

# Применение стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска для численного моделирования когерентного сложения излучения волоконных усилителей\*

Пу Жоу, Ксяолин Ванг, Ксяо Ли, Цилун Чен, Ксяоюн Ксу, Цейин Лиу

*Представлено моделирование наращивания числа когерентно суммируемых волоконных лазеров с помощью стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска, дан анализ применимости этого алгоритма для когерентного сложения, исследованы параметры оптимизации алгоритма и ограничения его рабочего диапазона.*

**Ключевые слова:** когерентное сложение, волоконный лазер, стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска.

## 1. Введение

Когерентное сложение излучения лазеров/усилителей в конфигурации фазированной решетки позволяет увеличить полную выходную мощность системы при сохранении хорошего качества пучка, что имеет большое значение для лазерной связи, лазерных радаров и систем доставки энергии [1]. При когерентном сложении все лазерные элементы обладают одинаковым спектром, а относительные фазы излучателей регулируются для поддержания усиливающей интенсивности интерференции. Волоконные лазеры/усилители особенно хорошо приспособлены для суммирования пучков из-за присущих им малых размеров [2]. Разработано несколько подходов к масштабированию выходной мощности при сложении излучения матрицы лазерных волоконных источников. В [3–5] было продемонстрировано устойчивое когерентное сложение излучения небольшого числа волоконных лазеров. В волоконных лазерах с синхронизацией фаз имеется несколько сердцевин [3], исчезающе малая связь между которыми используется для когерентного сложения излучения. В таких лазерах существенно ослаблены нелинейные процессы в сердцевине волокна, но при этом максимальная мощность все еще ограничивается доступными мощностью и яркостью лазерных диодов накачки, как и в случае системы с одной сердцевиной.

Схемы сведения пучков с единым волоконным выводом [4], вероятно, вообще непригодны для значительного масштабирования мощности. Проблема заключается в неустраимости нелинейных эффектов в волокне. Когерентное сложение излучения волоконных лазеров в системе задающий генератор – усилитель (master oscillator power amplifier, МОРА) решает проблему ограничения по

мощности. Для получения стабильной усиливающей интерференции необходимо управление фазой, чтобы компенсировать фазовый шум, который в существующих конфигурациях МОРА связан с гетеродинным детектированием. По сведениям авторов, в настоящее время для достижения наивысшей мощности в МОРА-конфигурации используется активное управление фазой [5]. В системах с высокими мощностями пучков гетеродинное детектирование нельзя применять не только из-за наличия сложной системы управления фазой, но и вследствие частичной когерентности таких пучков [6, 7].

Для решения указанных проблем и масштабирования мощностей МОРА-систем до более высоких значений Л.Лиу [8, 9] и Я.Е.Кански [2] был предложен метод когерентного сложения пучков с помощью стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска (САПГС) без использования фазодетекторных компонентов. САПГС впервые был применен в адаптивной оптике [10, 11]. Если рассматривать когерентное сложение излучения волоконных лазеров как компенсацию цилиндрической фазовой аберрации единого пучка большой апертуры в монолитной оптической системе, то можно использовать САПГС напрямую для решения нашей задачи. К настоящему времени удалось когерентно суммировать 48 коллимированных микропучков при управлении фазой с помощью САПГС [2].

Цель настоящей работы заключается во всестороннем исследовании когерентного сложения достаточно большого числа лазерных пучков методом САПГС.

## 2. Постановка задачи

### 2.1. Схема установки

Предполагается, что в системе когерентного сложения пучков используется  $N$  элементарных пучков (см. рис.1, где для примера показаны только два канала). Лазерный пучок задающего генератора расщепляется на  $N$  каналов и вводится в фазовые модуляторы. Лазерные пучки из фазовых модуляторов направляются в волоконные усилители и оптические изоляторы, а затем в волоконные коллиматоры. Следует отметить, что для получения высоких мощностей обычно требуются мно-

\* Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

Pu Zhou, Xiaolin Wang, Xiao Li, Zilun Chen, Xiaojun Xu, Zejin Liu. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; e-mail: Zhoupu203@gmail.com

Поступила в редакцию 28 января 2009 г.

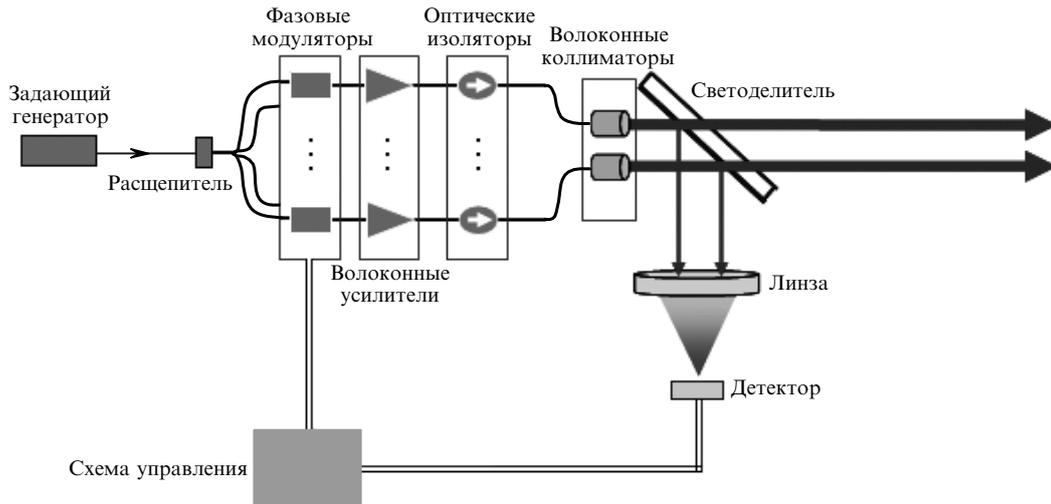


Рис.1. Установка для когерентного сложения методом САПГС.

гокаскадные волоконные усилители. Результирующее излучение выходит в свободное пространство через коллиматоры. Коллимированные выходные пучки разделяются на светоделителе. После светоделителя часть каждого из пучков попадает на фокусирующую линзу, которая формирует на детекторе изображение в дальней зоне. Полученная по этому изображению с помощью аналогово-цифрового преобразователя оценочная функция  $J = J(\mathbf{u})$  является функцией управляющих параметров  $\mathbf{u} = \{u_1, \dots, u_N\}$ , которыми обычно являются напряжения, приложенные к фазовым модуляторам. На каждом цикле алгоритма спуска на фазовые модуляторы через цифроаналоговый преобразователь и управляющую схему подается сигнал управления фазой. Другая часть излучения после светоделителя представляет собой искомым когерентно суммированный массив пучков. Задачей когерентного сложения пучков является получение максимальной энергии в центральном пике, т. е. максимизация оценочной функции  $J$  с помощью САПГС.

## 2.2. Теория САПГС

Теорию САПГС можно кратко сформулировать следующим образом [8]. Задана оценочная функция  $J = J\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , где  $u_i$  — управляющие напряжения ( $i = 1, \dots, n$ ), которые генерируются компьютером. Каждый итерационный цикл содержит следующие шаги:

1) формируются статистически независимые случайные возмущения  $\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n$ , где  $|\delta u_n|$  — малые величины, обычно выбираемые как статистически независимые переменные с нулевым средним значением и равными дисперсиями:  $\langle \delta u_k \rangle = 0$ ,  $\langle \delta u_k \delta u_l \rangle = \sigma^2 \delta_{kl}$ , где  $\delta_{kl}$  — символ Кронекера;

2) прикладываются управляющие напряжения с положительными возмущениями и вычисляется оценочная функция  $J^+ = J(u_1 + \delta u_1, u_2 + \delta u_2, \dots, u_n + \delta u_n)$ , затем прикладываются управляющие напряжения с отрицательными возмущениями и снова вычисляется оценочная функция  $J^- = J(u_1 - \delta u_1, u_2 - \delta u_2, \dots, u_n - \delta u_n)$ ;

3) вычисляется разность  $\delta J = J^+ - J^-$  между двумя полученными оценочными функциями;

4) изменяются управляющие напряжения  $u_i = u_i + \gamma \delta u_i \delta J$ , где  $\gamma$  — корректирующий коэффициент, причем  $\gamma > 0$  соответствует процедуре минимизации, а  $\gamma < 0$  — процедуре максимизации.

## 2.3. Оценочная функция

При использовании САПГС в адаптивной оптике [10] в качестве оценочных функций использовался набор параметров качества изображения, называемых функциями или параметрами резкости. Работа с оценочными функциями связана с вычислением матриц, которое требует большого времени и вряд ли подойдет для приложений реального времени. Параметр качества, предложенный в [11, 12], можно измерять в реальном времени, используя аналоговый когерентный оптоэлектронный процессор. В [8] оценочной функцией служила мощность излучения, прошедшего через калиброванное отверстие. Чтобы не усложнять систему, в данной работе в качестве оценочной функции когерентного сложения излучения волоконных лазеров использовалась мощность излучения, прошедшего через калиброванное отверстие.

## 3. Моделирование и анализ

### 3.1. Доказательство применимости

Поскольку на практике возмущающий сигнал изменяется во времени, характеристики всей системы будут зависеть от величины возмущения. Лазерная матрица сформирована в виде двух концентрических колец с шестью лазерами на внутреннем кольце и двенадцатью — на внешнем. Использовались следующие параметры лазерной матрицы: диаметр перетяжки пучка одиночного лазера  $w_0 = 1$  см, расстояние между соседними лазерами  $d = 3$  см. Среднеквадратичное отклонение погрешности фазы для лазерной матрицы составляет 3π. После анализа результатов большого количества численных экспериментов корректирующий коэффициент  $\gamma$  был выбран равным 4. На рис.2 показан усредненный результат 100 численных экспериментов. Таким образом, САПГС применим при когерентном сложении.

### 3.2. Оптимизация параметров

#### 3.2.1. Возмущения

Одним из ключевых элементов при использовании САПГС являются возмущения. В основном существуют четыре базовых типа распределения плотности вероятности для формирования возмущений с нулевыми средними значениями и равными дисперсиями: распределе-

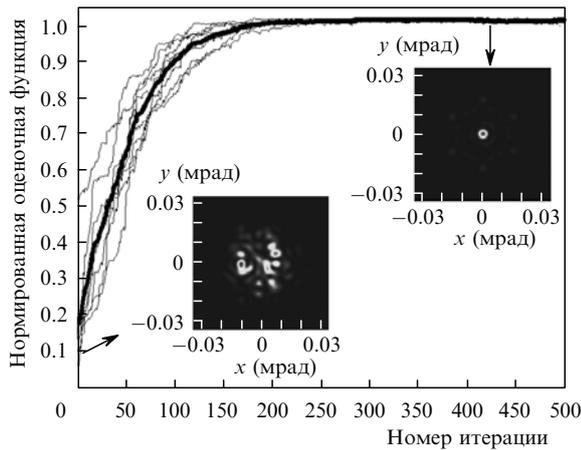


Рис.2. Зависимости нормированных оценочных функций от номера итерации при различных начальных возмущениях. На вставках даны примеры распределения интенсивности в дальней зоне до начала (слева) и в конце (справа) работы САПГС.

ние Бернулли, кусочно-равномерное, равномерное и нормальное распределения.

Нормированные оценочные функции для различных распределений плотности вероятности показаны на рис.3,а при параметрах распределений, аналогичных используемым для рис.2. Видно, что возмущения с распределением Бернулли обеспечивают самую высокую скорость схождения. Учитывая, что эти возмущения легко сгенерировать аппаратно, их следует использовать при когерентном сложении пучков. Другой параметр возму-

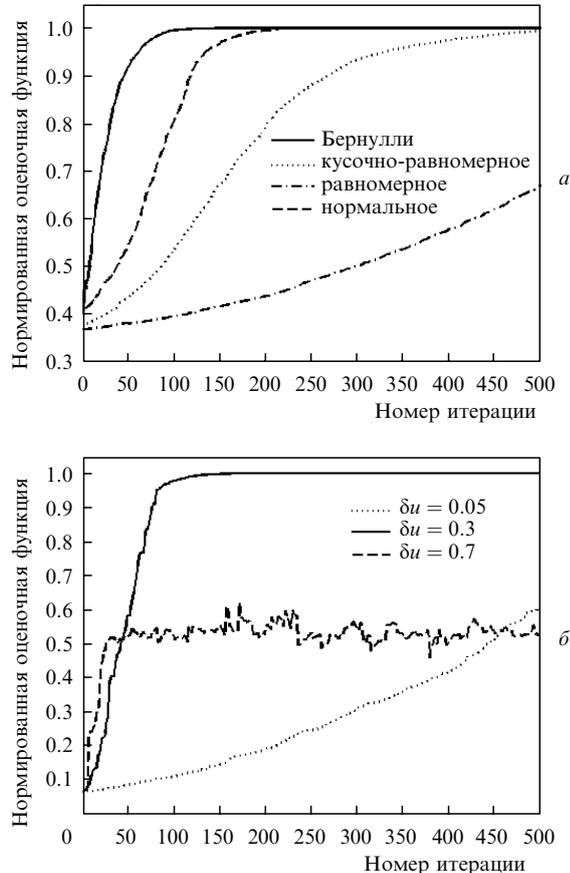


Рис.3. Зависимости нормированных оценочных функций от номера итерации для различных распределений плотности вероятности (а) и амплитуд возмущения  $\delta u$  (б).

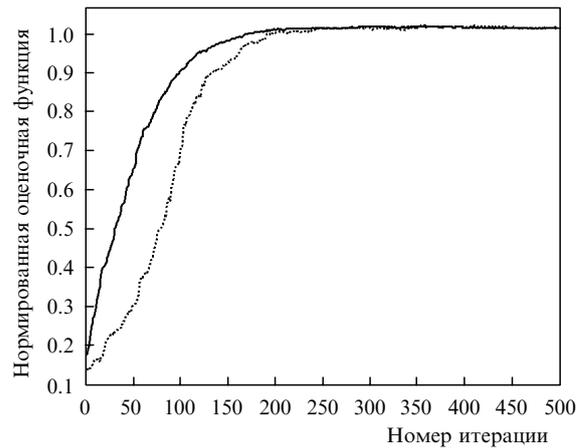


Рис.4. Зависимости нормированных оценочных функций от номера итерации при адаптивных (сплошная кривая) и постоянных (пунктирная кривая) корректирующих коэффициентах.

щения – амплитуда. Нормированные оценочные функции для различных амплитуд возмущения представлены на рис.3,б. Видно, что возмущения с меньшей амплитудой будут замедлять скорость сходимости, а возмущения с большей амплитудой будут вносить нестабильность в процесс когерентного сложения. Таким образом, можно заключить, что для процесса когерентного сложения пучков существует некоторая оптимальная амплитуда возмущений.

### 3.2.2. Корректирующий коэффициент

Одним из главных препятствий на пути потенциального применения того или иного метода оптимизации является скорость его сходимости [13]. Было показано, что в приложении к задачам адаптивной оптике скорость сходимости САПГС пропорциональна  $N^{1/2}$  [14]. Чтобы увеличить ее, можно модифицировать корректирующий коэффициент. В адаптивном САПГС параметр  $\gamma$  может принимать значения согласно формуле  $\gamma = \gamma_0 J_0 / J$ , где  $J_0$  – идеальное значение мощности излучения, прошедшего через калиброванное отверстие, которое вычисляется однократно после формирования системы когерентного сложения. Рассчитанные нормированные оценочные функции для постоянных и адаптивных коэффициентов показаны на рис.4. Видно, что адаптивные коэффициенты обеспечивают большую скорость схождения. Дальнейшие статистические исследования при большем числе расчетов показывают, что использование адаптивного корректирующего коэффициента может увеличить скорость схождения, по крайней мере, на 15 %.

### 3.2.3. Границы применимости алгоритма

Были проведены исследования по когерентному сложению сигналов волоконных усилителей методом САПГС для различных лазерных матриц (т. е. для матриц из 37 лазеров или 61 лазера). Зависимость числа шагов, необходимых для выполнения критерия сходимости, от числа пучков показана на рис.5. Видно, что при когерентном суммировании  $N$  лазерных пучков, скорость схождения линейно зависит от  $N$ . Это обстоятельство серьезно затрудняет применение САПГС для сложения излучения относительно большого числа мощных волоконных усилителей. Кроме того, остается открытым вопрос о скорости нарастания фазового шума при увеличении сигнала на выходе волокна [15].

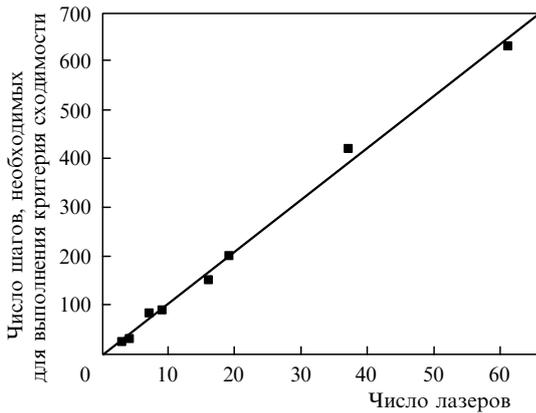


Рис. 5. Расчетная зависимость числа шагов, необходимых для выполнения критерия сходимости, от числа лазеров (точки) и ее линейная аппроксимация (прямая).

Таким образом, при масштабировании мощности волоконного лазера до киловаттного уровня полосу пропускания системы управления фазой необходимо расширять. Это означает, что эффективная ширина полосы пропускания системы когерентного сложения на основе САПГС уменьшается при увеличении мощности лазерного пучка и числа пучков. Мы полагаем, что решение этой проблемы можно осуществить в три этапа. Во-первых, необходимо использовать более совершенный САПГС-контроллер с более высокой частотой обновления данных. Во-вторых, следует принять меры для уменьшения влияния фазовых искажений. И в-третьих, необходимо модифицировать САПГС для повышения скорости схождения при увеличении числа лазеров.

#### 4. Выводы

В настоящей работе показана возможность применения САПГС для когерентного сложения излучения волоконных усилителей. Обнаружено, что для улучшения ка-

чества системы сложения требуется оптимизация параметров алгоритма. Для этого необходимо использовать возмущения с распределением Бернулли с подходящей амплитудой и адаптивный корректирующий коэффициент. Применение метода для большого числа лазеров ограничивается полосой пропускания системы обратной связи. Преимущества сложения пучков методом САПГС делают его настолько привлекательным, что возникло уже несколько проектов в этом направлении [16, 17]. Мы уверены, что алгоритм обладает значительным потенциалом для построения высокоэнергетичных лазерных систем новой архитектуры.

Настоящая работа выполнена при поддержке Фонда инновационных исследований для выпускников Национального университета оборонной технологии (грант B070701).

1. Fan T.Y. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 567 (2005).
2. Kanskya J.E., Yua Ch.X., Murphya D.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6306**, 63060G (2006).
3. Huo Y., Cheo P.K., King G.G. *Opt. Express*, **12**, 6230 (2004).
4. Shirakawa Akira, Saitou Tomoharu, Sekiguchi Tomoki, et al. *Opt. Express*, **10**, 1167 (2002).
5. Anderegg J., Brosnan S., Cheung E., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6102**, 61020U (2006).
6. Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., et al. *Opt. Express*, **12**, 6088 (2004).
7. Sprangle Ph., Penano J., Ting A., et al. <http://www.strommedia.us/25/2542/A254254.html>
8. Liu L., Vorontsov M.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5895**, 58950P (2005).
9. Liu L., Vorontsov M.A., Polnau E., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6708**, 67080K (2007).
10. Muller R.A., Buffington A. *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 1200 (1974).
11. Vorontsov M.A., Carhart G.W. *Opt. Lett.*, **22**, 907 (1997).
12. Vorontsov M.A., Carhart G.W. *J. Opt. Soc. Am. A*, **17**, 1440 (2000).
13. Spall J.C. *Introduction to Stochastic Search and Optimization* (New York: Wiley Interscience, 2003).
14. Vorontsov M.A., Sivokon V.P. *J. Opt. Soc. Am. A*, **15**, 2745 (1998).
15. Augst S.J., Fan T.Y., Sanchez A. *Opt. Lett.*, **29**, 474 (2004).
16. Vorontsov M.A., Lachinova S.L. *J. Opt. Soc. Am. A*, **25**, 1949 (2008).
17. Lachinova S.L., Vorontsov M.A. *J. Opt. Soc. Am. A*, **25**, 1960 (2008).