

Высокоскоростной высокоэффективный фазовый контроллер для объединения когерентных пучков на основе алгоритма стохастического параллельного градиентного спуска*

З.М.Хуанг, С.Л.Лю, Дж.Ф.Ли, Д.Ю.Чжанг

На основе алгоритма стохастического параллельного градиентного спуска и программируемой пользователем вентильной матрицы (FPGA) разработан и изготовлен фазовый контроллер для когерентного объединения пучков (СВС) волоконных лазеров. Проведенный теоретический анализ показал, что скорость итераций контроллера составляет более 1.9 МГц, а средняя ширина полосы компенсации СВС в случае 5 и 20 каналов – 50 и 12.5 кГц соответственно. Экспериментальное тестирование показало, что созданный фазовый контроллер обеспечивает фазовую синхронизацию лазеров: если излучения пяти лазеров синхронизованы за счет улучшенной стратегии управления с переменным коэффициентом усиления, то энергия на мишени повышается в 23 раза по сравнению с энергией, обеспечиваемой одним лазером, точность управления фазой оказывается лучше, чем $\lambda/20$, а эффективность объединения излучений по энергии составляет 92%.

Ключевые слова: когерентная оптика, массивы волоконных лазеров, объединение пучков, стохастический параллельный градиентный спуск, фазовый контроллер.

1. Введение

Лазеры с высокой мощностью и хорошим качеством пучка широко применяются при обработке материалов, в медицине и различных датчиках. Из-за ограничений вследствие тепловых и нелинейных эффектов излучение одного лазера не может иметь огромную энергию при хорошем качестве пучка. Многочисленные успешные демонстрации систем объединения когерентных пучков высокой мощности (СВС) методом активной фазовой синхронизации матрицы усилителей мощности задающего генератора (МОР), проведенные в последние годы [1–9], указывают путь, на котором может быть достигнута большая яркость излучения при использовании нескольких лазерных источников.

Ключевым элементом этого метода является активное фазирование, которое может быть реализовано в рамках разных подходов: техники фазового управления с гетеродинным детектированием [10], техники мультисглаживания [11, 12], техники контроля фаз алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD) [13, 14] и техники одночастотного сглаживания [15]. Для когерентного объединения n каналов методом гетеродинирования требуются n фотодетекторов и n -канальная схема обработки сигналов, так что система является слишком сложной. Методы мультисглаживания и одночастот-

ного сглаживания реализуются только с одним детектором, но они нуждаются в модуляции и демодуляции всех каналов сигнала, а стратегии управления этими методами сложны. Система когерентного объединения, основанная на алгоритме оптимизации SPGD, проста и компактна, поэтому она широко используется. Ее ядром является фазовый контроллер.

В 2005 г. Liu с соавторами [16] разработали на основе компьютера фазовый SPGD-контроллер, скорость итераций которого была равна 16 кГц, а ширина полосы пропускания системы управления – 310 Гц. В 2007 г. они же использовали вместо компьютера AVR-микропроцессор, и скорость итераций контроллера возросла до 95 кГц, а полоса пропускания компенсационного управления достигла 100 Гц [17]. В 2009 г. контроллер был улучшен, скорость итераций для семи каналов достигла 1 кГц, а ширина полосы управления фазовым шумом составила 1 кГц [18]. В 2009 г. Yang Ruo-fu [19] получил когерентное объединение излучений двух волоконных усилителей с использованием DSP-процессора на основе SPGD-алгоритма при ширине полосы управления 50 Гц. В 2010 г. Wang Xiao-lin [20] разработал фазовый контроллер на основе SPGD-алгоритма с использованием DSP-процессора для двухканального последовательного объединения. Скорость итераций составила 200 кГц, а средняя ширина полосы управления превысила 12.5 кГц.

Кроме того, контроллеры на основе SPGD-алгоритма были разработаны для очистки пучка и адаптивного управления пучком. Так, Wang San-hong с соавторами управляли 37 элементами деформируемой зеркальной системы, в которой использовался такой контроллер, при скорости итераций около 100 Гц [21]. В настоящей статье описывается фазовый контроллер на основе SPGD-алгоритма с использованием программируемой пользователем вентильной матрицы (FPGA) для когерентного объединения излучений.

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

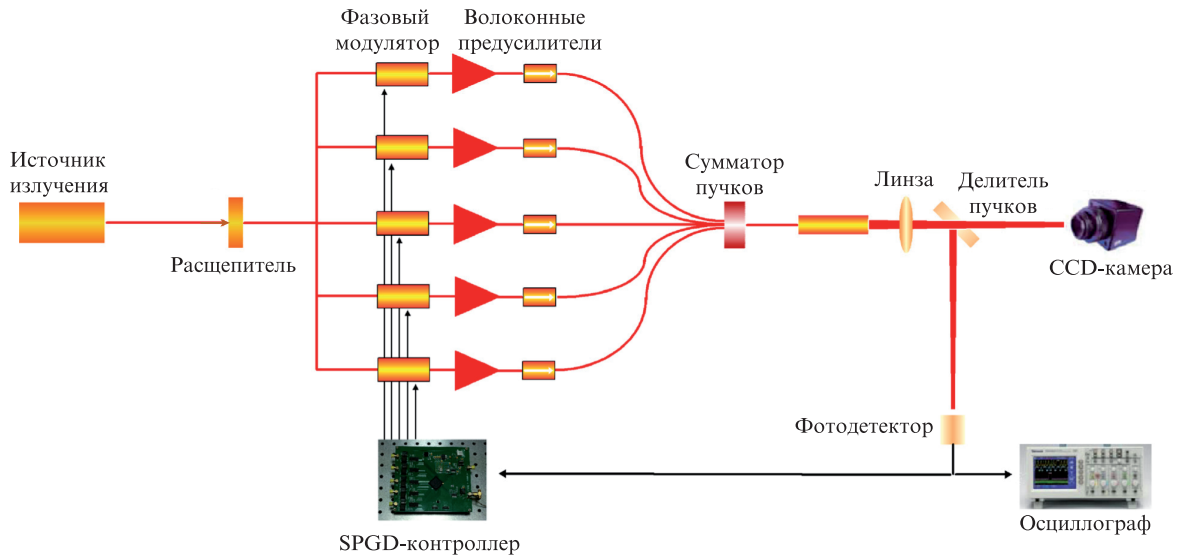


Рис.1. Схема установка для объединения когерентных пучков с использованием SPGD-алгоритма.

2. Принцип когерентного объединения на основе SPGD алгоритма

Конфигурация системы для когерентного объединения излучений на основе алгоритма SPGD показана на рис.1. Лазерный пучок после оптического изолятора расщепляется на пять пучков, управляемых фазовыми LiNbO_3 -модуляторами. Излучения с пяти волоконных выходов модуляторов объединяются с помощью интегрированного объединителя пучка, который в высокоэнергетических системах может быть заменен, например, дифракционными оптическими элементами. Далее излучение проходит через коллиматор пучка (диаметр выходного пучка 14 мм), а затем расщепляется делителем 50:50 на два. Один пучок линзой с фокусным расстоянием 1 м проецируется на CCD-камеру, а другой, такой же линзой, — на фотодетектор (усилитель-детектор на основе InGaAs на диапазон длин волн 700–1800 нм с размером апертуры 800 мкм и полосой пропускания 17 МГц при усилении 0 дБ), расположенный в ее фокальной плоскости. Выходной сигнал с фотодетектора поступает в контроллер.

Фазовые модуляторы реализуют точный фазовый контроль с использованием SPGD-алгоритма, состоящего из бесконечного числа итераций (итерационный процесс останавливается вручную). Пусть задана метрическая функция $J = J(u)$, где $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$; u_j — управляющие сигналы, приложенные к фазовым модуляторам. Одна итерация активного фазирования с использованием этого алгоритма состоит из следующих этапов:

1. Генерация статистически независимых случайных возмущений, преобразуемых в малые изменения напряжения $\delta u^{(k)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}^{(k)}$ (k — номер итерации, n — число каналов).

2. Приложение к фазовым модуляторам положительных управляющих возмущений напряжения и измерение метрической функции $J^+ = j(u + \delta u)$, а затем — метрической функции $J^- = j(u - \delta u)$, соответствующей отрицательным управляющим возмущениям.

3. Расчет разности $\delta J = J^+ - J^-$ и формирование новых управляющих напряжений $u_j^{(k+1)} = u_j^{(k)} - \xi \delta J^{(k)} \delta u_j^{(k)}$, где $\xi = \gamma_k / \sigma^2$; γ_k — коэффициент усиления; k — номер итерационного шага.

3. Конструкция фазового контроллера

На рис.2 представлена блок-схема фазового контроллера. На каждой итерации FPGA, как ядро контроллера, генерирует случайный вектор возмущений $\delta u^{(k)}$, так что положительные и отрицательные возмущающие сигналы $u^{(k)} \pm \delta u^{(k)}$ прикладываются к фазовым модуляторам через цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) и усилители напряжения, которые изменяют фазы излучения лазерных пучков. Таким образом, оценочные функции $J_-^{(k)}$ и $J_+^{(k)}$, измеряемые согласно схеме рис.1, изменяются. Эти оценочные функции измеряются с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В соответствии с градиентом оценочной функции FPGA изменяет управляющие параметры.

3.1. Управление полосой пропускания

Характерные времена отдельных этапов одной итерации алгоритма схематично представлены на рис.3. Ширина полосы пропускания фотодетектора по уровню 0 дБ в системе когерентного объединения составляет 17 МГц, а его временная задержка — 59 нс. Время задержки АЦП (AD9224) равно 13 нс. Таким образом, предстартовая задержка функции оценки $t_1 = 72$ нс.

Выходная задержка сигнала управления определяется временной задержкой между моментом появления управляющего сигнала в микросхеме алгоритма управления и моментом, в который в фазовом модуляторе генерируется соответствующий отклик. Цифровой сигнал управле-

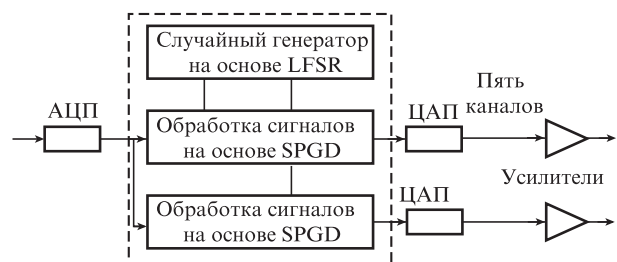


Рис.2. Блок-схема фазового контроллера на основе SPGD-алгоритма.

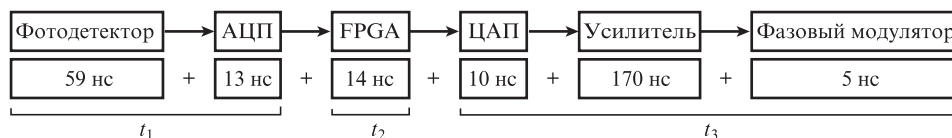


Рис.3. Времена задержки управления системой.

ния от FPGA обрабатывается ЦАП AD768 (время задержки 10 нс) и поступает в усилитель (время задержки 170 нс), а затем на фазовый модулятор (время задержки 5 нс). Следовательно, полная задержка составляет 185 нс.

Задержка обработки данных $t_2 = 14$ нс контроллера равна задержке между моментом появления на входе контроллера сигнала оценки и моментом возникновения управляющего сигнала в FPGA.

Таким образом, время одной итерации системы $T_0 = 2t_1 + t_2 + 2t_3$ составляет 528 нс, а скорость итераций равна 1.9 МГц. После оптимизации параметров ширина полосы управления системы для $M = 5$ пучков

$$F = (8MT_0)^{-1} = 50 \text{ кГц.} \tag{1}$$

Средняя ширина полосы компенсации для 2 и 20 каналов составляет 125 и 12.5 кГц соответственно.

3.2. Точность управления

Точность управления реальной системой в нашем случае может быть оценена как

$$\delta\lambda = \frac{\delta u}{2V_\pi} \lambda = \frac{1}{21} \lambda, \tag{2}$$

где V_π – напряжение на модуляторе, изменяющее фазу излучения на π .

4. Эксперимент по когерентному объединению излучения с использованием фазового контроллера

С использованием разработанного фазового контроллера был проведен эксперимент по когерентному объединению излучения пяти волоконных лазеров (см. рис.1). Поскольку эксперимент выполнялся для проверки характеристик контроллера, волоконные усилители отсутствовали.

Согласно теоретическим расчетам, возмущения напряжений в эксперименте по когерентному объединению должны иметь распределение Бернулли. Функция оценки J определяется как энергия, регистрируемая детектором. Управляющее напряжение задается в виде

$$u_j^{(k+1)} = u_j^{(k)} + \frac{\gamma_n (J^+ - J^-)}{\sigma^2 J_{\max}} \delta u_j^{(k)}. \tag{3}$$

В соответствии с формулой (3) сигнал напряжения u , приложенный к фазовому модулятору, непрерывно итерируется и обновляется. Для нахождения амплитуды возмущения σ и коэффициента усиления γ использовался следующий подход. Сначала амплитуда возмущений σ устанавливалась равной 0,3 рад·с, а коэффициент усиления варьировался от 0.28 до 0.8. При $\gamma = 0.28$ функция оценки J растет медленно, т. е. для нахождения оптимума требу-

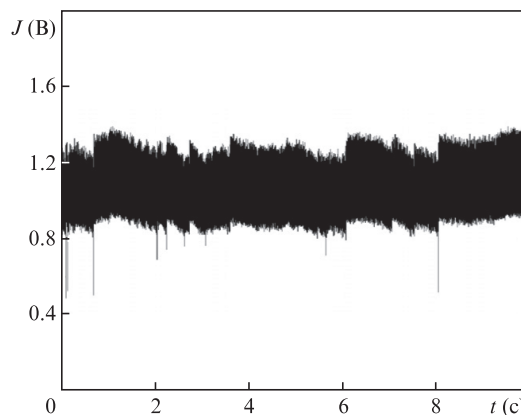


Рис.4. Функция управления J для пяти пучков при $\gamma = 0.8$.

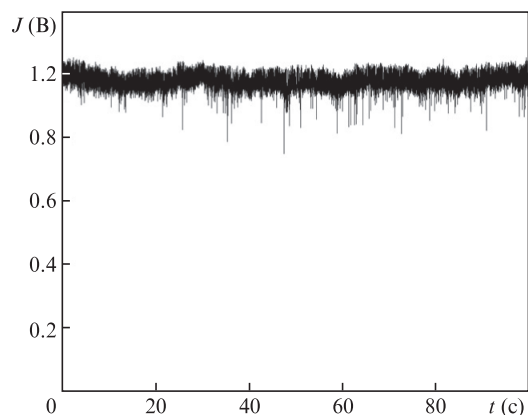


Рис.5. Функция управления J для пяти пучков при $\gamma = 0.5$.

ется большое число итерационных шагов. При $\gamma = 0.8$ J осциллирует, и управление объединением пяти пучков оказывается нестабильным (рис. 4).

При $\gamma = 0.5$ алгоритм устойчив (рис.5), а $J = 980$ мВ, что в 19.6 раз больше, чем для одного канала. Таким образом, эффективность объединения достигает 78.4%.

Для нахождения максимума функции оценки (наилучшего объединения пучков) и во избежание локальных экстремумов и осциллирующих режимов необходима улучшенная стратегия управления с использованием переменной коэффициента усиления и переменной амплитуды возмущения. С этой целью устанавливается связь коэффициента усиления и амплитуды возмущения:

$$\frac{\gamma}{\sigma^2 J_{\max}} = C = \text{const}, \tag{4}$$

где J_{\max} – максимальное значение функции оценки в текущем цикле. Диапазон изменения амплитуды возмущений $u_i(\sigma)$ делится на девять градаций:

$$J > 95\% J_{\max}, u_r = 0.111 \text{ рад};$$

- $J > 90\%J_{\max}, u_r = 0.111$ рад;
- $J > 85\%J_{\max}, u_r = 0.147$ рад;
- $J > 80\%J_{\max}, u_r = 0.184$ рад;
- $J > 75\%J_{\max}, u_r = 0.221$ рад;
- $J > 70\%J_{\max}, u_r = 0.258$ рад;
- $J > 65\%J_{\max}, u_r = 0.295$ рад;
- $J > 60\%J_{\max}, u_r = 0.332$ рад;
- $J > 60\%J_{\max}, u_r = 0.405$ рад.

Изменение величины J на дисплее осциллографа при изменении коэффициента усиления C показано на рис.6.

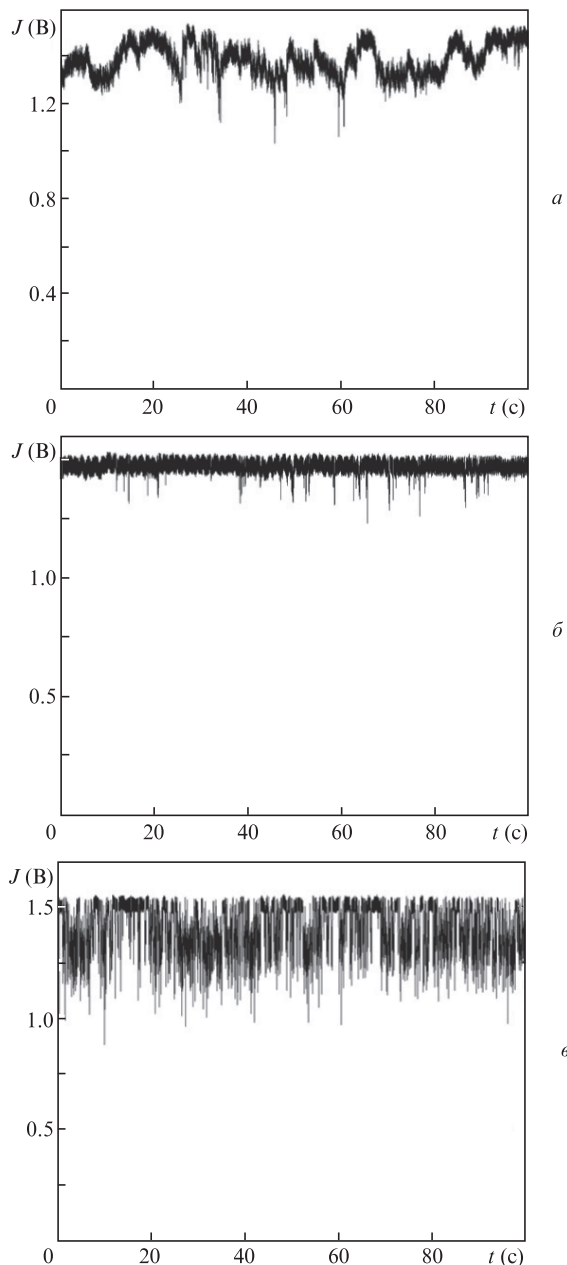


Рис.6. Функция оценки J при $C = 0.00073$ (а), 0.00317 (б) и 0.03125 (в).

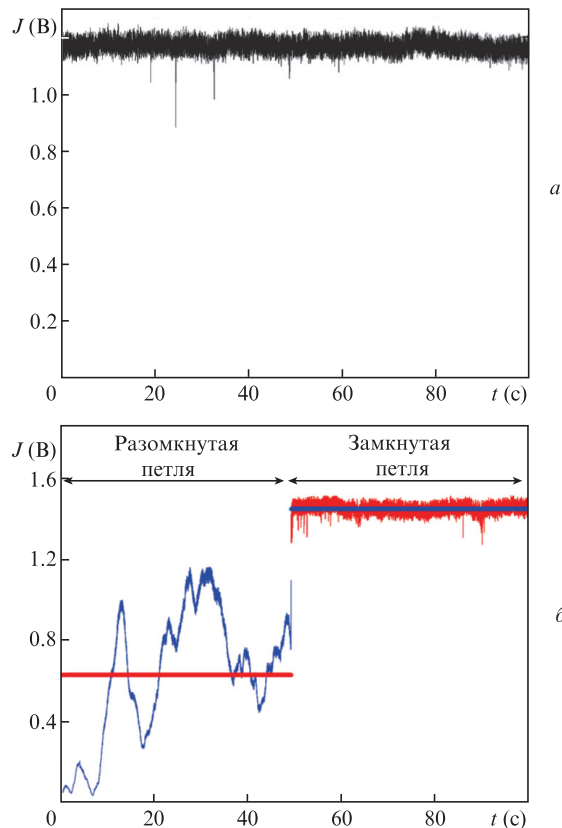


Рис.7. Функция оценки J для пяти лазеров при нахождении системы в состоянии замкнутой петли (а) и в случае перехода из разомкнутого состояния в замкнутое (б).

Если коэффициент усиления слишком велик или слишком мал, синхронизация фазы будет неустойчивой. На рис.6,а ($C = 0.00073$) фазовое управление нестабильно и мощность сигнала испытывает большие флуктуации. При оптимальном значении $C = 0.00317$ (рис.6,б) управление фазой стабильно, а при $C = 0.03125$ (рис.6,в) – снова неустойчиво.

Если фазовый контроллер не исполняет SPGD-алгоритм, система находится в разомкнутом состоянии (разомкнутая петля), а величина J постоянно меняется. Если же система переходит к состоянию замкнутой петли, значение J становится устойчивым (рис.7). В состоянии замкнутой петли среднее значение функции оценки увеличивается в 23 раза по отношению к значению, характерному для работы системы с одним каналом, и эффективность объединения пяти пучков составляет 92%.

Распределение интенсивности в дальней зоне также зависит от режима работы контроллера (рис.8): если фазовый контроллер выполняет SPGD-алгоритм, мощность выходного пучка значительно увеличивается и CCD-камера находится в состоянии насыщения.

5. Выводы

Нами разработан и изготовлен фазовый контроллер для когерентного объединения пучков волоконных лазеров, основанный на алгоритме стохастического параллельного градиентного спуска. Скорость его итераций составляет более 1.9 МГц, а точность управления лучше, чем $\lambda/20$, что существенно лучше соответствующих характеристик ранее созданных аналогичных контроллеров.

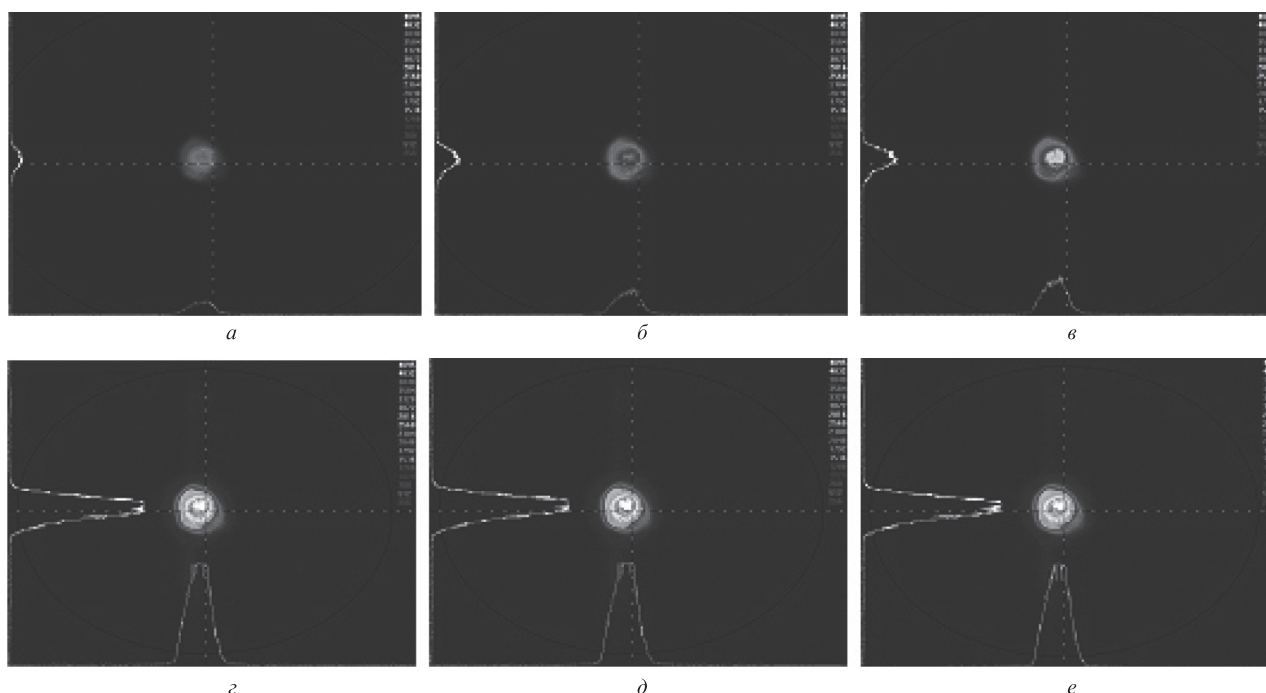


Рис.8. Распределение интенсивности в дальней зоне при нахождении системы в состоянии разомкнутой петли (а–в) и в случае перехода из разомкнутого состояния в замкнутое (z–e).

Ширина полосы компенсации созданного контроллера для 5 и 20 каналов составляет 50 и 12.5 кГц соответственно. В эксперименте по синхронизации фаз излучения пяти волоконных лазеров с помощью усовершенствованной стратегии управления с переменным коэффициентом усиления среднее значение функции оценки улучшается в 23 раза по сравнению со случаем одного канала, а эффективность объединения составляет 92%.

Работа поддержана Фондом Китайской академии инженерной физики (грант № 2009A0404024) и Фондом развития IFP (грант № SFZ20110304).

- Agust S.J., Fan T.Y., Sanchez A. *Opt. Lett.*, **29** (5), 474 (2004).
- Hou J., Xiao R., Jiang Z.F. *Chin. Phys. Lett.*, **22** (9), 2273 (2005).
- Sevian A., Andrusyak O., Ciapurin I. *Opt. Lett.*, **33** (4), 354 (2008).
- Anderegg J., Brosnan S., Cheung E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6102**, 61020U-1 (2006).
- Slavk R., Parmigiani F., Kakande J. *Nature Photon.*, **4**, 690 (2010).
- Kurita T., Sueda K., Tsubakimoto K. *Opt. Express*, **18** (14), 14541 (2010).
- Huang Z.M., Zhang D.Y., Luo Y.Q., Li J.F., Liu C.L. *Appl. Phys. B*, **101** (3), 559 (2010).
- Fan T.Y. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11** (3), 567 (2005).
- Huang Z.M., Liu C.L., Li J.F., Zhang D.Y., Wang H.F., Luo Y.Q., Hu Q.Q. *Laser. Phys.*, **22** (8), 1347 (2012).
- Xiao R., Hou J., Liu M. *Opt. Express*, **16** (3), 2015 (2008).
- Shay T.M. *Opt. Express*, **14** (25), 12188 (2006).
- Shay T.M., Benham V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5550**, 313 (2004).
- Liu L., Vorontsov M.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5895**, 58950P (2005).
- Weyrauch T., Vorontsov M.A., Carhart G.W. *Opt. Lett.*, **36** (22), 4455 (2011).
- Ma Y., Zhou P., Wang X., Ma H., Xu X., Si L., Liu Z., Zhao Y. *Opt. Lett.*, **35** (9), 1308 (2010).
- Liu L., Vorontsov M.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5895**, 58950P (2005).
- Liu L., Vorontsov M.A., Polnau E.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6708**, 67080K-1 (2007).
- Vorontsov M.A., Weyrauch T., Beresnev L.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15** (2), 269 (2009).
- Yang R.F., Yang P., Shen F. *Acta Phys. Sinica*, **58** (12), 8287 (2009).
- Wang X.L., Zhou P., Ma Y.X. *Acta Phys. Sinica*, **59** (2), 973 (2010).
- Wang S.H., Liang Y.H., Ma H.T. *Chinese J. Lasers*, **36** (10), 2763 (2009).