



ИМИТАТОР ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В. Киселев, Е. Берченко, А. Филатов,
ОАО "КБ "Кунцево", ЗАО "Институт лазерной
и оптической технологии", Москва;
П. Коняев, Л. Лавринова, В. Лукин, Институт
оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
СО РАН, Томск

Турбулентные перемешивания воздушных масс в атмосфере, молекулярное и аэрозольное поглощения в канале распространения мощного оптического излучения искажают передаваемый сигнал. Для их минимизации можно применять различные методы, выбирая оптимальные длины волн или временные режимы излучения. Однако наиболее радикальным инструментом являются адаптивные оптические системы (АОС), которые позволяют в реальном масштабе времени компенсировать эти искажения.

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) ввиду технического несовершенства своих составляющих элементов и случайных неоднородностей по трассе распространения оптических волн практически не обеспечивают реализацию своей предельной эффективности. В то же время ОЭС интенсивно применяют для передачи информации, узконаправленной транспортировки энергии электромагнитного излучения, для формирования изображения в реальных условиях. Все это по-прежнему придает актуальность развитию методов и устройств коррекции, которые включают в себя и адаптивные средства, несущие наиболее радикальный характер борьбы со снижением эффективности ОЭС. Применительно к системам, работающим в случайно-неоднородных средах, таких как земная атмосфера, основными искажающими факторами, наряду с молекулярным поглощением и аэрозольным рассеянием света, являются крупномасштабные случайные неоднородности показателя преломления. Они, в первую очередь, связаны с атмосферной рефракцией и турбулентным перемешиванием воздушных масс в атмосфере, а также могут возникать за счет молекулярного и аэрозольного поглощения в канале распространения мощного оптического излучения.

SIMULATOR OF WAVE FRONT PHASE DISTORTIONS

V. Kiselev, E. Berchenko, A. Filatov,
Kuntsevo Design Engineering Bureau OJSC, Institute of
Laser and Optical Technology CJSC, Moscow;
P. Konyaev, L. Lavrinova, V. Lukin, Institute of
Atmospheric Optics by name V.E. Zuev Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Tomsk

Turbulent mixing of air masses in atmosphere, molecular and aerosol absorptions in the channel of high-power optical radiation propagation distort the transmitted signal. For their minimization different methods can be applied selecting the optimal wavelengths or radiation time modes. However, the most radical instrument includes the adaptive optical system (AOS) which allows the compensation of these distortions on a real-time basis.

Due to the technical imperfection of constituent elements and random inhomogeneities on the optical wave propagation path the modern optoelectronic systems (OES) practically do not provide the implementation of their limiting efficiency. At the same time, OESs are actively used for the information transmission, narrow-beam transportation of electromagnetic radiation energy, image formation in actual practice. All these factors still show the topicality of the development of correction methods and devices which include the adaptive systems carrying the most radical character of control of OES efficiency reduction. In respect to the systems operating in randomly inhomogeneous media such as Earth atmosphere the main distorting factors are molecular absorption and aerosol light scattering as well as large-scale random inhomogeneities of refractive index. First of all, they are connected with the atmospheric refraction and turbulent mixing of air masses in atmosphere and they can occur at the expense of molecular and aerosol absorption in the channel of high-power optical radiation propagation. Different methods can be used for the minimization of these distortions: selection of optimal wavelength, spatial parameters and radiation time modes etc. However, we will emphasize that the most radical means include the designed adaptive optical systems (AOS) which allow the compensation of these distortions on a real time basis.



Минимизировать эти искажения можно различными методами: выбором оптимальной длины волны, пространственных параметров и временных режимов излучения и т.д. Однако, подчеркнем, что наиболее радикальным средством являются создаваемые ныне адаптивные оптические системы (АОС), которые позволяют в реальном масштабе времени компенсировать эти искажения.

АДАПТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Термин "адаптивная оптика" обобщает широкий круг задач и, собственно, оптических устройств, позволяющих снизить негативное влияние атмосферных или иных неоднородностей показателя преломления на эффективность работы оптических систем. Применительно к атмосферным задачам цель разработки адаптивных систем – минимизация искажений пучков и изображений. Принцип работы адаптивных систем заключается в управлении формой волнового фронта принимаемого или передаваемого излучения. Это управление осуществляют с помощью активных элементов, таких как гибкие или составные управляемые зеркала, управляемые фазовые транспаранты и т.д.

Создание современных систем адаптивной оптики является технически трудной задачей, поскольку практически все параметры достигают своего предела. В этой связи численное моделирование как инструмент для подбора оптимальных параметров необходимо как на этапе проектирования системы, так и на этапе непосредственного функционирования. Отдельной группой стоят вопросы проведения отладки систем. Известно, что отладка АОС – это сложная научная и инженерная задача. Ведь она связана не только с неопределенностью параметров самой системы, но и с флуктуациями характеристик среды распространения оптического излучения (атмосфера, активная среда лазеров и т.д.).

На практике разделить эти факторы достаточно сложно. И настройка АОС в условиях натурального эксперимента приводит к большим финансовым и временным затратам. Поэтому актуальной и целесообразной процедурой является разделение задачи отладки АОС на предварительный этап подготовки и настройки системы в лабораторных условиях и последующий этап – работу в условиях натуральных фазовых возмущений. Для подобного разделения необходимо создать специальный инструмент. Во-первых, он должен воспроизводить детерминированные амплитудно-фазовые искажения волнового фронта для настройки АОС

ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS

The term "adaptive optics" summarizes the wide range of tasks and optical devices proper which allow the reduction of negative influence of atmospheric or other inhomogeneities of refractive index on the efficiency of optical systems. In respect to the atmospheric tasks, the purpose for adaptive systems development is to minimize the distortions of beams and images. The principle of adaptive system operation consists in the control of wave front form of received or transmitted radiation. This control is performed with the help of active elements such as flexible mirrors or integrated controlled mirrors, controlled phase transparencies etc.

The design of modern systems of adaptive optics is indeed technically complicated task because practically all parameters reach their limit. In this regard the numerical simulation as the tool for the selection of optimal parameters is required at the stage of system design as well at the stage of functioning. The issues connected with the system adjustment refer to the group of specific issues. It is known that AOS adjustment is complicated scientific and engineering task. It is connected with the indeterminacy of system parameters as well as fluctuations of characteristics of optical radiation propagation medium (atmosphere, active medium of lasers etc.).

In reality it is quite difficult to divide these factors. AOS adjustment under the conditions of full-scale experiment results in large financial and time expenditures. Therefore, the actual and reasonable procedure consists in the division of the task of AOS adjustment in the previous stage of preparation and tuning of the system under laboratory conditions and the following stage – operation under the conditions of full-scale phase perturbations. It is necessary to make the special tool for such division. First of all, it is to reproduce the determined amplitude-phase distortions of wave front for AOS adjustment as the classical system of automatic control. Secondly, it should be capable of stimulation of these distortions by the substitution of various models of atmosphere and active medium of laser. This article is devoted to the practical aspects of such tool design.

SIMULATION OF PHASE DISTORTIONS OF OPTICAL WAVES

During the period from 1991 to 1995 we developed the first four-dimensional dynamic computer code

как классической системы автоматического регулирования. Во-вторых, уметь симулировать эти искажения подстановкой тех или иных моделей атмосферы и активной среды лазера. Настоящее сообщение посвящено практическим аспектам создания такого инструмента.

in the world for the simulation of atmospheric adaptive optical systems [1-3]. The structure of such computer program is given in Fig. 1 in the form of two fragments: for the systems of beam formation and systems of image formation including the astronomic systems.

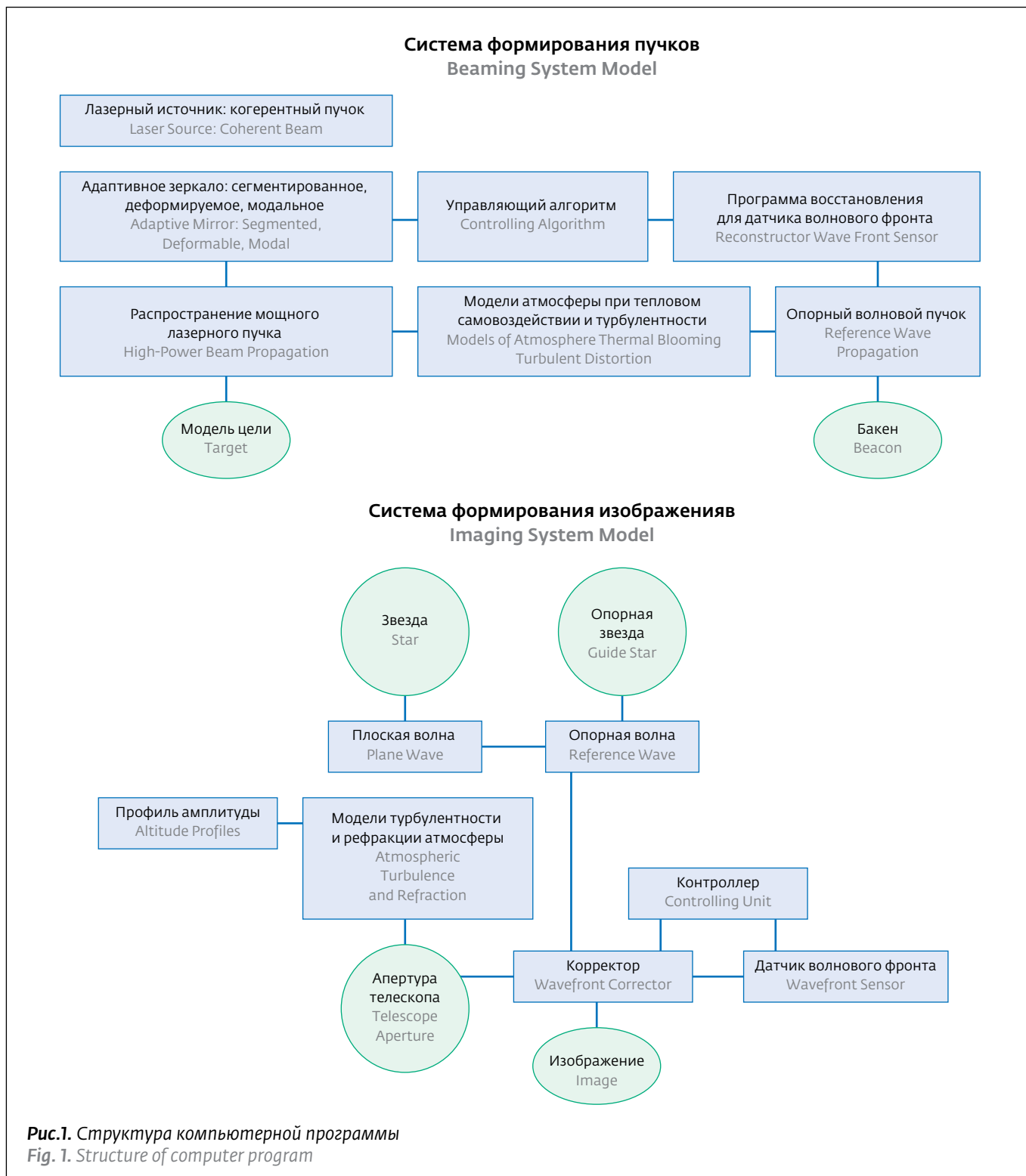


Рис.1. Структура компьютерной программы
Fig. 1. Structure of computer program



МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

В период 1991-1995 гг. нами был развит первый в мире четырехмерный динамический компьютерный код для моделирования атмосферных адаптивных оптических систем [1-3]. На рис.1 представлена структура этой компьютерной программы в виде двух фрагментов - для систем формирования пучков и систем формирования изображений, включая астрономические системы.

В частности, с помощью этой программы были выполнены расчеты в 1994 году по проекту первого российского адаптивного составного 10-метрового телескопа АСТ-10 [4-5]. В 1997 году был выполнен численный анализ параметров крупногабаритных звездных интерферометров с учетом влияния ориентации базы интерферометра, распределения вектора скорости ветра в атмосфере и моделей внешнего масштаба турбулентности [6]. Уже позднее, в начале 2000-х, был выполнен анализ проекта 50-метрового астрономического телескопа с адаптивной оптикой [7].

На основе современных технологий параллельного программирования создано

Particularly, using this program the calculations for the project of the first adaptive compound 10-meter telescope AST-10 were carried out in 1994 [4-5]. In 1997 the numerical analysis of parameters of large-size stellar interferometers was performed taking into account the influence of interferometer base orientation, distribution of the wind speed vector in atmosphere and models of external scale of turbulence [6]. Later, in the early 2000s the analysis of the project of 50-meter astronomic telescope with adaptive optics was performed [7].

On the basis of modern technologies of concurrent programming the software for computer-based study of algorithms and layouts of adaptive optics in atmospheric laser applications was designed. The scalar parabolic equation for monochromatic wave can be solved numerically using the fast Fourier transform method for homogeneous media and splitting method for inhomogeneous media.

The model of adaptive optical system (AOS) includes geometry of radiating aperture and beam propagation path, vertical profiles of atmosphere parameters, concurrent splitting algorithm - Fourier transforms for the solution of diffraction and wave propagation equations, dynamic model of the "frozen" atmospheric turbulence with wide

программное обеспечение для компьютерного исследования алгоритмов и схем адаптивной оптики в атмосферных лазерных приложениях. Скалярное параболическое уравнение для монохроматической волны решается численно путем использования метода быстрого преобразования Фурье (БПФ) для однородных сред и метода расщепления для неоднородных сред.

Модель адаптивной оптической системы (АОС) включает в себя: геометрические характеристики излучающей апертуры и трассы распространения пучка; вертикальные профили параметров атмосферы; параллельный алгоритм расщепления - Фурье-преобразования для решения уравнений дифракции и распространения волн; динамическую модель "замороженной" атмосферной турбулентности с большим диапазоном масштабов; модели датчика волнового фронта и управляемого деформируемого зеркала. Предлагаем внешний облик структурной схемы (рис.2) типичной АОС, которая может вполне подходить и для моделирования адаптивных систем. Безусловно, ключевым элементом является блок управления гибким зеркалом, который может быть использован как при проектировании, так и при обработке.

range of scales, model of wave front sensor and controlled deformable mirror. We suggest the appearance of structural layout (Fig. 2) of typical AOS which can be suitable for the simulation of adaptive systems too. Of course, the key element is the flexible mirror control unit which can be used during design activities as well as adjustment.

CONCURRENT CALCULATIONS

In order to perform the calculations on large initial data matrix the technologies of concurrent calculations are applied:

- **INTEL Math Kernel Library (MKL) v.10.3,**
- **INTEL Integrated Performance Primitives (IPP) v.7.0,**
- **NVIDIA CUDA Toolkit 4.01.**

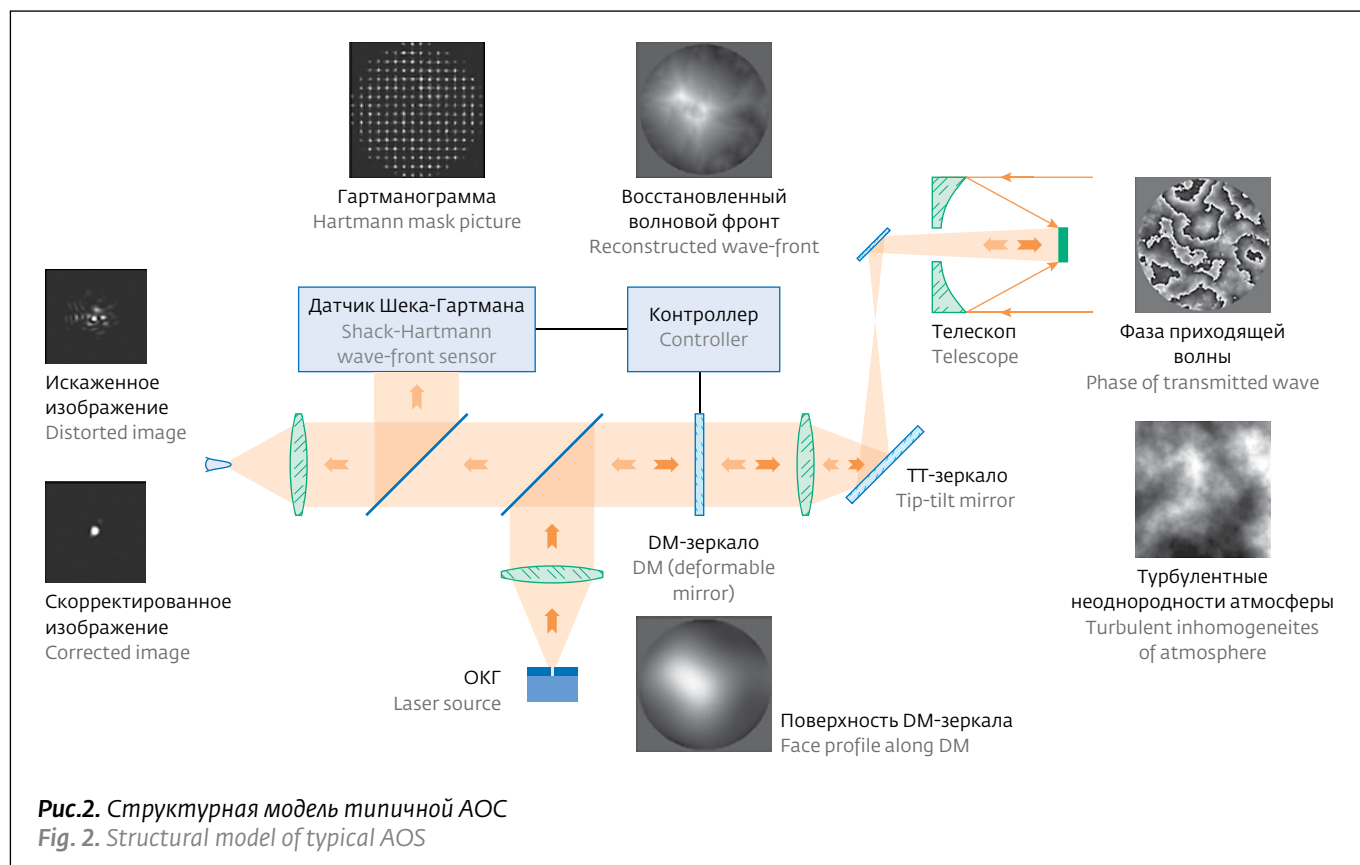
Basic functions of MKL library:

- Vector and matrix algebra,
- Static sensor and random number generator,
- Fast Fourier Transform (1-D, 2-D, 3-D)

Main IPP libraries:

- Signal processing (convolution, correlation),
- Image processing (filtration, digital transform, coding and decoding).

It is known that the turbulent inhomogeneities of atmosphere have wide range of scales (relation



ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Для обеспечения вычислений на большой матрице исходных данных применяются технологии параллельного вычисления:

- **INTEL Math Kernel Library (MKL) v.10.3,**
- **INTEL Integrated Performance Primitives (IPP) v.7.0,**
- **NVIDIA CUDA Toolkit 4.01.**

Базисные функции библиотеки MKL:

- Векторная и матричная алгебра,
- Статистический и случайный датчик случайных чисел,
- Быстрое преобразование Фурье (БПФ) (1-D, 2-D, 3-D).

Основные библиотеки IPP:

- Обработка сигналов (свертка, корреляция),
- Обработка изображения (фильтрация, цифровое преобразование, кодирование и декодирование).

Известно, что турбулентные неоднородности атмосферы обладают очень широким диапазоном масштабов (отношение величин внешнего масштаба к внутреннему оказывается более четырех порядков, т.е., $L_0/l_0 > 10\,000$) [8]. Для их корректного представления (рис.3) при компьютерном моделировании использованы двумерные расчетные сетки очень больших размеров и быстродействующие алгоритмы-генераторы, включая базовый программный генератор некоррелированных псевдослучайных чисел. Этот генератор должен также иметь как можно больший период, так как стандартные библиотечные линейные конгруэнтные датчики имеют период порядка длины машинного слова, т.е. $\sim 2^{31}-1$, чего явно

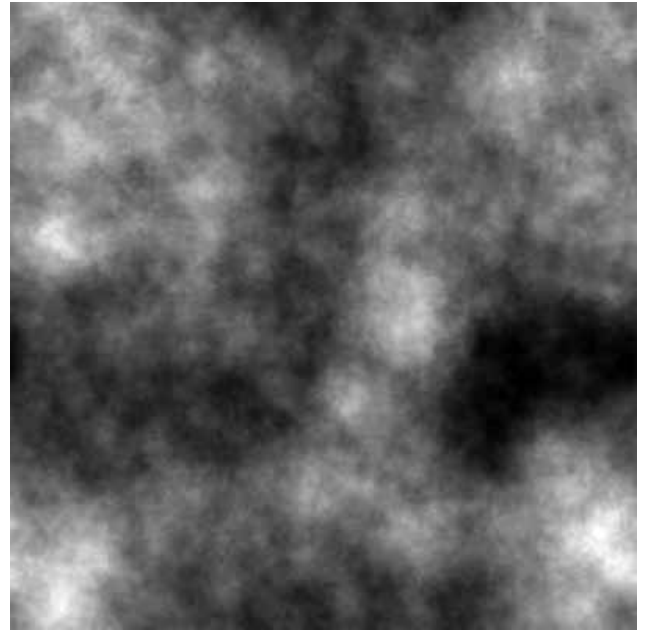


Рис.3. Случайное поле со степенной спектральной плотностью

Fig. 3. Random field with power spectral density, $L_0/l_0 = 1000$

of external scale to internal scale is more than 4 orders or $L_0/l_0 > 10000$) [8]. For their correct presentation (Fig. 3) during computer simulation the two-dimensional computational meshes with large size and fast algorithms-generators were used including the basic program generator of uncorrelated pseudo-random numbers. Also this generator must have the maximum period because the standard library linear congruent sensors have the period of

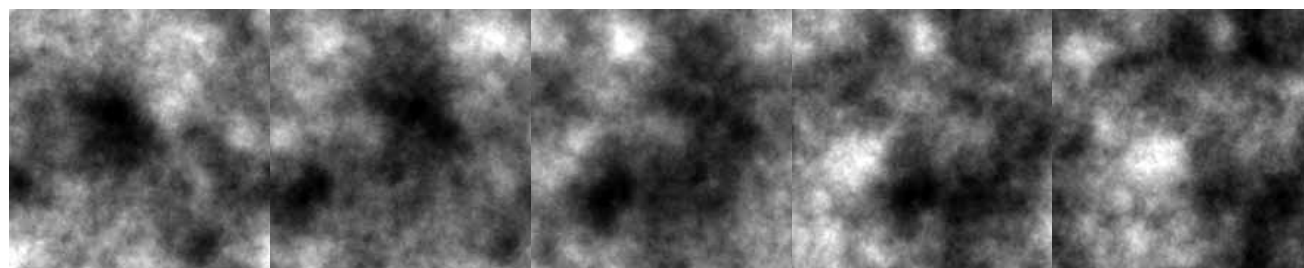


Рис.4. Фрагменты эволюции оптического поля
Fig. 4. Fragments of optical field evolution

недостаточно для матриц большой протяженности. Генераторы из библиотек Intel MKL и NVIDIA CUDA Toolkit обладают требуемыми свойствами – большим периодом, превосходными статистикой и быстродействием. Лучший на сегодняшний день SIMD-ориентированный быстрый Mersenne Twister генератор SFMT19937 (Intel MKL), имеющий период 2^{19937} , был выбран в качестве основного.

В программе-генераторе случайных процессов и полей с заданными корреляционными свойствами использовался спектральный метод с применением параллельных версий двумерных алгоритмов БПФ DFTi и CUFFT. Для описания временных изменений поля показателя преломления, вызванных ветровым движением, был разработан алгоритм моделирования "бесконечной" динамической случайно-неоднородной среды. Он базируется на гипотезе "замороженности" турбулентности, который представляет собой дальнейшее обобщение спектрально-фазового метода (Лукин, Фортес, 1999) для моделирования двумерных случайных полей с известным временным спектром. В его основе модель авторегрессии первого порядка со скользящим средним, описываемой дискретным разностным уравнением:

$$f(nT) = a_1 f((n-1)T) + z(nT) = b_1 r((n-1)T) + r(nT).$$

Для моделирования процесса ветрового сноса турбулентности [9, 10] использован метод спектрального умножения.

Сравнение последовательности кадров показывает возможности передачи динамического характера процессов. Сравнительно малые изменения (рис.4) в целом обуславливают значительные изменения картины во времени. Эта компьютерная программа может быть эффективно применима для компьютерного моделирования изменяющихся во времени случайных процессов и полей. Возможна ее реализация с использованием

the order of computer word length or $\sim 2^{31}-1$ which is obviously insufficient for the matrices with large dimensions. Generators of Intel MKL and NVIDIA CUDA Toolkit libraries have the required properties – long period, excellent statistics and fast operation. SIMD-oriented fast Mersenne Twister generator SFMT19937 (Intel MKL) with the period = 2^{19937} which is the best generator as of today was selected as the main generator.

In the program-generator of random processes and fields with set correlation properties the spectral method was used with the application of concurrent versions of two-dimensional fast Fourier transform (FFT) algorithms DFTi and CUFFT. In order to describe the time variations of the field of refractive index caused by wind-induced motion the algorithm of "infinite" dynamic random inhomogeneous medium simulation was developed. It is based on the hypothesis of "frozen" turbulence which consists in the further generalization of spectral-phase method (Lukin, Fortes, 1999) for the simulation of two-dimensional random fields with the known time spectrum. The model of the first-order autoregression with the moving average is its basis; it can be described through the discrete difference equation:

$$f(nT) = a_1 f((n-1)T) + z(nT) = b_1 r((n-1)T) + r(nT).$$

In order to simulate the process of turbulence wind drift [9, 10] the method of spectral multiplication was used.

Comparison of frame sequence shows the capabilities to transfer the dynamic character of processes. In general, comparatively small variations (Fig. 4) cause the significant changes of the picture in time. This computer program can be effectively applied for the computer simulation of random processes and fields varying in time. Its implementation is possible with the use of concurrent



параллельных алгоритмов. Каждый турбулентный слой (фазовый экран) в этой модели имеет независимую от других поперечную к трассе скорость движения. Известно, что дискретное преобразование Фурье имеет свойство периодичности (фаза на границах прямоугольной сетки непрерывна). Поэтому динамическая модель, созданная с помощью алгоритма БПФ, обладает свойством цикличности и при задании во время движения сдвига, кратного расстоянию между узлами сетки, становится бесконечно-непрерывной.

Саму же АОС рассматриваем как динамическую систему с обратной связью и как систему с постоянным запаздыванием [11-14], когда адаптивное зеркало воспроизводит фазовую поверхность, соответствующую волновому фронту на входной апертуре системы, со значительной задержкой во времени.

В работе [11] впервые была предложена адаптивная коррекция с прогнозированием. На основе различных схем статистического прогнозирования случайных фазовых искажений были выполнены расчеты погрешностей при оценке среднего поля и средней интенсивности поля в АОС с постоянным запаздыванием. Была получена оценка улучшения качества коррекции в системе с прогнозом по сравнению с системой постоянного запаздывания. Было показано, что можно улучшить временные динамические характеристики адаптивной системы и уменьшить влияние остаточных искажений, обусловленных временным запаздыванием в контуре обратной связи. Для этого надо предварительно определить временные корреляционные функции флуктуаций модовых составляющих фазы. Решение проблемы прогнозирования волнового фронта сегодня подтверждено положительными результатами как численных [11-14], так и натурных экспериментов.

Применение в адаптивных системах технологически новых элементов и средств обработки

algorithms. Every turbulent layer (phase screen) in this model has independent speed of movement which is transverse to the path. It is known that the discrete Fourier transform has periodicity property (the phase in boundaries of rectangular mesh is continuous). Therefore, the dynamic model formed with the help of FFT algorithm has the cyclic property and becomes infinitely continuous in case of assigning the drift which is multiple of the distance between mesh points during movement.

We consider AOS as the dynamic system with feedback and system with constant time lag [11-14] when the adaptive mirror reproduces the phase surface which corresponds to the wave front on system entrance aperture with considerable time lag.

In the paper [11] the adaptive correction with forecasting was suggested for the first time. On the basis of various schemes of statistic forecasting of random phase distortions the calculations of errors were carried out for the evaluation of medium field and average field intensity in AOS with constant time lag. The evaluation for enhancement of correction quality was obtained for the system with forecasting in comparison with the system having constant time lag. It was shown that it is possible to improve the time dynamic characteristics of adaptive system and reduce the influence of residual distortions caused by the time lag in feedback loop. For this purpose it is necessary to estimate the time correlation functions of the fluctuations of phase mode components preliminarily. Nowadays, the solution of wave front forecasting problem is proved by the positive results of numerical [11-14] as well as full-scale experiments.

Application of the new technological elements and devices for data processing in adaptive systems - high-speed video cameras, improved models of correctors and high-power computers - gives better operation speed and higher accuracy for the control of laser radiation, however, it does not solve the problems

информации: высокоскоростных видеокамер, более совершенных моделей корректоров и мощных компьютеров – делает управление лазерным излучением более быстродейственным и высокоточным, однако не решает проблемы с постоянным запаздыванием АОС. Решить эту проблему можно единственным способом: уменьшить временную задержку, реализуя адаптивную коррекцию с опережением. То есть надо подавать управляющие воздействия на зеркало, вычисленные относительно волнового фронта, измеряемого в данный момент. В нашем программном продукте предлагаются варианты работы системы с переходом от прогнозирования модовых составляющих [12-14] к опережающей адаптивной коррекции в реальном масштабе времени.

В дополнение к этому следует учитывать, что АО, предназначенная для коррекции турбулентных искажений лазерного излучения систем, как правило, представляет собой динамическую систему с постоянным временем запаздывания. Оно складывается из времени обработки информации, времени вычисления управляющих воздействий на адаптивное зеркало, времени отработки зеркала, включающего инерционность и переходные процессы механической конструкции данного зеркала. Таким образом, корректирующая поверхность адаптивного зеркала формируется из поверхности волнового фронта, присутствующего на входной апертуре адаптивной системы, заведомо с опозданием на величину времени задержки системы. Данную проблему в наших работах мы решили, используя методы опережающей адаптивной коррекции. Однако зачастую эти методы не учитывают погрешность измерения волнового фронта датчиком Шэка-Гартмана и ошибку прогноза волнового фронта. С учетом необходимости прогноза для повышения эффективности работы АО, предлагается использовать фильтр Калмана для синтеза статистически-оптимальных алгоритмов управления деформируемым зеркалом. Отметим, что исследования проблемы прогнозирования фазы на короткие интервалы

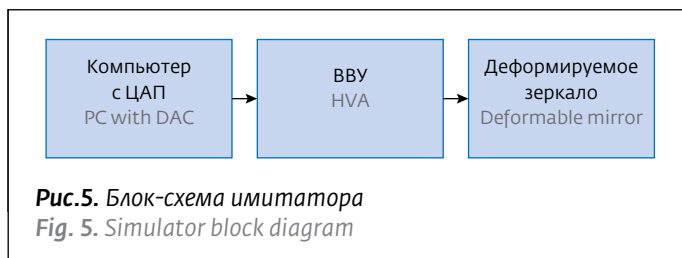


Рис.5. Блок-схема имитатора
Fig. 5. Simulator block diagram

connected with AOS constant time lag. This problem can be solved by the only method: reduce the time lag implementing the adaptive correction with lead. In other words, it is necessary to send the control actions to the mirror calculated relative to the wave front which is being measured at the moment. In our software product the options of system operation with the transition from forecasting of modal components [12-14] to leading adaptive correction on a real time basis are suggested.

Besides, it is necessary to take into account that as a rule the AO intended for the correction of turbulent distortions of system laser radiation represents the dynamic system with constant time lag. It consists of the time for data processing, time for calculation of control actions to adaptive mirror, time for mirror adjustment including the lag and transitional processes of mechanical construction of this mirror. Thus, the correcting surface of adaptive mirror is formed from the surface of wave front existing on the adaptive system entrance aperture which intentionally has the lag equal to the value of system lag time. We solved this problem in our papers using the methods of leading adaptive correction. However, many times these methods do not take into account the error of wave front measurement carried out by Shack-Hartmann sensor and wave front forecasting error. Taking into consideration the necessity of forecasting for the increase of AO performance the Kalman filter is suggested to be used for the synthesis of statistically optimal algorithms of deformable mirror control. It should be noted that the studies connected with the phase forecasting issue for the

Таблица 1. Среднеквадратические отклонения (СКО) волнового фронта

Table 1. Mean square deviations of wave front

Скорость смещения турбулентного экрана, пиксел/кадр Speed of turbulent screen drift, pixel/frame	1	8	16	32
СКО, опережающая коррекция, рад Mean square error, leading correction	6,62	18,4	27,56	29,91
СКО, фильтр Калмана, рад Mean square error, Kalman filter	4,57	12,3	18,03	18,31

Таблица 2. Основные технические характеристики физического имитатора искажений волнового фронта
Table 2. Main technical characteristics of physical simulator of wave front distortions

Параметр Parameter	Значение Value
Световой диаметр, мм Optical diameter, mm	80–180
Диаметр активной зоны, мм Active zone diameter, mm	60–160
Тип деформируемого зеркала Type of deformable mirror	Биморфное Bimorph
Общее число актюаторов Total number of actuators	32–61
Геометрия актюаторов Actuator geometry	Круговая, гексагональная, матричная Circular, hexagonal, matrix
Тип актюаторов Actuator type	ПЗТ PZT
Рабочая длина волны, мкм Operating wave length, μm	1,06–10,6
Материал мембраны Membrane material	Монокристаллический кремний Single-crystalline silicon
Отражательная способность на рабочей длине волны, % Reflection power on operating wave length, %	≥ 99
Локальные деформации (± 250 В), не менее, мкм Local deformations (± 250 V), not less than, μm	$\pm 2,5$
Максимальная частота, кГц Maximum frequency, kHz	1

времени с применением фильтра Калмана отражены в наших более ранних работах [11-12].

Алгоритм на основе применения фильтра Калмана был качественно оценен в задаче коррекции волнового фронта на основе измерений датчиком волнового фронта Шэка-Гартмана. Данные для анализа были получены путем моделирования прохождения излучения через турбулентный экран [13]. В табл.1 приведены

short time intervals using the Kalman filter are reflected in our earlier papers [11-12].

The algorithm based on application of Kalman filter was qualitatively assessed in the task of wave front correction on the basis of measurements carried out by Shack-Hartmann wave front sensor. Analysis data was received by the simulation of radiation transmission through turbulent screen [13]. The mean square deviations of the wave front

среднеквадратические отклонения волнового фронта, рассчитанного с помощью прогнозирующей части фильтра Калмана от волнового фронта, присутствующего на входной апертуре АОС при различных смещениях турбулентного экрана.

Из анализа данных, представленных в табл.1, следует, что применение фильтра Калмана (по сравнению с методом опережающей коррекции) дает существенно лучшие результаты. Проведенные численные эксперименты по оценке качества коррекции волнового фронта с применением фильтра Калмана показали, что этот алгоритм является достаточно эффективным и, за счет своих оценочных свойств, превышает по своей точности алгоритм опережающей коррекции, представленный в работе [11].

ФИЗИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР

Таким образом, нами предложен физический имитатор фазовых искажений оптических волн, представляющий собой активное биморфное зеркало с системой высоковольтных усилителей, управляемое с помощью компьютера. Схема имитатора представлена на рис.5. Фактически имитируемое фазовое распределение оптического поля возникает в отраженном от активного зеркала оптическом излучении. Под действием управляющих сигналов фаза отраженного излучения может изменяться в пространстве и времени.

В состав имитатора входят:

- персональный компьютер (ПК);
- программа **Имитатор искажений волнового фронта (ВФ)**, управляющая N-канальным цифроаналоговым преобразователем (ЦАП);
- N-канальный ЦАП, управляющий высоковольтными усилителями;
- блок высоковольтных усилителей, нагруженных на биморфные актюаторы деформируемого зеркала;
- деформируемое зеркало имитатора, расположенное на пути "эталонного" источника излучения.

Компьютер со специальным программным обеспечением выдает цифровой код на 16-канальный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), входящий в состав компьютера в виде

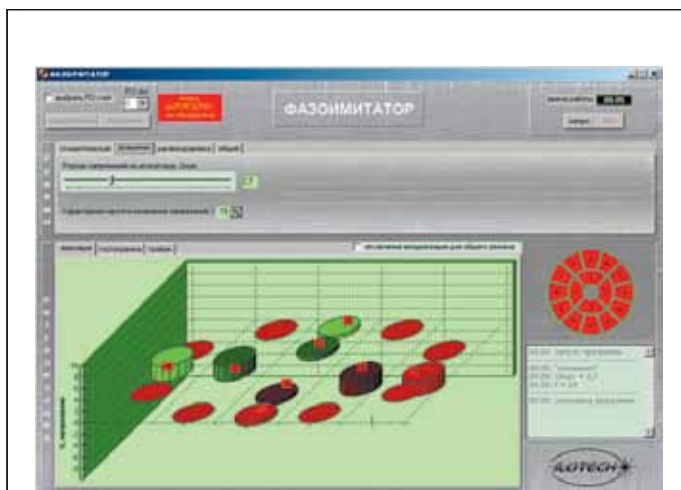


Рис.6. Интерфейс программного обеспечения имитатора

Fig. 6. Interface of simulator software

calculated with the help of forecasting unit of Kalman filter from the wave front existing on AOS entrance aperture with the various drifts of turbulent screen are specified in Table 1.

Analysis of the data shown in Table 1 indicates that the application of Kalman filter (in comparison with the method of leading correction) gives the results of considerably higher quality. Carried out numerical experiments on the evaluation of wave front correction quality using the Kalman filter showed that this algorithm is relatively efficient and at the expense of its evaluation properties surpasses the algorithm of leading correction represented in the paper [11] by its accuracy.

PHYSICAL SIMULATOR

Thus, we suggested the physical simulator of optical wave phase distortions which represents the active bimorph mirror with the system of high-voltage amplifiers controlled by computer. Simulator layout is given in Fig. 5. Practically, the simulated phase distribution of optical field occurs in the optical radiation reflected from active mirror. Under the influence of control signals the phase of reflected radiation can change in space and time.

Таблица 3. Начальная фаза, задающая вращение картины деформации зеркала

Table 3. Initial phase setting the rotation of mirror deformation picture

№ акт. Act. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
φ_i	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	π	$7\pi/6$	$4\pi/3$	$3\pi/2$	$5\pi/3$	$11\pi/6$

интерфейсной платы. С ЦАПа аналоговые сигналы амплитудой до ± 10 В поступают на вход высоковольтного усилителя. Усиленные сигналы подаются на актюаторы деформируемого зеркала (ДЗ). Коэффициент усиления ВВУ ~ 30 , амплитуда сигнала $\sim \pm 250$ В. При подаче напряжения на актюатор отражающая поверхность ДЗ в соответствующем месте деформируется – выпучивается при положительном сигнале и прогибается при отрицательном. Таким образом, волновой фронт отраженного от зеркала светового пучка приобретает фазовые искажения. Программное обеспечение позволяет задавать различные фазовые искажения – как статические, так и динамические – для определения свойств испытуемой адаптивной системы. Основные технические характеристики физического имитатора приведены в табл.2.

Программное обеспечение имитатора имеет интерфейс (главное окно, рис.6), включающий в себя: а) схематическое изображение управляемого деформируемого зеркала с нумерацией управляемых актюаторов;

б) четыре кнопки выбора типа искажений ВФ: стохастический режим, вращение, расфокусировка, общий режим;

в) панель, на которой в графическом виде представлена работа имитатора, а именно поведение напряжений на актюаторах (в виде графиков и анимации);

г) кнопки "Пуск" и "Стоп";

д) панель отображения параметров работы имитатора.

В программу заложено четыре типа искажений волнового фронта.

Стохастический режим. В этом режиме задаются: одинаковый для всех актюаторов размах напряжений U_{\max} (эта величина ограничена $U_{\max} < U^{\max}$); одинаковая для всех актюаторов характерная частота изменения напряжения f (эта



Рис.7. Деформируемые зеркала с диаметрами 80–180 мм и числом элементов управления $N=19-61$

Fig. 7. Deformable mirrors with the diameters of 80–180 mm and number of control elements $N=19-61$

Simulator consists of:

- Personal computer (PC);
- Program **Simulator of WF distortions** controlling the N-channel digital-to-analog converter (D/A converter);
- N-channel D/A converter controlling the high-voltage amplifiers;
- Set of high-voltage amplifiers loaded on bimorph actuators of deformable mirror;
- Deformable mirror of simulator located on the path of "standard" radiation source.

Computer with the special software sends the digital code to 16-channel digital-to-analog converter (D/A converter) which is the part of computer in the form of interface board. Analog signals with the amplitude up to ± 10 V arrive from the D/S converter to the input of high-voltage amplifier. Amplified signals are sent to the actuators of deformable mirror (DM). Amplification coefficient of high-voltage amplifier (HVA) is ~ 30 , signal amplitude is $\sim \pm 250$ V. Upon the voltage supply to actuator the DM reflecting surface becomes deformed in the relevant spot; it bulges upon the positive-going signal and sags upon the negative-going signal. Thus, the wave front of the light

величина ограничена $f < f^{\max}$). В каждый момент времени напряжения на актюаторах вычисляются по формуле

$$U_i = U_{\max} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_i),$$

где φ_i – случайные величины, равномерно распределенные на отрезке $(0, 2\pi)$.

Режим **"Вращение"**. В этом режиме задаются: одинаковый для всех актюаторов размах напряжений U_{\max} (эта величина ограничена $U_{\max} < U^{\max}$); одинаковая для всех актюаторов характеристическая частота вращения f (эта величина ограничена $f < f^{\max}$). В каждый момент времени напряжения на актюаторах вычисляются по формуле

$$U_i = U_{\max} \sin(2\pi f t + \varphi_i),$$

где φ_i – величины, обеспечивающие вращение картины деформации зеркала (табл.3).

Режим **"Расфокусировка"**. В этом режиме для всех актюаторов задаются одинаковые значения напряжения U (эта величина ограничена $U < U^{\max}$).

Общий режим. В этом режиме для каждого i - го актюатора задаются три величины: размах напряжения U_{\max}^i (эта величина ограничена $U_{\max}^i < U^{\max}$); характеристическая частота изменения напряжения f_i (эта величина ограничена $f_i < f^{\max}$); начальная фаза φ_i $(0, 2\pi)$. В каждый момент времени напряжения на актюаторах вычисляются по формуле

$$U_i = U_{\max}^i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i).$$

Как частный случай, можно задать постоянные значения напряжений ($f_i = \varphi_i = 0$). Значения U , U_{\max}^i , f_i , φ_i задаются в соответствующих окошках главного окна программы.

Значения U^{\max} и f^{\max} задаются в ini-файле программы. В данном режиме пользователь может изменять размах напряжений, варьировать характерную частоту напряжений, а также изменять начальные фазы. Все эти параметры задаются независимо для каждого актюатора.

Панель визуализации предназначена для графического представления процессов, происходящих на выходе ЦАП. Возможны три варианта отображения информации:

- **анимация** – информация представлена в виде изменяющихся во времени цилиндрических объектов, имитирующих актюаторы и расположенных в том же порядке, что и на зеркале. Алгоритм изменения высоты графических



Рис.8. Блок многоканального ВВУ
Fig. 8. Unit of multi-channel HVA

beam reflected from mirror obtains the phase distortions. The software allows setting of different phase distortions (static and dynamic distortions) in order to determine the properties of the adaptive system under test. The main technical characteristics of the simulator of phase distortions are specified in Table 2.

The simulator software has interface (see Fig. 6 for main window) including:

- a) diagrammatic view of the controlled deformable mirror with numeration of controlled actuators;
- b) four buttons for the selection of WF distortion type: stochastic mode, rotation, defocusing, general mode;
- c) toolbar where the simulator operation is displayed in graphic form, particularly the behavior of actuator voltages (in the form of diagrams and animation);
- d) buttons "Start" and "Stop";
- e) toolbar where the parameters of simulator operation are displayed.

The program contains four types of wave front distortions.

Stochastic mode. In this mode the following parameters are set: peak-to-peak voltage U_{\max} which is the same for all actuators (this value is limited to $U_{\max} < U^{\max}$); typical frequency of voltage variation f which is the same for all actuators (this value is limited to $f < f^{\max}$). At every point of time

"актюаторов" визуально отражает значения параметров, заданных пользователем;

- **гистограмма** – изменяющиеся напряжения на каждом актюаторе представлены в виде гистограммы;
- **график** – информация представляется для каждого актюатора в отдельности (номер актюатора выбирается в ячейке) в виде графика зависимости напряжения от времени.

Аппаратные средства (активные зеркала биморфного типа) имитатора фазовых искажений представлены на двух фрагментах рис.7. Блоки электронных усилителей показаны на рис.8 и 9. Эти элементы выполнены из лучших мировых компонентов [15, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У разработанного имитатора существует аналог – фазовый имитатор производства Европейской Южной Обсерватории, представляющий собой вращающуюся фазовую пластинку. Однако разработанный нами инструмент обладает рядом существенных преимуществ [17] перед ним:

- позволяет моделировать турбулентности с максимально большим диапазоном масштабов;
- сама компьютерная программа может эффективно применяться для компьютерного моделирования изменяющихся во времени случайных процессов и полей (предусмотрена возможность ее реализации с помощью параллельных алгоритмов);
- инструмент дает возможность генерировать турбулентности различных видов, в том числе моделировать неколмогоровскую турбулентность;

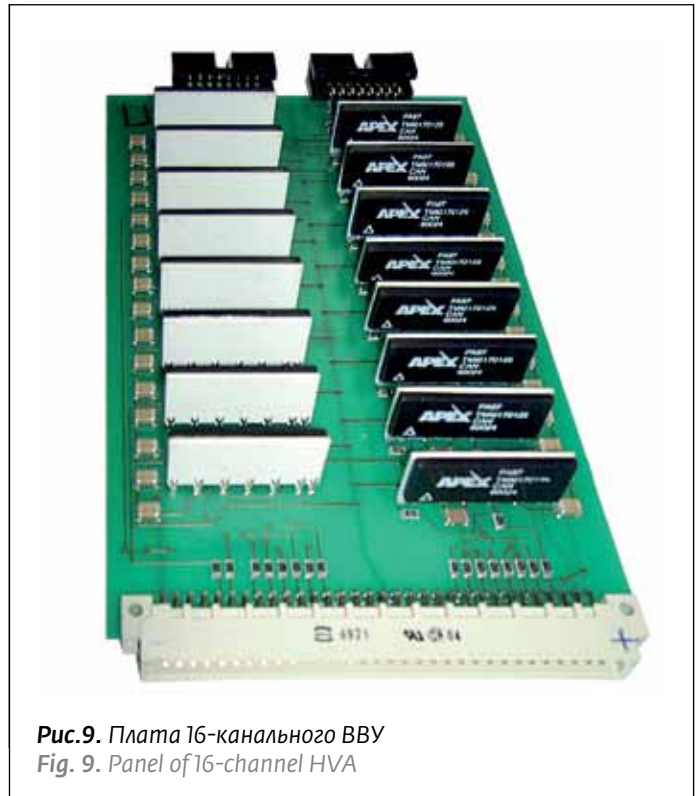


Рис.9. Плата 16-канального ВВУ

Fig. 9. Panel of 16-channel HVA

the actuator voltages are calculated according to the formula:

$$U_i = U_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_i),$$

where φ_i are the random variables which are evenly distributed on the intercept $(0, 2\pi)$.

Rotation mode. In this mode the following parameters are set: peak-to-peak voltage U_{\max} which is the same for all actuators (this value is



- предусмотрено моделирование когерентной турбулентности;
- возможно моделирование неколмогоровской турбулентности с конечными внешним и внутренним масштабами;
- инструмент предлагает несколько способов расчета управляющих воздействий на активное биморфное зеркало;
- в нем заложено программное определение требуемого числа полиномов для представления соответствующих фазовых искажений;
- предусмотрена возможность моделирования временной изменчивости среды, временная эволюция масштабов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lukin V., Fortes B. Modeling of the image observed through a turbulent atmosphere. – Proc. SPIE, 1992, v.1688, p.477-488.
2. Fortes B., Kanev F., Konyaev P., Lukin V. Potential capabilities of adaptive optical systems in the atmosphere. – Journ. Opt. Soc. Am. A., 1994, v.11, No.2, p.903-907.
3. Lukin V., Fortes B. Adaptive beaming and imaging in the turbulent atmosphere. – SPIE Press, PM109, 2002, p. 201.
4. Lukin V.P. Computer modeling of adaptive optics for telescope design. – ESO Workshop Proc., No.54, 1995, p.373-378.
5. Lukin V.P., Fortes B.V. Partial phase correction of turbulent distortions in telescope AST-10 – Applied Optics, 1998, v.37, №21, p.4561-4568.
6. Lukin V.P., Fortes B.V. Ground-based spatial interferometers and atmospheric turbulence. – Pure and Applied Optics, 1996, v.5, № 1, p.1-11.
7. Lukin V., Goncharov A., Owner-Petersen M., Andersen T. The effective outer scale estimation for Euro-50 site. – Proc. SPIE, 2002, v.5026, p.112-118.
8. Konyaev P.A., Tartakovskii E.A., Filimonov G.A. Computer simulation of optical waves propagation, using parallel programming technique. – Atmospheric and Oceanic Optics, 2011, v.24, № 05, p. 359-365 [in Russian].
9. Коняев П.А. Компьютерное моделирование адаптивной оптики для лазерных систем. – Автоматика, 2012, т.48, №2, с.12-19.
10. Коняев П.А. Алгоритм моделирования динамической турбулентности в задачах атмосферной и адаптивной оптики. – Оптика атмосферы и океана, 2012, т.25, №11, с.948-951.
11. Lukin V.P., Zuev V.E. Dynamic characteristics of optical systems. – Applied Optics, 1987, v.27, № 1, p.139-147.

limited to $U_{\max} < U^{\max}$); typical frequency of rotation f which is the same for all actuators (this value is limited to $f < f^{\max}$). At every point of time the actuator voltages are calculated according to the formula:

$$U_i = U_{\max} \sin(2\pi ft + \varphi_i),$$

where φ_i are the variables which ensure the rotation of mirror deformation picture (Table 3).

Defocusing mode. In this mode the voltages U which are the same for all actuators are set (this value is limited to $U < U^{\max}$).

General mode. In this mode 3 variables are set for each i^{th} actuator: peak-to-peak voltage U_{\max}^i (this value is limited to $U_{\max}^i < U^{\max}$); typical frequency of voltage variation f_i (this value is limited to $f_i < f^{\max}$); initial phase φ_i ($0, 2\pi$). At every point of time the actuator voltages are calculated according to the formula:

$$U_i = U_{\max}^i \sin(2\pi t + \varphi_i).$$

The constant values of voltages can be set as special case ($f_i = \varphi_i = 0$). The values $U, U_{\max}, U_{\max}^i, f, f_i$ are entered in the relevant windows of the program main window.

The values U^{\max} and f^{\max} are entered in ini-file of the program. In this mode user can change the peak-to-peak voltage, typical frequency of voltages and initial phases. All these parameters are specified independently for each actuator.

Visualization toolbar is intended for the graphic representation of the processes occurring on the output of D/A converter. There are three variants of data view:

- **Animation:** information is displayed in the form of time-dependent cylindrical objects simulating the actuators which are located in the same order as on mirror. The algorithm of variation of graphic “actuators” height visually reflects the values of parameters set by user.
- **Histogram:** varying voltages of each actuator are displayed in the form of histogram.
- **Diagram:** information is displayed for each actuator separately (actuator number is selected in cell) in the form of the diagram of voltage dependence on time.

Hardware (active mirrors of bimorph type) of phase distortion simulator is shown in two fragments, Fig. 7. The sets of electronic amplifiers are shown in Fig. 8, 9. These elements are designed using the best world components [15, 16].



12. Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Туев М.В. Особенности опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка-Гартмана. – Оптика атмосферы и океана, 2010, т.23, № 11, с.1042–1047.
13. Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н. Способ реализации опережающей адаптивной коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка-Гартмана. – Автометрия, 2012, т.48, № 2, с.92–102.
14. Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Адаптивная коррекция тепловых и турбулентных искажений лазерного излучения деформируемым зеркалом. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2008.
15. Лукин В.П. Оптические информационные технологии. – Автометрия, 48(2), с.3–127 (2012).
16. Loktev M., Soloviev O., Vdovin G. Adaptive optics guide. – The Netherlands: OKO Technologies. Delft., 2008.
17. Bolbasova L.A., Konyaev P.A., Lukin V.P. Computer simulation of adaptive optical systems. – International workshop "Real Time Control for Adaptive Optics", ESO, Germany, 2012.

CONCLUSION

Developed simulator has the analog – phase simulator produced by the European Southern Observatory which represents the rotating retarder. However, in comparison with this analog the tool which was developed by us has a number of significant advantages [17]:

- it allows the simulation of turbulence with the widest range of scales;
- computer program can be effectively applied for the computer simulation of time-dependent random processes and fields (the capability of its implementation is provided with the help of concurrent algorithms);
- the tool makes it possible to generate the turbulences of various types including the simulation of non-Kolmogorov turbulence;
- coherent turbulence simulation is provided;
- simulation of non-Kolmogorov turbulence with finite external and internal scales;
- the tool suggests several methods of calculation of control actions on the active bimorph mirror;
- it has the program estimation of required amount of polynomials in order to display the relevant phase distortions;
- capability of simulation of medium time variation, time evolution of scales.