

УДК 621.375:551.521

## Апробация стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска в лабораторных экспериментах

В.А. Банах<sup>1</sup>, А.В. Ларичев<sup>2</sup>, И.А. Разенков<sup>1</sup>, А.Н. Шестернин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Лаборатория адаптивной оптики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова  
119899, г. Москва, Воробьевы Горы, ГСП-3

Поступила в редакцию 20.08.2012 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по компенсации искажений начального волнового фронта лазерного пучка с использованием стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска (САПГС). Показано, что для рассмотренных в эксперименте типов aberrаций волнового фронта оптимальный выбор начального и итерационного шагов алгоритма и коэффициента шумового порога позволяет обеспечить компенсацию основных искажений волнового фронта за 150–200 итераций САПГС.

*Ключевые слова:* лазерный пучок, гибкое зеркало, стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска; laser beam, deformable mirror, stochastic parallel gradient descent algorithm.

### Введение

На высотных трассах в атмосфере турбулентные искажения лазерного излучения невелики, и для частично когерентных пучков основным фактором, определяющим дополнительное к дифракционному уширение пучка, являются начальные aberrации волнового фронта. В работах [1, 2] представлены результаты численного исследования эффективности системы коллимации начального волнового фронта пучка, в которой для замыкания обратной связи используется сигнал обратного атмосферного рассеяния дополнительного «зондирующего» излучения, имеющего те же начальные искажения волнового фронта, что и основной пучок. Моделирование распространения обратно рассеянного излучения в [1, 2] осуществлялось с использованием подхода, представленного в работах [3–6].

При компьютерном моделировании в [1, 2] был реализован алгоритм управления гибким зеркалом, использующий в качестве управляющего сигнала среднюю мощность обратно рассеянного зондирующего излучения. Предполагалось, что искажения волнового фронта основного и зондирующего пучков, возникающие в оптическом тракте передающего телескопа, определяются низшими aberrациями и вносимый гибким зеркалом фазовый набег  $\psi(\rho)$  можно представить в виде разложения по полиномам Цернике  $Z_i(r, \theta)$ : 
$$\psi(z, y) = \sum_{i=0}^9 C_i Z_i(r, \theta),$$

где  $\rho = \{z, y\}$  – декартовы,  $r, \theta$  – полярные координаты заданной точки волнового фронта пучка в плоскости зеркала. Управление гибким зеркалом при моделировании осуществлялось через коэффициенты  $C_i$ .

Однако на практике, чтобы избежать процедуры измерения функций влияния управляемых элементов гибкого зеркала, необходимых для определения коэффициентов Цернике  $C_i$ , работу гибкого зеркала можно организовать на основе непосредственного управления напряжениями на элементах зеркала без применения разложений по полиномам Цернике. Для управления напряжениями в этом случае может использоваться стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска (САПГС) [7]. В данной статье представлены результаты лабораторных исследований САПГС.

### 1. Экспериментальная установка

Для исследования работы САПГС по восстановлению волнового фронта пучка лазерного излучения в лабораторных условиях был создан экспериментальный стенд (рис. 1).

Излучение точечного источника света 1 от непрерывного лазера мощностью 500 мВт с длиной волны  $\lambda = 532$  нм через диафрагму 2 падает на формирующий объектив 3 ( $F = 500$  мм,  $d = 100$  мм). На гибкое зеркало U-Flex-56-MDL-57 [8] 4 (которое может заменяться плоским зеркалом 4<sup>1</sup>) падает коллимированный пучок ( $d = 40$  мм). Интерферограмма 15 строится с помощью интерферометра 5, а функция размытия точки 14 получается с помощью системы, состоящей из делителя излучения 6,

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Викторович Ларичев (larichev@optics.ru); Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru), Андрей Николаевич Шестернин (san@iao.ru).

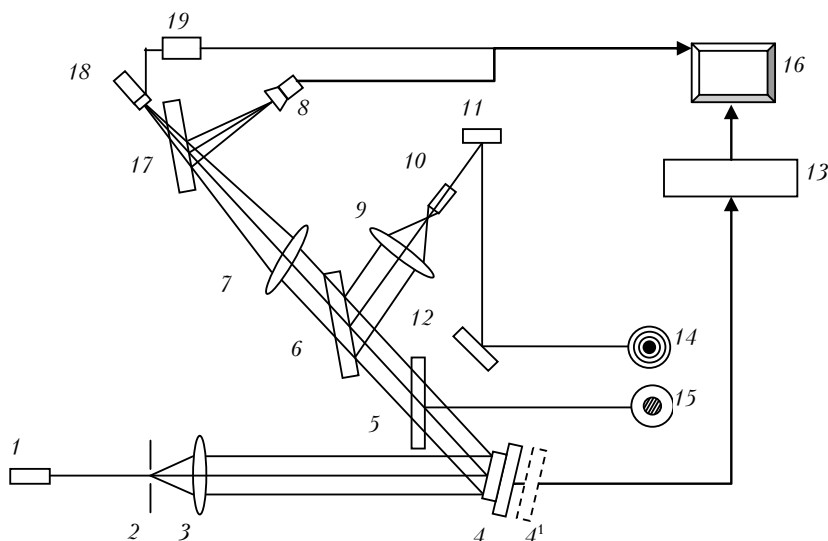


Рис. 1. Схема стенда для проведения экспериментов по восстановлению волнового фронта с помощью гибкого зеркала

объектива 9 ( $F = 500$  мм,  $d = 100$  мм), 16-кратного окуляра  $F = 0,16$  мм 10 и двух плоских зеркал 11, 12. Изображения интерферограммы и дифракционной картины на экране дают информацию о волновом фронте и распределении интенсивности в пучке.

Коллимированный пучок, отраженный гибким 4 (либо плоским 4') зеркалом, с помощью делителя излучения 17 фокусируется линзой 7 ( $F = 1500$  мм,  $d = 100$  мм) на приемную матрицу (размером  $1280 \times 1024$  пикселя) цифровой видеокамеры (CONTOUR IR digital) 8 (USB) без оптики и на фотоприемник 18 (ФЭУ с диафрагмой 40 мкм либо фотодиод ФД-24К с диафрагмой 15 мкм). В качестве управляющего сигнала для выработки напряжений на каждом итерационном шаге использовалась мощность излучения в пучке, которая либо регистрировалась фотоприемником, либо рассчитывалась по распределению интенсивности на площадке определенного размера в видеоизображении пучка, если использовалась видеокамера.

Значения мощности регистрируемого сигнала на фотоприемнике с помощью АЦП NI USB-6008 [9] 19 и изображение пучка, регистрируемое видеокамерой, передаются в персональный компьютер 16, где с помощью программной реализации САПГС рассчитываются управляющие напряжения для гибкого зеркала на очередном шаге. Блок управления гибким зеркалом [8] 13 с использованием результатов работы САПГС формирует временной профиль управляющих напряжений с глубиной модуляции  $\pm 300$  В независимо в каждом из каналов и осуществляет управление гибким зеркалом через интерфейс USB. Число каналов (элементов) гибкого зеркала в экспериментах составляло 32. Частота управления 1 кГц.

## 2. Стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска

Обозначим через вектор  $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$  набор управляющих напряжений, подаваемых на эле-

менты гибкого зеркала. С помощью напряжений  $\mathbf{U}$  изменяется поверхность гибкого зеркала, тем самым вносятся изменения в фазу  $\psi$  волнового поля падающего на зеркало пучка. В качестве управляющего сигнала для выработки напряжений на элементах гибкого зеркала в наших экспериментах использовалась средняя мощность излучения в пучке  $P$ . Эта средняя мощность может рассматриваться как функция управляющих напряжений  $P(\mathbf{U})$  и должна максимизироваться в результате итерационного изменения напряжений на элементах гибкого зеркала.

Суть САПГС заключается в следующем. На  $k$ -й итерации ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) измеряются два сигнала:

$$P_+^{(k)} = P(u_i^{(k-1)} + \delta u_i^k) \text{ и } P_-^{(k)} = P(u_i^{(k-1)} - \delta u_i^k),$$

где  $i = 1, \dots, N$ ;  $u_i^{(k-1)}$  — напряжения, подававшиеся на элементы зеркала на предыдущей итерации;  $\delta u_i^{(k)} = b_i^{(k)} \delta u_0$  — приращения напряжения на элементах зеркала на  $k$ -й итерации;  $b_i^{(k)}$  — псевдослучайные числа Бернулли [7];  $\delta u_0$  — начальный шаг приращения напряжения. Затем рассчитываются новые напряжения

$$u_i^{(k)} = u_i^{(k-1)} + \gamma \delta u_i^{(k)} (P_+^{(k)} - P_-^{(k)}) / (P_+^{(k)} + P_-^{(k)}) \quad (1)$$

( $\gamma$  — эмпирическая константа, определяющая итерационный шаг алгоритма). При положительном значении разности  $P_+^{(k)} - P_-^{(k)}$  итерационный шаг  $\delta u_i^{(k)}$  берется с положительным знаком, при отрицательном — с отрицательным знаком. Таким образом, на каждой итерации изменение управляющих напряжений направлено на увеличение регистрируемой средней мощности в пучке. В качестве параметра эффективности работы САПГС использовалось число Штреля, которое рассчитывалось как отношение средней регистрируемой мощности на каждой итерации САПГС к средней мощности в пучке в отсутствие искажений начального волнового фронта пучка.

Чтобы учесть влияние собственных шумов приемной системы, при реализации алгоритма (1) был введен коэффициент шумового порога  $\alpha$ , с помощью которого отфильтровывались приращения управляющих напряжений, если их величина на очередном итерационном шаге не превышала уровень шума. Начальный шаг приращения напряжения  $\delta u_0$ , константа  $\gamma$  и коэффициент  $\alpha$  в экспериментах подбирались экспериментально. На рис. 2 показано влияние вариаций этих параметров на эффективность работы САПГС в случае, когда средняя мощность пучка регистрировалась с помощью ФЭУ.

Из представленных на рис. 2, *а* результатов следует, что оптимальный выбор коэффициента  $\alpha = 0,5$  В (кривая 1) позволяет существенно ускорить достижение максимального значения параметра Штреля при работе САПГС. Превышение этого значения ( $\alpha = 1$  В (кривая 3)) или занижение (кривые 2, 4–7) приводят к увеличению числа итераций работы САПГС, необходимых для достижения предельного уровня значений параметра Штреля. При значительном превышении коэффициента шумового порога  $\alpha$  шумового уровня  $n$  отбрасывается часть

«полезных» управляющих сигналов, а с его уменьшением при условии  $\alpha < n$  все большая часть управляющих сигналов «тонет» в шумах. В связи с этим может потребоваться нереально большое число итераций для достижения максимального значения параметра Штреля, так как при реализации соотношений  $u_i^k - u_i^{(k-1)} < n$  алгоритм не способен правильно выбрать знак приращения управляющих напряжений. Результаты экспериментальных исследований зависимости сходимости САПГС от коэффициента  $\alpha$  позволяют не только повысить эффективность работы алгоритма, но и оценить уровень собственных шумов приемной системы.

Из рис. 2, *б, в* следует, что вариации начального шага  $\delta u_0$  и значений коэффициента  $\gamma$ , определяющего итерационный шаг  $u_i^k - u_i^{(k-1)}$ , сказываются на эффективности САПГС одинаковым образом. Занижение начального и итерационного (коэффициент  $\gamma$ ) шагов по сравнению с оптимальными приводит к замедлению выхода на максимальное значение параметра Штреля, а их неоправданное завышение мешает добиться устойчивой максимизации этого параметра.

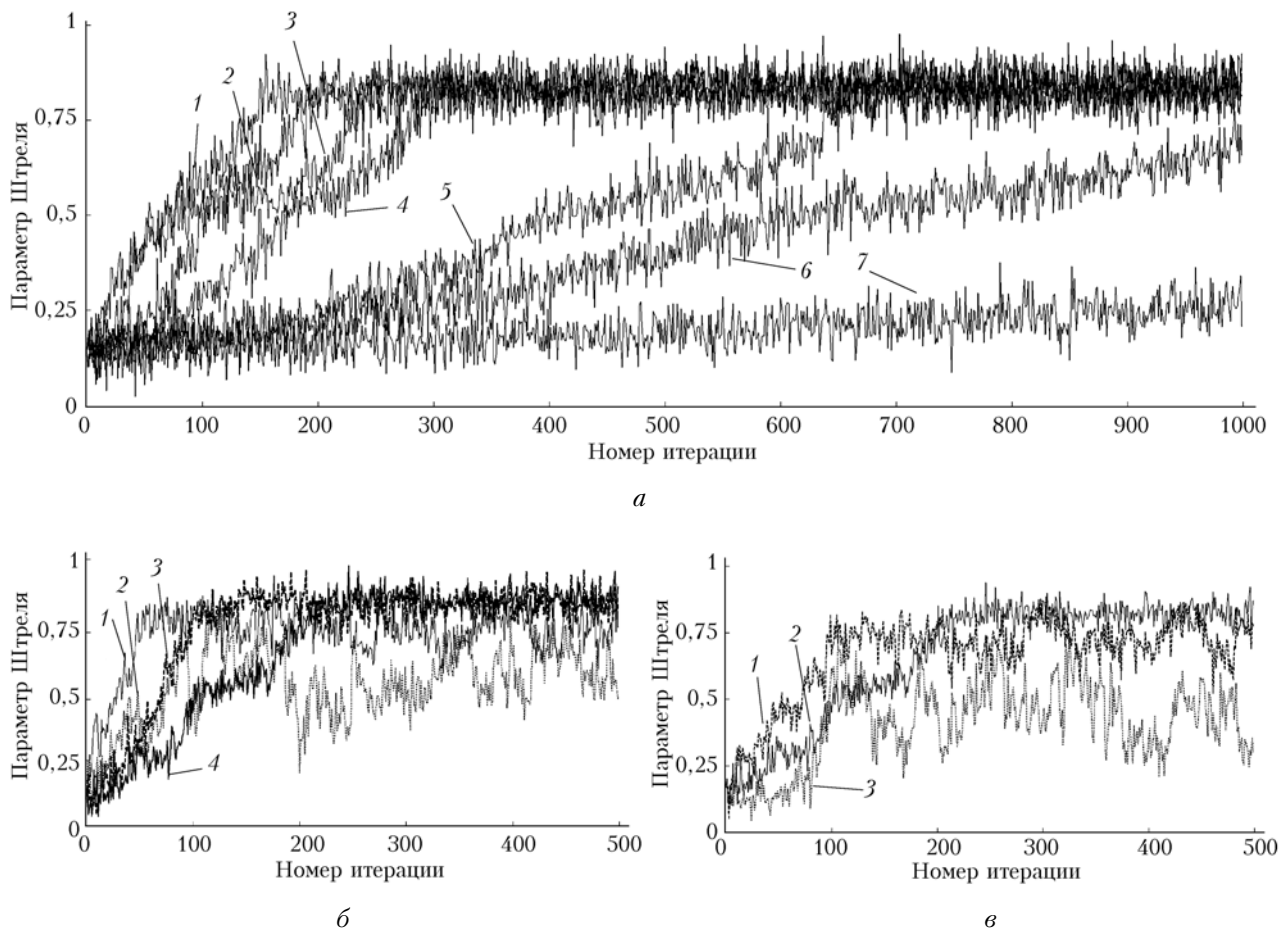


Рис. 2. Эффективность работы САПГС в зависимости: *а* — от коэффициента шумового порога  $\alpha$  (1 — 0,5, 2 — 0,3, 3 — 1, 4 — 0,1, 5 — 0,05, 6 — 0,03, 7 — 0,01 В); *б* — от параметра  $\gamma$  (1 — 20, 2 — 30, 3 — 15, 4 — 10) и *в* — от параметра  $\delta u_0$  (1 — 8, 2 — 3, 3 — 15 В)

### 3. Результаты экспериментов

Эксперименты проводились следующим образом. Перед работой с гибким зеркалом проверялась точность настройки оптической схемы с использованием плоского зеркала вместо гибкого.

На рис. 3, *а* показаны интерферограммы и функции размытия точки, а также распределение интенсивности пучка на видеокамере, воспроизведенное на экране компьютера, при использовании плоского зеркала.

Затем вместо плоского устанавливалось гибкое зеркало, на которое не подавались управляющие напряжения, так что в волновом фронте пучка возникали сильные aberrации (рис. 3, *б*) за счет нефазированности элементов зеркала. После этого включалась программа управления гибким зеркалом по алгоритму (1), по окончании работы которой качество пучка улучшалось. Регистрация мощности излучения в пучке для выработки управляющего сигнала осуществлялась с использованием видеокамеры, ФЭУ и фотодиода. Соответствующие фотографии и изменения числа Штреля, которое рассчитывалось по отношению к мощности излучения, получаемого при использовании плоского зеркала, представлены на рис. 4.

В качестве управляющего сигнала  $P$  при использовании видеокамеры для обеспечения обратной связи регистрировалась мощность на площадке заданного размера в распределении интенсивности

пучка, регистрируемом видеокамерой. В процессе численного моделирования было выявлено [1], а затем подтверждено экспериментально (рис. 5), что алгоритм САПГС работает эффективнее, когда площадка для оценки мощности  $P$  расположена не в максимуме распределения интенсивности в пучке, а в точке энергетического центра тяжести (ЭЦТ) пучка. При исходном расположении площадки в точке ЭЦТ затрачивается меньшее количество итераций на устранение aberrаций вида «наклон».

При использовании фотоприемника (ФЭУ или фотодиода) управляющий сигнал вырабатывался в зависимости от величины мощности  $P$  излучения пучка, прошедшего через диафрагму много меньшего размера, чем сам пучок в плоскости его фокусировки. Измеренные значения мощности передавались с помощью АЦП в компьютер для использования в программе по управлению гибким зеркалом. Диафрагма располагалась в центре фокального пятна.

Из рис. 4 видно, что максимальное значение параметра Штреля, которое удалось достичь с помощью САПГС, равно 0,95 для всех трех способов регистрации мощности излучения в пучке. Число итераций САПГС, необходимых для достижения этого значения, при различных способах регистрации различно. Наиболее высокая скорость сходимости алгоритма наблюдается при использовании фотодиода, у которого точность измерения мощности выше, чем у видеокамеры, и более низкий уровень шумов по сравнению с ФЭУ.

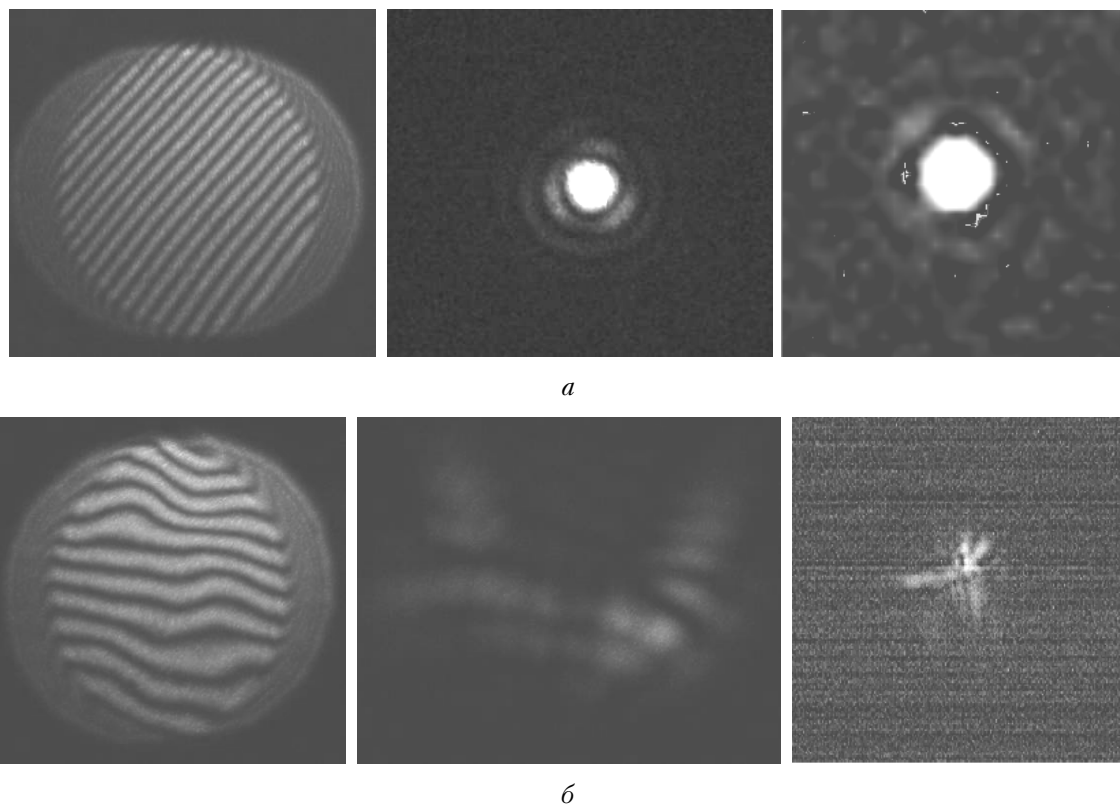


Рис. 3. Интерферограммы (слева) и функции размытия точки (посередине), а также распределение интенсивности пучка на видеокамере, воспроизведенное на экране компьютера (справа), при использовании плоского зеркала (*а*) и в отсутствие напряжений на элементах гибкого зеркала (*б*)

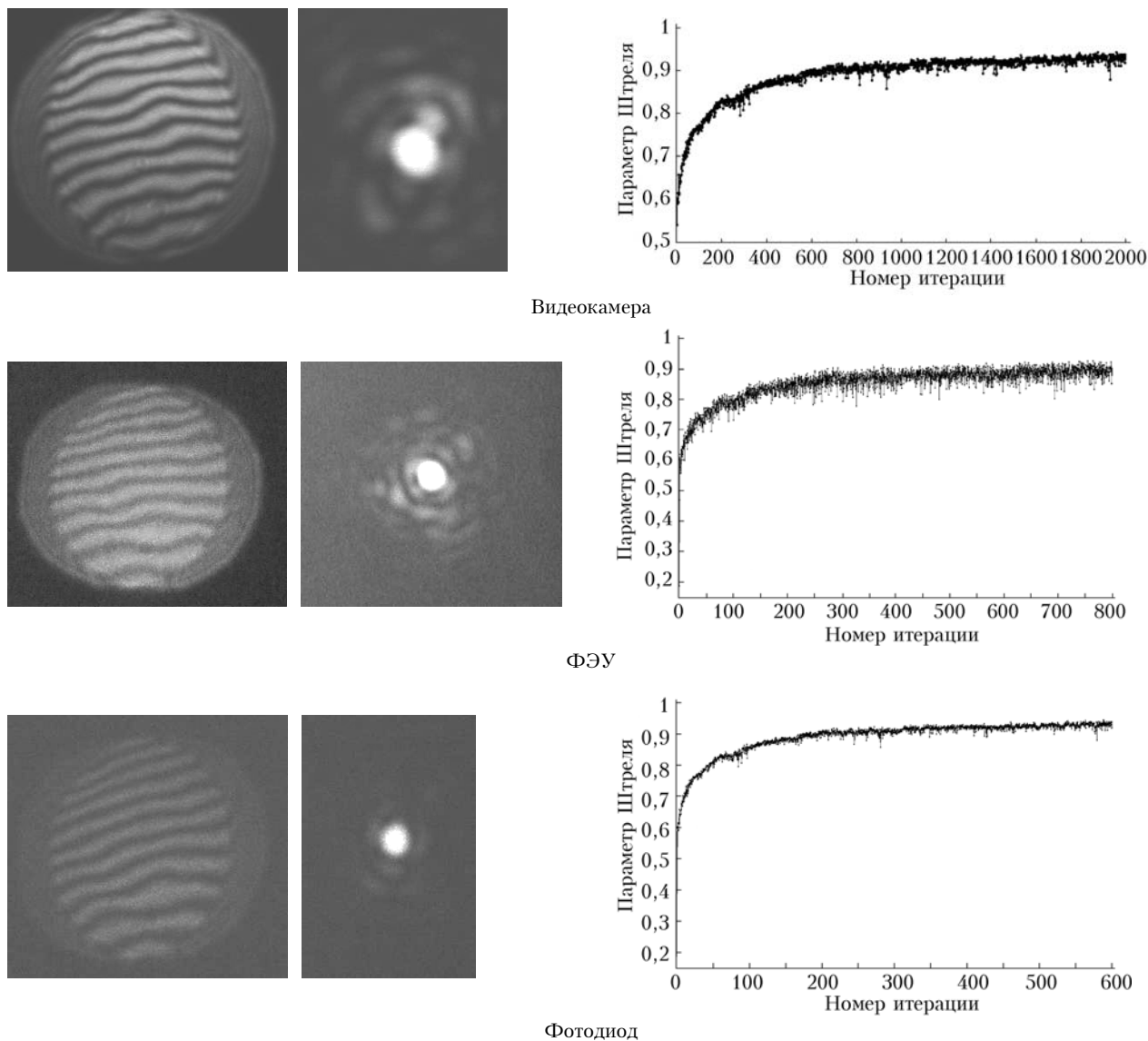


Рис. 4. Интерферограммы и функции размытия точки, а также графики изменения параметра Штреля в процессе работы САПГС для различных устройств регистрации мощности излучения в пучке

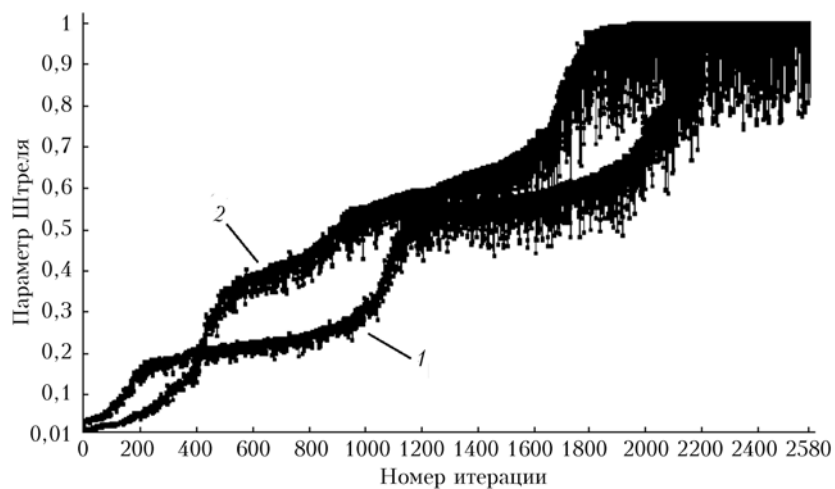


Рис. 5. Параметр Штреля при расположении площадки в видеоизображении пучка для оценки мощности вблизи максимума распределения интенсивности (1) и в точке энергетического центра тяжести пучка (2)

На рис. 6 представлены фотографии и видео-изображения пучка на экране компьютера, иллюстрирующие улучшение качества пучка в результате работы САПГС после внесения в волновой фронт пучка дополнительных искусственных aberrаций с использованием оптического клина и полиэтиленовой пленки.

Работа алгоритма по компенсации искусственных aberrаций начиналась при таких значениях напря-

жений на элементах гибкого зеркала, при которых, насколько позволяла экспериментальная установка, были максимально устранены собственные aberrации гибкого зеркала и в отсутствие искусственных aberrаций оно формировало с некоторой погрешностью плоский фазовый фронт. В результате работы САПГС качество пучка улучшалось по мере компенсации искусственных aberrаций, однако максимально достижимые значения параметра Штреля в этом случае

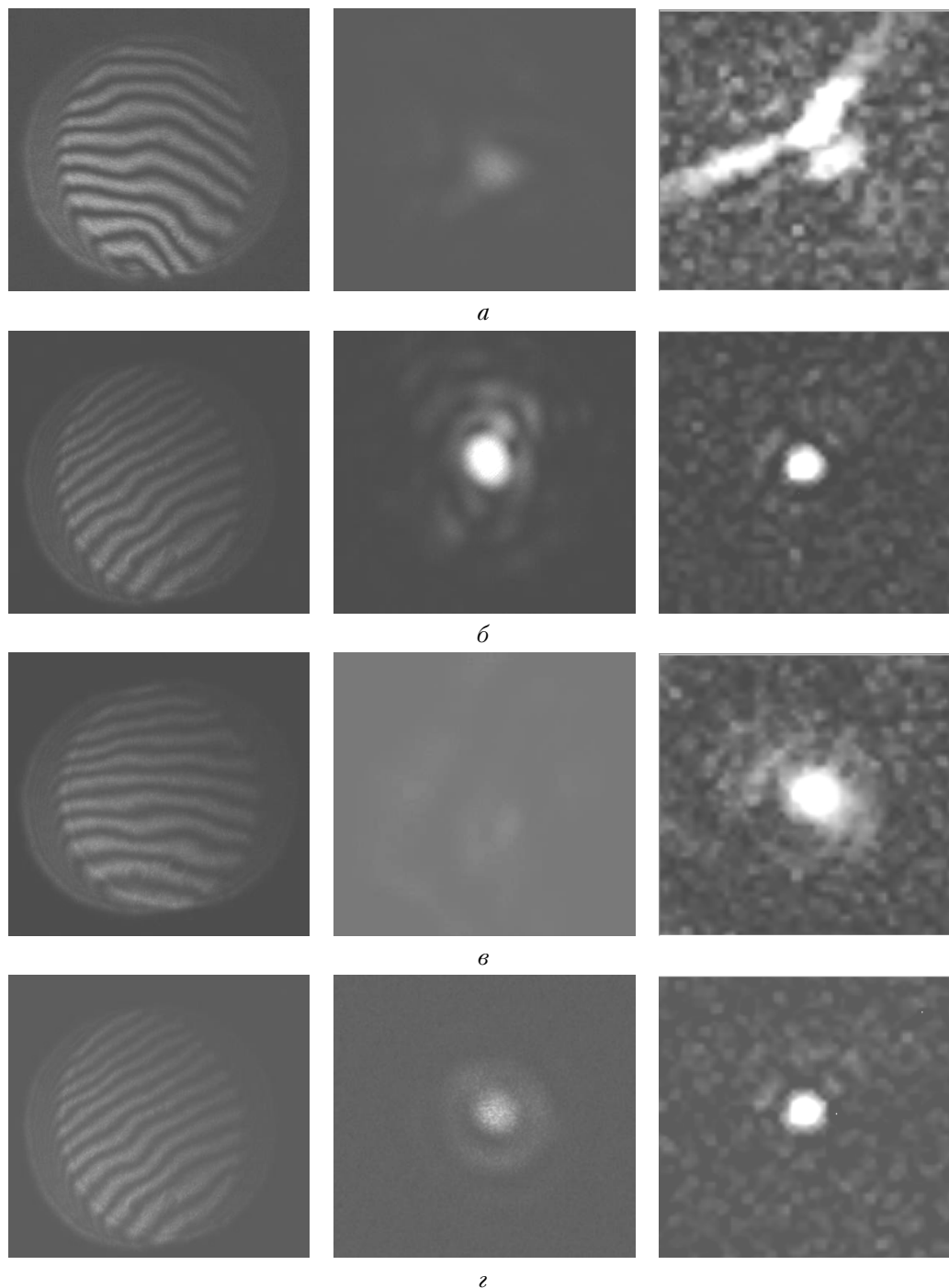


Рис. 6. Интерферограммы (слева) и функции размытия точки (посередине), а также распределение интенсивности пучка на видеокамере, воспроизведенное на экране компьютера (справа): после внесения искажений в волновой фронт пучка при помощи оптического клина (*а*) и полиэтиленовой пленки (*в*), результат работы алгоритма (*б*, *г*)

были меньше, чем при компенсации собственных aberrаций гибкого зеркала, возникающих в отсутствие управляющих напряжений на его элементах.

На рис. 7 дано трехмерное видеоизображение пучка в процессе работы алгоритма. Трехмерное изображение пучка и его сечения в плоскости  $XZ$ , в отличие от двумерного изображения на видеокамере, дают более информативную картину повышения качества пучка в результате работы САПГС: основная доля энергии концентрируется вблизи оси пучка, уровень исходной «шумовой подложки» уменьшается, формируется дифракционная структура с кольцами Эйри.

### Заключение

Результаты лабораторных экспериментов показывают, что САПГС позволяет компенсировать различные типы aberrаций волнового фронта про-

странственно частично когерентных пучков с высокой точностью. Параметр Штреля, рассчитываемый в отношении к достижимому в эксперименте дифракционному пределу, достигал в выполненных экспериментах значений 0,80–0,95. Алгоритм сошелся за 600–2000 итераций. Скорость сходимости САПГС зависит от способа измерения и выработки управляющего сигнала. Из рассмотренных в экспериментах трех типов измерителей средней мощности излучения (видеокамеры, ФЭУ и фотодиода) для выработки управляющего сигнала наибольшую скорость сходимости алгоритма обеспечивало использование фотодиода (600 итераций). Оптимальный подбор параметров алгоритма  $\delta u_0$ ,  $\gamma$  и коэффициента шумового порога  $\alpha$  позволяет достичь значений параметра Штреля, близких к максимальным, за 150–200 итераций.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-05-00332.

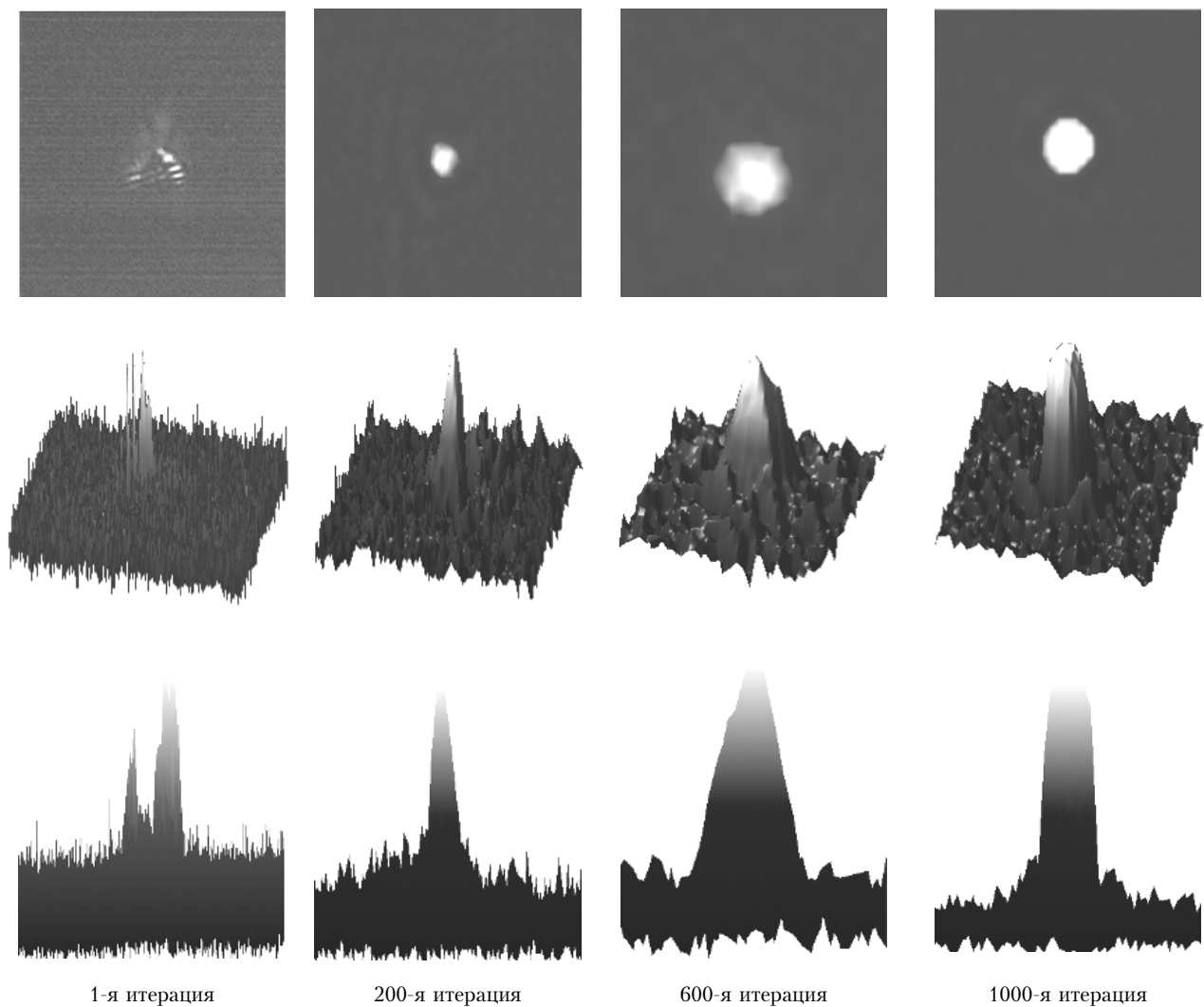


Рис. 7. Графическое отображение распределения интенсивности пучка на видеокамере, воспроизведенное на экране компьютера, трехмерное отображение данного распределения и его сечение в плоскости  $XZ$  в процессе работы САПГС

1. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 1. С. 113–122.
2. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Компенсация абберационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111, № 3. С. 488–496.
3. *Банах В.А.* Моделирование изображения подсвечиваемого лазером рассеивающего слоя в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 303–307.
4. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Определение интенсивности оптической турбулентности по обратному атмосферному рассеянию лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 300–307.
5. *Смалихо И.Н.* Флуктуации мощности эхосигнала импульсного когерентного лидара, вызываемые атмосферной турбулентностью // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 799–804.
6. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Компенсация искажений волнового фронта частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 549–554.
7. *Vorontsov M.A., Sivokon V.P.* Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction // J. Opt. Soc. Amer. 1998. V. 15, N10. P. 2745–2758.
8. URL: <http://www.visionica.ru>
9. URL: <http://www.ni.com>

*V.A. Banakh, A.V. Larichev, I.A. Razenkov, A.N. Shesternin.* **Testing of the stochastic parallel gradient descent algorithm in the laboratory experiment.**

The results of the laboratory experiments on compensation of the laser beam initial wave front aberrations by the stochastic parallel gradient descent algorithm (SPGDA) are presented. It is shown that for wave front aberration, considered in the experiment, optimal choice of the initial and iteration algorithm steps, as well as the optimal coefficient of noise threshold provides for the compensation of the main part of aberrations, using 150–200 iterations of SPGDA.