iao.ru); Михаил Ефимович Левицкий (top@iao.ru); Тимофей Дмитриевич Петухов (smileedition@gmail.com); Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru).

Фактор заполнения субапертуры f_{sub} характеризует степень ограничения исходного гауссова пучка размером субапертуры. Это приводит к увеличению расходимости пучка вследствие дифракции на субапертуре, а также к возможному увеличению энергетических потерь и дополнительным фазовым aberrациям в результате нагрева элементов субапертуры лазерным излучением. Показано [5], что для $N_{\text{sub}} \geq 7$ существует оптимальное значение f_{sub} , при котором ограниченная дифракцией интенсивность на оси достигает максимума, и это значение практически не зависит от дистанции распространения. Таким образом, попытка конструирования системы с более высоким значением f_{sub} является малопродуктивной, а указанное значение этого фактора легко достигается соответствующим выбором размера оправы коллимирующей линзы. При когерентном сложении пучков уменьшение f_c приводит к уменьшению размеров центрального пятна в распределении интенсивности в дальней зоне и перераспределению суммарной мощности в периферийные максимумы, однако практически не влияет на величину осевой интенсивности. При этом мощность в пределах диска Эйри (соответствующего диаметру совокупной апертуры) существенно уменьшается. Таким образом, в целях сосредоточения максимальной мощности в пределах малой области желательно стремиться к величине $f_c \sim 1$.

Для синхронизации фаз всех субпучков решетки предложены различные методы и алгоритмы [5–8]. Для их реализации необходим сигнал обратной связи (ОС), поступающий на вход управляющего контроллера. Из-за дискретной геометрии оптической решетки взаимное наложение пучков происходит в результате дифракции в дальнем оптическом поле, как правило, на значительных расстояниях от оптической решетки. Поэтому для регистрации интерференционной картины в непосредственной близости от апертуры оптической решетки малая часть излучения отводится светоделительной пластиной и собирается с помощью фокусирующей оптики в области малой диафрагмы (pinhole) одного или нескольких фотоприемников (рис. 1, а). Регистрируемые фотоприемниками сигналы передаются на вход контроллера, замыкая контур обратной связи [2–7]. Такой способ формирования внешнего контура обратной связи требует введения в оптический тракт дополнительных оптических элементов, размеры которых сравнимы с размером совокупной апертуры оптической решетки, что существенно увеличивает габариты системы и вносит другие ограничения, связанные с необходимостью обеспечения высокой лучевой прочности внешних оптических элементов и возможностью внесения дополнительных набегов фазы.

В [9, 10] предлагаются способы организации внутреннего контура ОС для компенсации фазовых рассогласований. Они основаны на использовании отраженного в обратном направлении излучения с помощью асимметричных волоконных соединителей (каплеров) на выходе из каждого канала. Измерение фазового рассогласования в отдельных кана-

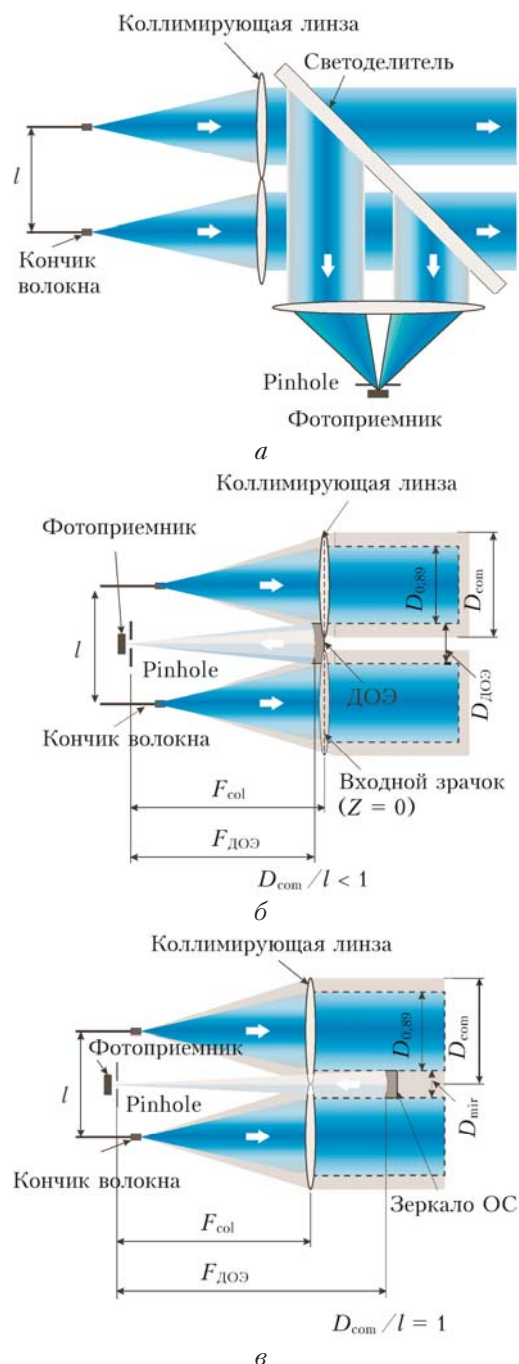


Рис. 1. Принципы формирования контура ОС: а – стандартная схема [2–7]; б – зеркало ОС в плоскости входного зрачка оптической решетки [11, 12]; в – зеркало ОС за плоскостью входного зрачка [13]

лах производится методом цифровой гетеродинной интерферометрии, объединяющим метод гетеродинной интерферометрии с цифровой модуляцией. Такой подход ограничен лучевой прочностью выходных волоконных каплеров и позволяет масштабировать мощность оптической решетки до 100 Вт.

В [11, 12] для формирования внутреннего контура обратной связи в решетке волоконных коллиматоров предлагается использовать интерференцию периферийных участков (хвостов) гауссовых пучков,

перехватываемых в плоскости зрчка решетки до их перекрытия на передающей апертуре (рис. 1, б). При таком решении отсутствуют внешние оптические элементы, способные виньетировать синтезированный выходной пучок, и есть возможность масштабирования мощности фазированной оптической решетки в широких пределах. Однако фокусировка в плоскости фотоприемника периферийных частей расходящихся гауссовых пучков приводит к абберационным искажениям волнового фронта и, как следствие, к размытию интерференционной картины и снижению ее контраста. Из-за этого увеличивается ошибка определения величины фазового рассогласования. Для компенсации возникающих искажений авторы [11, 12] использовали трехсегментный внеосевой дифракционный оптический элемент (ДОЭ), сложный в изготовлении и юстировке. Другой недостаток предложенной схемы – конструктивное ограничение достижимой ширины интерференционной полосы условием $\Delta x \geq 10\lambda \geq d_{ph}$, где λ – длина волны излучения; d_{ph} – диаметр малой диафрагмы. Для $\lambda = 1$ мкм чувствительность фотоприемника $\sim 0,5$ А/Вт, а темновой ток ~ 1 нА, таким образом, падающая на фотоприемник мощность составляет десятки-сотни нановатт и малая величина достижимой ширины интерференционной полосы может иметь критическое значение.

1. Принцип работы и расчет оптической схемы контура обратной связи

Мы рассматриваем метод, который заключается в перехвате периферийных участков (хвостов) гауссовых пучков за плоскостью входного зрчка коллимирующих линз (рис. 1, в). При этом на малое сферическое зеркало ОС падают коллимированные участки периферийных гауссовых пучков, которые собираются и интерferируют в плоскости малой диафрагмы, проходя через специально изготовленное отверстие между плотно упакованными коллимирующими линзами без аббераций. Необходимое значение ширины интерференционной полосы достигается за счет выбора фокусного расстояния зеркала ОС.

Архитектура семиэлементного кластера оптической фазированной решетки (рис. 2) состоит из плотно упакованных коллимирующих линз гексагональной формы. Оптическая фазированная решетка может содержать набор таких кластеров.

В узлах соединения каждых трех коллимирующих линз внутри кластера сделаны треугольные отверстия, соосно с которыми установлены зеркала ОС. При этом каждое зеркало ОС собирает в плоскости фотоприемника излучение от трех сегментов периферийных участков гауссовых пучков [11].

Такой подход позволяет осуществить согласованный расчет оптической схемы фазированной решетки на основе задания числовой апертуры NA

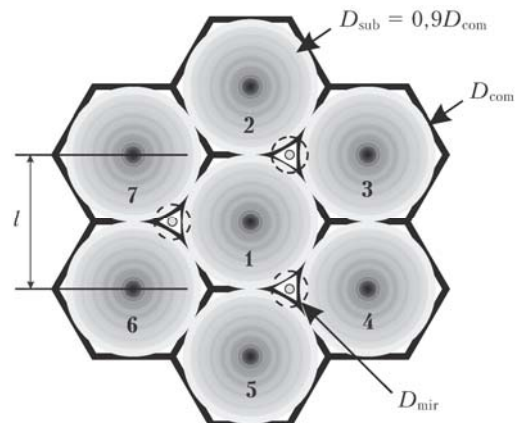


Рис. 2. Архитектура семиэлементного кластера оптической фазированной решетки. Штриховые линии – места расположения зеркал обратной связи

оптического волокна и фокусного расстояния коллимирующей линзы f'_{col} .

Полный размер субапертуры

$$D_{com} = 2f'_{col}NA. \quad (1)$$

Основная мощность гауссова пучка ($\approx 91\%$) сосредоточена на диаметре $D_{sub} = D_{0,9}$:

$$D_{0,9} \approx D_{com}. \quad (2)$$

Отсюда можно вычислить необходимый диаметр зеркала ОС (рис. 2):

$$D_{mir} = \left(\frac{D_{com}}{\cos 30^\circ} \right) - 0,9D_{com} = 0,26D_{com}. \quad (3)$$

Параметры сферического зеркала ОС должны удовлетворять условию

$$f'_{mir} \geq \frac{1/2D_{mir}f'_{col}}{0,15 \cdot 1/2(D_{com})} \geq \frac{\Delta x D_{mir}}{\lambda}, \quad (4)$$

где Δx – ширина интерференционной полосы.

Следует иметь в виду, что максимальный размер отверстия связи для такой геометрии определяется условием

$$D_{hole} = 0,155D_{com}. \quad (5)$$

С учетом того, что в кольце, образованном окружностями D_{com} и $D_{0,9}$, содержится $\sim 3,85\%$ мощности, излучаемой субапертурой P_0 , можно оценить мощность излучения P_{mir} , перехватываемого зеркалом ОС от трех сегментов, образованных хвостами гауссовых пучков:

$$P_{mir} \approx 0,039 \frac{12S}{\pi(D_{com}^2 - D_{0,9}^2)} P_0, \quad (6)$$

где S – площадь одного сегмента. Это выражение позволяет определить уровень мощности оптической решетки, при котором наблюдается устойчивая обратная связь, и выбрать соответствующий приемник излучения.

Для экспериментальной реализации коллиматоров использовалось волокно PM980-XP с числовой апертурой $NA = 0,12$ и оптические элементы с параметрами, соответствующими формулам (1)–(4): $F' = 164$ мм; $D_{com} = 39,1$ мм; $D_{sub} = 34,9$ мм; $D_{mir} = 10,3$ мм.

Гексагональный порядок плотной упаковки коллимирующих линз (см. рис. 2) соответствует значениям геометрических факторов $f_{sub} = D_{sub}/D_{com} \approx 0,9$ и $f_c = D_{sub}/l \approx 0,9$. Такая компоновка позволяет обеспечить близкое к максимальному значение мощности в пятне диаметром D_{PIB} , соответствующем пятну Эйри, для дифракционно-ограниченного пучка в дальнем поле.

Приведенные формулы для расчета конструктивных параметров (радиуса кривизны, диаметра) зеркала ОС позволяют спроектировать схему устройства из коммерчески доступных компонентов, с определенной детектируемой шириной интерференционной полосы, учитывая выбранную длину волны и конкретные характеристики используемого оптоволокна.

2. Эксперимент

С целью определения эффективности работы рассматриваемого внутреннего контура ОС была собрана экспериментальная установка (рис. 3), совмещающая в себе внутренний и внешний (традиционный) контуры ОС. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

Линейно поляризованное излучение полупроводникового DBR-лазера с длиной волны 1064 нм и шириной полосы 3 МГц усиливалось волоконным усилителем и с помощью волоконного светоделителя

разделялось на три канала. В каждом из каналов находился интегрированный в волокно электрооптический фазоуправляющий элемент на основе $LiNbO_3$, осуществляющий быстрое изменение фазы оптической волны под действием управляющего напряжения, генерируемого контроллером ОС. Три гауссовых пучка, сформированные таким образом, коллимировались склеенными боковыми гранями между собой тремя асферическими линзами гексагональной формы (см. рис. 2) и настраивались параллельно друг другу, образуя синтезированную апертуру оптической решетки. Излучение синтезированной апертуры в ближнем поле представлено на рис. 5. Для формирования изображения в дальнем поле была установлена фокусирующая линза, в фокальной плоскости которой располагался измеритель профиля пучка Ophir-Spiricon SP503U.

Для формирования внешнего контура ОС использовалась стандартная схема (см. рис. 1, б). Часть излучения после фокусирующей линзы отводилась светоделительной пластиной на фотоприемник ФП1 (Thorlabs PDA10CF), перед которым устанавливалась малая диафрагма диаметром 10 мкм. Сигнал с ФП1 поступал на управляющий контроллер ОС, формируя контур внешней ОС. Управляющим сигналом (метрикой), по которому осуществлялось адаптивное управление, являлась мощность излучения, регистрируемого фотоприемником ФП1.

Для организации работы внутреннего контура ОС за плоскостью входного зрачка в геометрическом центре синтезированной апертуры располагалось сферическое вогнутое зеркало ОС М1 диаметром 10,3 мм, с радиусом кривизны 700 мм. Оно собирало в плоскости фотоприемника ФП2 (Thorlabs PDA05CF2) участки хвостов трех коллимированных гауссовых пучков, формирующих картину интер-

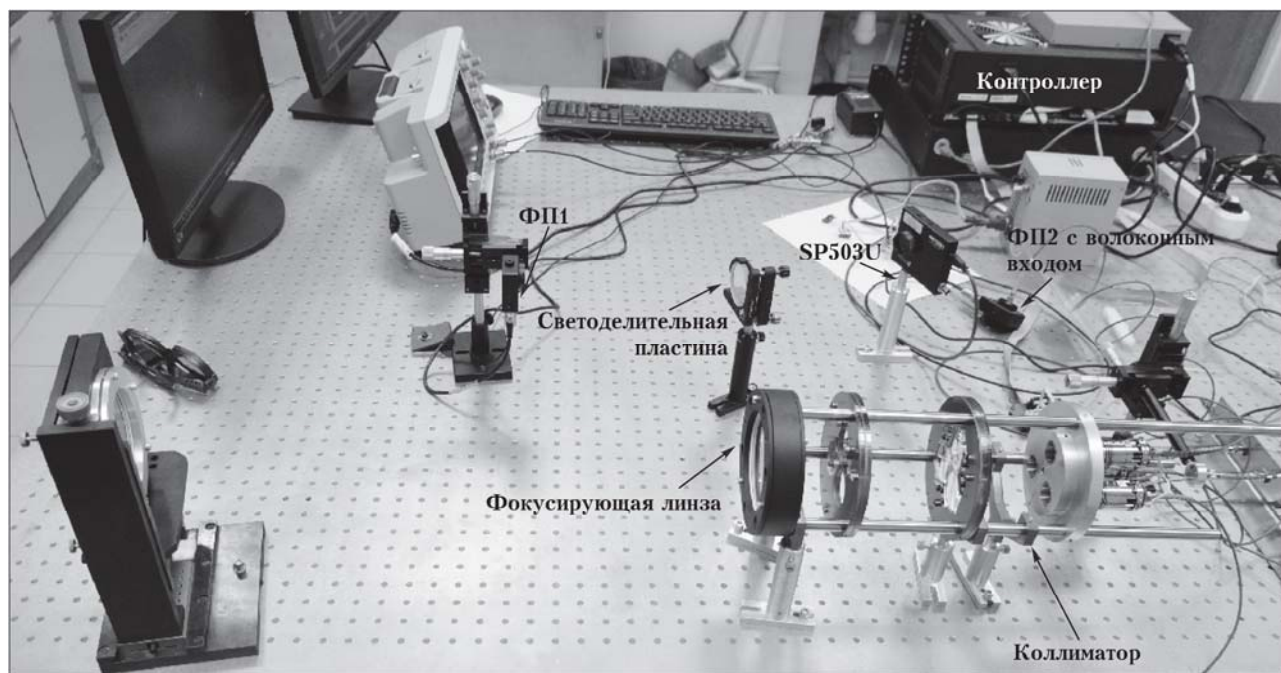


Рис. 3. Экспериментальная установка

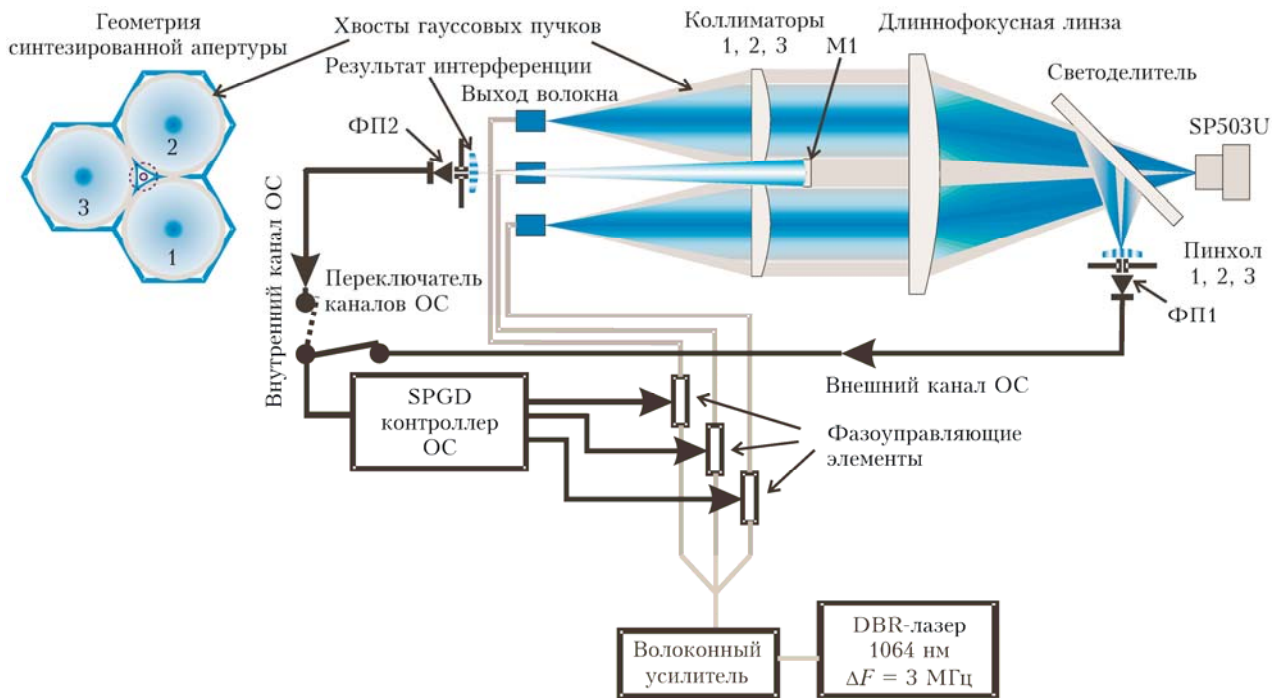


Рис. 4. Оптическая схема экспериментальной установки

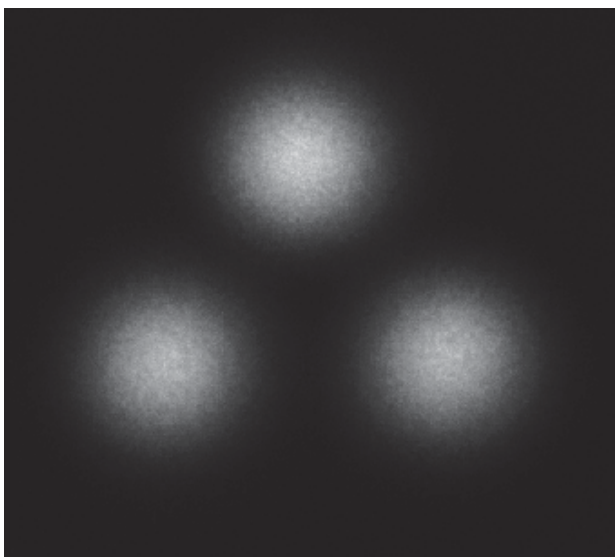


Рис. 5. Изображение излучения оптической решетки в ближнем поле

ференции (рис. 6, в). При этом расчетная ширина интерференционной полосы составляла $\Delta x \sim 36$ мкм.

Непосредственно перед фотоприемником ФП2 была установлена малая диафрагма, обеспечивающая чувствительность к изменению величины падающего потока излучения и величину входного сигнала, необходимые для устойчивой работы многоканального управляющего контроллера ОС. Управляющий контроллер [13] работал по алгоритму стохастического градиентного спуска (Stochastic Parallel Gradient Descent – SPGD), имел тактовую частоту до 240 кГц (100 кГц в эксперименте) и обеспечивал

формирование управляющих напряжений на фазоуправляющих элементах, замыкая канал внутренней ОС и выравнивая фазы излучения на выходе всех трех каналов в ближнем оптическом поле. Управляющим сигналом (метрикой), по которому осуществлялось адаптивное управление, являлась мощность излучения, регистрируемого фотоприемником ФП2.

Для визуализации результата сложения пучков в фокальной плоскости зеркала М1 вместо фотоприемника ФП2 устанавливалась CCD-камера BASLER Ace *aca1300-60NIR* с разрешением 1280×1024 пикселя и размером пикселя $5,3 \times 5,3$ мкм. Регистрация интерференционной картины проводилась непосредственно на матрице CCD-камеры. Выравнивание фазы излучения на выходе всех трех каналов в этом случае осуществлялось внутренним контуром ОС.

Таким образом, синхронизация фаз лазерных пучков оптической решетки могла осуществляться посредством либо внутреннего, либо внешнего контура ОС. При этом сигналы с фотоприемников ФП1 и ФП2 одновременно регистрировались двухлучевым осциллографом.

3. Результаты и обсуждение

Первоначально в эксперименте каналы фазировались с помощью внешнего контура ОС. Обратная связь осуществлялась по сигналу с фотоприемника ФП1. Результат работы адаптивной системы представлен на рис. 7, а. Наблюдается быстрый выход сигнала на максимальный уровень, что свидетельствует об устойчивой синхронизации фаз. При этом

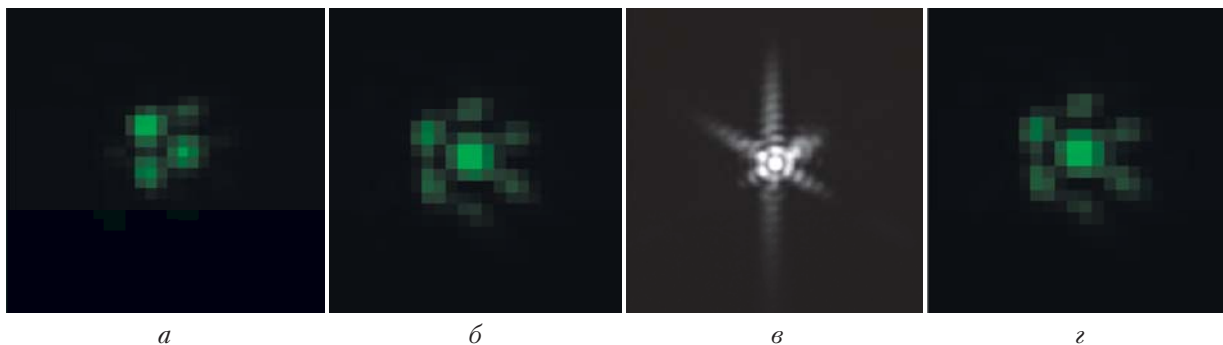


Рис. 6. Распределение интенсивности в результате сложения трех пучков: *a* – некогерентное сложение в фокусе длиннофокусной линзы; *б* – когерентное сложение в фокусе длиннофокусной линзы при синхронизации фаз внешним контуром ОС; *в* – в фокальной плоскости зеркала ОС при синхронизации фаз внешним контуром ОС; *г* – в фокусе длиннофокусной линзы при синхронизации фаз внутренним контуром ОС

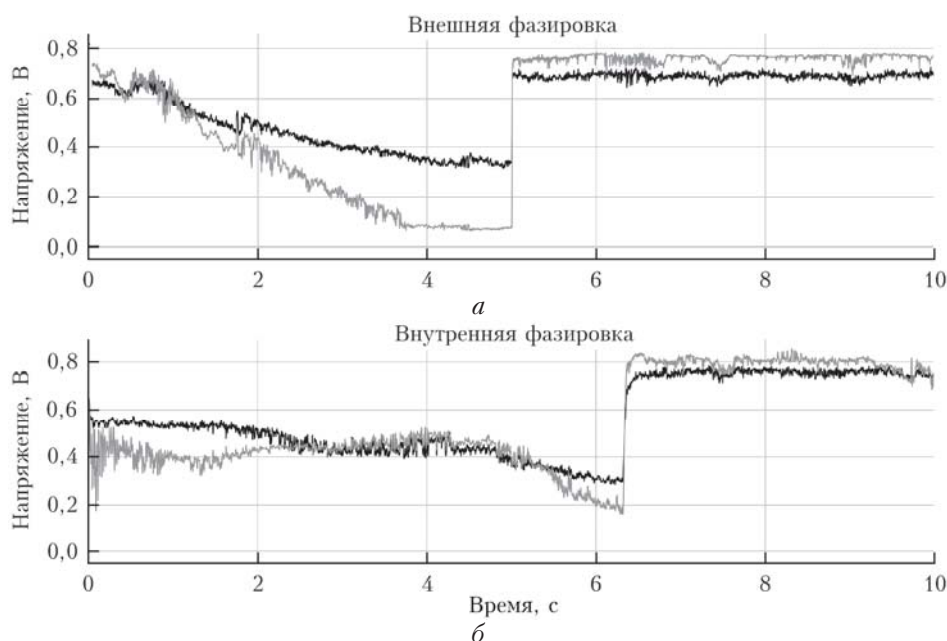


Рис. 7. Осциллограммы сигналов с фотоприемников ФП1 (серая кривая) и ФП2 (черная кривая): при синхронизации фаз пучков по внешнему (*a*) и по внутреннему контурам (*б*). В левой части осциллограмм показаны сигналы с фотоприемников при выключенном SPGD, в правой части – при включенном SPGD

мы наблюдаем устойчивые интерференционные картины в плоскости фокуса длиннофокусной линзы (рис. 6, *б*) и в фокальной плоскости зеркала ОС (рис. 6, *в*). Обе картины характеризуются выраженным максимумом на оси. Ширина интерференционного максимума в плоскости ФП2 оценивалась по количеству пикселей изображения камеры VASLER Ace acA1300-60NIR, соответствующему поперечному размеру центрального максимума (6–7 пикселей). Таким образом, ширина интерференционной полосы составляет $30 \div 40$ мкм, что хорошо соответствует расчетному значению (4) $\Delta x \sim 36$ мкм. Это значит, что сигнал на фотоприемнике ФП2 может быть выбран в качестве управляющего сигнала для внутреннего контура ОС при условии, что диаметр малой диафрагмы будет меньше поперечного размера центрального пика интерференционной картины. С учетом этого условия был проведен эксперимент по фазированию каналов с использованием внутреннего контура ОС.

Результат работы внутреннего контура представлен на рис. 7, *б*. Как и в случае с внешним контуром, наблюдается быстрый выход сигнала на устойчивый уровень. При этом достигается такое же хорошее качество синхронизации фаз. Об этом свидетельствует два факта. Во-первых, сигнал на фотоприемнике ФП1 достигает того же уровня, что при работе системы по внешнему контуру (черные кривые на рис. 7). Во-вторых, интерференционная картина в плоскости фокуса длиннофокусной линзы при работе внутреннего контура (рис. 6, *г*) совпала с интерференционной картиной, получаемой при работе внешнего контура. При этом экспериментальное значение интенсивности на оси интерференционной картины находится в согласии с теоретической оценкой, показывающей, что при когерентном сложении пучков интенсивность на оси синтезированного пучка должна возрастать пропорционально квадрату числа каналов ($I \sim N^2$). Этот результат представлен на рис. 8.

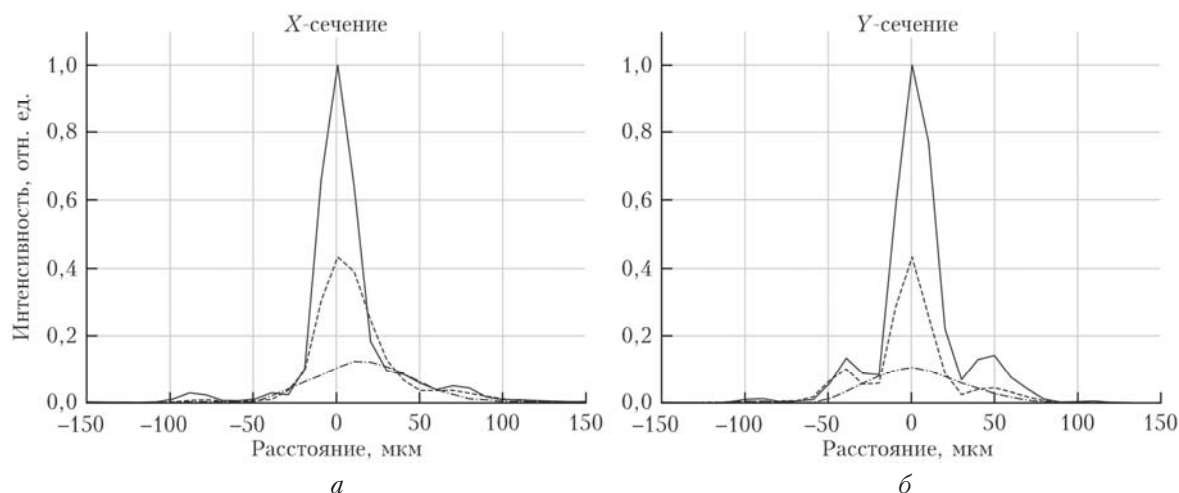


Рис. 8. Распределения интенсивности в фокусе длиннофокусной линзы в разных сечениях, соответствующие: одной излучающей субапертуре (штрихпунктирная кривая); двум субапертурам в условиях фазовой синхронизации (штриховая кривая); трем субапертурам в условиях фазовой синхронизации (сплошная кривая)

Наблюдается квадратичная зависимость от числа субапертур, что свидетельствует о высокой эффективности когерентного сложения пучков в рассматриваемой системе.

Кроме того, в ходе эксперимента была решена задача определения оптической мощности в контуре ОС, достаточной для обеспечения устойчивой работы управляющего контроллера. Важной для конструирования системы является возможность регистрации сигнала фотоприемником ФП2 с волоконным вводом излучения, поскольку волокно существенно ограничивает приемную площадку фотоприемника и, следовательно, уровень принимаемого сигнала. Коэффициент связи лазерного источника излучения с волокном посредством оптической системы зависит от ряда факторов, включая модовый состав излучения, условия формирования мод в волокне, aberrации оптической системы, а также угловые и линейные ошибки при позиционировании волокна [14].

Поэтому в эксперименте мы попытались воспроизвести предельно жесткие с технической точки зрения условия. Приемной апертурой служил плоский торец волокна PM980-XP длиной 2 м с числовой апертурой $NA = 0,12$ и диаметром ядра 6 мкм, размещенный в фокусе зеркала ОС. При этом мы юстировали волокно приблизительно на оси последнего и добивались достаточного уровня сигнала путем настройки зеркала ОС по углу. Важным критерием правильности настройки был факт равенства сигналов от каждого из трех перехватываемых зеркалом участков гауссовых пучков. Мощность излучения в каждом канале составляла 12 мВт, при этом оцениваемая по осциллограмме суммарная мощность была равна $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ Вт, что вполне достаточно для устойчивой работы контроллера ОС.

Этот факт позволяет сделать важный с практической точки зрения вывод: для обеспечения работы внутреннего контура ОС можно использовать недорогие фотодиоды с вводом излучения через волокно с диаметром ядра $10 \div 20$ мкм.

Заключение

Проведен сравнительный анализ схем фазовой синхронизации решетки волоконных лазеров при работе с внешним и внутренним контурами ОС на основе интерференции периферийных участков гауссовых пучков, вклад которых в выходные энергетические параметры оптической системы пренебрежимо мал. Показано, что когерентное сложение пучков в дальнем поле при работе рассмотренной схемы внутреннего контура ОС настолько же эффективно, как и при работе традиционных (внешних) контуров. Такая схема позволяет использовать недорогие волоконно-интегрированные фотоприемники для формирования сигнала внутренней ОС.

Экспериментальная реализация данной схемы содержала три коллиматора гексагональной формы и позволяла синхронизировать фазы трех пучков с управлением по внутреннему либо по внешнему контуру ОС. Управляющий контроллер работал по принципу SPGD с тактовой частотой до 240 кГц (100 кГц в эксперименте).

Рассмотренная схема позволяет масштабировать мощность фазированной оптической решетки путем объединения семиэлементных кластеров, получая оптимальные значения геометрических факторов f_c и f_{sub} . Конструкция компактна, проста в настройке и не требует для своего осуществления дорогостоящих и объемных оптических элементов.

Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований РАН № АААА-А17-117021310143-2 при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-20115).

1. Bruesselbach H., Wang S., Minden H., Jones D.C., Mangir M. Power-scalable phase-compensation fiber-array transceiver for laser communications through atmosphere // J. Opt. Soc. Am. 2005. V. 22B, N 2. P. 347–353.
2. Fan T.Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2005. V. 11, N 3. P. 567–577.

3. Sprangle P., Hafizi B., Ting A., Fischer R. High-power lasers for direct-energy applications // *Appl. Opt.* 2015. V. 54, N 31. P. F201–F209.
4. Vorontsov M.A., Weyrauch T., Beresnev L.A., Carhart G.W., Liu L., Ashenbach K. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: Analysis and experimental demonstration // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2009. V. 15, N 2. P. 269–280.
5. Vorontsov M.A., Lachinova S.L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis // *J. Opt. Soc. Am.* 2008. V. 25A, N 8. P. A1949–A1959.
6. Shay T.M., Benham V., Baker J.T., Ward B., Sanchez A.D., Culpepper M.A., Pilkington D., Spring J., Nelson D.J., Lu C.A. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array // *Opt. Express*. 2006. V. 14, N 25. P. 12015–12021.
7. Anderegg J., Brosnan S., Cheung E., Epp P., Hamilton D., Komine H., Weber M., Wickham M. Coherently coupled high-power fiber arrays // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6102. P. 61020U-1–5.
8. Vorontsov M.A., Carhart C.W., Ricklin J.C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization // *Opt. Lett.* 1997. V. 22. P. 907–909.
9. Bowman D.J., King M.J., Sutton A.J., Wuchenich D.M., Ward R.L., Malikides E.A., McClelland D.E., Shaddock D.A. Internally sensed optical phased array // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 7. P. 1137–1139.
10. Roberts L.E., Ward R.L., Sutton A.J., Fleddermann R., de Vine G., Malikides E.A., Wuchenich D.M., McClelland D.E., Shaddock D.A. Coherent beam combining using 2D internally sensed optical phased array // *Appl. Opt.* 2014. V. 53, N 22. P. 4881–4885.
11. Vorontsov M.A., Lachinova S.L., Beresnev L.A., Weyrauch T. Obscuration-free pupil-plane phase locking of a coherent array of fiber collimators // *J. Opt. Soc. Am.* 2010. V. 27A, N 11. P. A106–A121.
12. Beresnev L.A., Vorontsov M.A., Weyrauch T., Carhart G., Lachinova S.L., Liu J. Experimental study of phase locking of fiber collimators using internal beam-tail interference // *Proc. SPIE*. 2011. V. 7914. 11 p.
13. Ростов А.П. Контроллер формирователя фазового фронта многоканального лазерного пучка // *Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосферы: Материалы XXIII Междунар. симпоз. [Электронный ресурс – 1 CD-ROM].* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. В39–В42.
14. Wagner R.E., Tomlinson W.J. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 2671–2688.

V.V. Kolosov, M.E. Levitskii, T.D. Petukhov, G.V. Simonova. **Formation of feedback loop for phase control of a fiber laser array.**

Methods for phasing of an array of radiation channels for coherent combining of linearly polarized fields of narrowband fiber lasers are considered. The high efficiency of operation of the internal feedback loop based on interference of peripheral sections of radiation (Gaussian beam tails) of the phased channels is demonstrated. This method is easy to implement. It allows scaling the power of optical phased arrays and does not require massive optical elements. Equations for calculation of the optical arrangement for implementation of the feedback loop are presented along with the results of experiment on coherent combining of three beams.