

Метод фазового синтеза в мультиапертурных оптических системах на основе итерационных алгоритмов обработки изображений

П.А. Семёнов, В.В. Земляков, С.А. Вяткина 

Южный федеральный университет
344006, Россия, г. Ростов-на-Дону,
ул. Большая Садовая, 105/42

Аннотация – Обоснование. Разработка современных оптико-электронных систем предъявляет повышенные требования к качеству и выходной мощности источника излучения. Одним из возможных вариантов выполнения указанных требований является создание систем когерентного сложения нескольких оптических пучков. Основной проблемой при этом стала разработка методов фазового синтеза в мультиканальной оптической системе. **Цель.** В статье рассмотрен метод восстановления фазового поля для мультиапертурной системы когерентного сложения пучков с активной обратной связью, в основе работы которого лежит алгоритм Гершберга – Сэкстона. Данный алгоритм позволяет восстанавливать комплексные амплитуды поля в апертурной и фокальной плоскостях по распределениям интенсивности в данных полях. Проанализировано применение данного алгоритма для мультиканальных систем, и выявлены его особенности, такие как возникновение стагнации и неоднозначность решения. **Методы.** Предложены решения для устранения проблемы сходимости алгоритма к побочным решениям и попадания итерационной процедуры в локальный экстремум с помощью алгоритмов глобальной оптимизации, методов редукции размерности задачи и введении антисимметричной модуляции амплитуды. **Результаты.** В работе продемонстрированы результаты по восстановлению фазового поля для большого числа оптических источников. Для семиапертурной системы осуществлено физическое моделирование по восстановлению фазовой информации, подтверждающее результаты численного моделирования. **Заключение.** Предложенный подход является разумной альтернативой существующим в настоящее время методам и может быть использован в задаче когерентного сложения в мультиканальных оптических системах.

Ключевые слова – алгоритм Гершберга – Сэкстона; восстановление фазового поля; мультиапертурные лазерные системы; физическое моделирование; глобальная оптимизация.

Введение

Разработка новых источников когерентного излучения для конкурентоспособных оптико-электронных приборов и систем локации требует увеличения мощности при минимизации потерь и сохранении качества излучения [1]. Однако такой набор требований трудно достижим, так как повышение пиковой мощности источника излучения приводит к росту потерь и значительному снижению качества лазерного пучка [2]. Решение этих проблем в настоящее время может быть достигнуто путем создания мультиапертурных лазерных систем с когерентным сложением пучков – в этом случае нет необходимости предъявлять повышенные требования к мощности отдельных излучателей [3].

Когерентное сложение пучков представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую решения проблем фазовой, частотной и поляризационной синхронизаций. В данной статье представлены подходы к решению проблемы фазовой синхронизации. Существует два основных метода решения этой задачи: активная и пас-

сивная фазовая синхронизация излучателей. Пассивное согласование фазы использует внутренние физические параметры системы, формируя распределенную оптическую обратную связь, при которой часть суммарного пучка возвращается ко всем источникам излучения лазерного ансамбля. Такие системы имеют более сложный конструктив и часто ограничены общей выходной мощностью излучения [4].

Методы активной фазовой синхронизации в большинстве случаев используют распределенную адаптивную оптическую систему с оптимизацией функции качества. Чаще всего на сегодняшний день встречается система, в основе которой лежит алгоритм стохастической аппроксимации градиента [5]. Также в последнее время стали пользоваться популярностью методы, основанные на нейросетевых технологиях, однако применительно к задаче анализа пространственных характеристик в мультиапертурных системах такие методы пока не обеспечивают гарантированного решения и требуют более глубокой проработки [6].

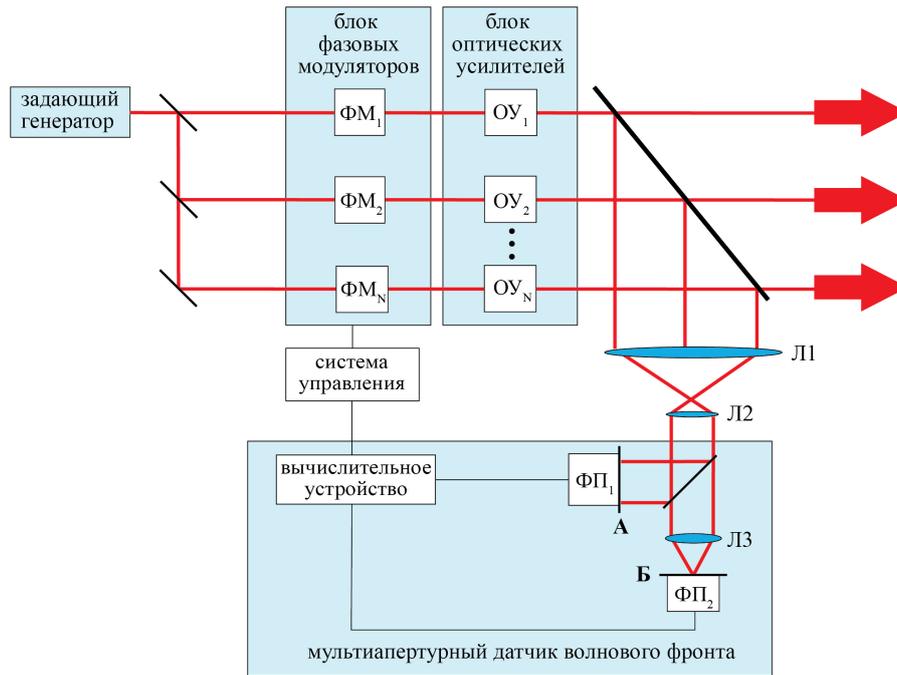


Рис. 1. Структурная схема многоканального лазерного излучателя (ОУ – оптические усилители; ФМ – фазовые модуляторы, ФП – фотоприемник)
 Fig. 1. Diagram of a multichannel laser emitter (OU – optical amplifiers; ФМ – phase modulators, ФП – photodetector)

В настоящей статье рассмотрен метод восстановления фазовой информации без опорного пучка для системы когерентного сложения с активной обратной связью, в основе работы которого лежит алгоритм Гершберга – Сэкстона [7]. Данный алгоритм позволяет восстанавливать комплексные поля на апертуре линзы и в ее фокальной плоскости по распределениям их интенсивностей.

1. Схема активного когерентного сложения пучков

Структурная схема системы активной фазовой синхронизации, использующей алгоритм Гершберга – Сэкстона, представлена на рис. 1.

Оптический сигнал от единого задающего генератора разделяется на N лазерных пучков. После прохождения через блок фазовых модуляторов и одномодовых оптических усилителей излучение разделяется на два пучка. Фаза на выходе каждого из усилителей является случайной вследствие различных оптических путей в отдельных лазерных каналах. Основной пучок попадает на выходную апертуру, а второй фокусируется на фотоприемнике, регистрирующем изображение в апертурной и фокальной плоскостях изображения. Измеренные распределения поступают в вычислительное устройство, где в ходе реализации итерационного алгоритма определяется фазовое распределение, на основе которого формируются управляющие

сигналы на фазовые модуляторы для синхронизации лазерных каналов.

2. Анализ алгоритма Гершберга – Сэкстона

Математическая формулировка задачи Гершберга – Сэкстона заключается в построении комплексной функции $\tilde{E}(\xi)$ по ее модулю $|\tilde{E}(\xi)|$ и модулю ее преобразования Фурье $|E(\mathbf{r})|$, где $E(\mathbf{r})$ – преобразование Фурье функции $\tilde{E}(\xi)$. На первой итерации для выбранного в качестве начального приближения фазы и измеренного в апертурной плоскости распределения модуля $|\tilde{E}(\xi)|$ вычисляется комплексная амплитуда в $E(\mathbf{r})$ фокальной плоскости. Затем модуль этой амплитуды заменяется известным модулем $|E(\mathbf{r})|$. Далее вычисляется обратное распространение пучка, операция замены модуля осуществляется в апертурной плоскости, а полученная таким образом фаза выбирается в качестве следующего приближения.

Таким образом, алгоритм Гершберга – Сэкстона записывается в виде следующей итерационной процедуры

$$\begin{aligned} \tilde{E}_0(\xi) &= \tilde{M}(\xi) \exp[i\varphi_E^{(0)}(\xi)]; \\ \tilde{E}_k(\xi) &= P_2 FT\{P_1 FT^{-1}[\tilde{E}_{k-1}(\xi)]\}, \quad k = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где FT и FT^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно; P_1 и P_2 – операции замены модуля в фокальной и апертурной плоскостях.

Анализ сходимости алгоритма Гершберга – Сэкстона проводился для модели волоконных лазерных источников с гексагональной упаковкой каналов и гауссовым амплитудным распределением в каждом пучке.

Фаза в каждом канале выбиралась случайным образом в пределах $\pm\pi$ рад. Подобное фазовое распределение имитирует многоканальную систему, состоящую из одномодовых лазерных излучателей, фаза в каждом из которых обусловлена различием оптических путей в отдельных каналах. Качество восстановления комплексных функций $\tilde{E}(\xi)$ и $E(\mathbf{r})$ оценивалось по двум характеристикам. По нормированной интегральной ошибке модуля в апертурной плоскости

$$\delta_{\text{mod}k} = \sqrt{\int [|\tilde{E}(\xi)| - \tilde{M}(\xi)]^2 d\xi}, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{mod}1}$ – ошибка модуля на первой итерации. В дополнение к ошибке модуля качество изображения оценивалось также по значениям функции нормированной резкости изображения

$$S = \int I_k^2(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (3)$$

где S_{PH} – функция резкости сфазированной системы (при одинаковых фазах в каждом канале). Анализ для семиканальной лазерной системы был проведен в работе [8]. Показано, что при центрально-симметричном начальном модуле сходимость алгоритма не гарантирована и зависит от начальных условий. Проблему сопутствующих побочных решений можно устранить введением антисимметричной амплитудной модуляции. В этом случае в систему помещается амплитудная маска, коэффициент прохождения которой представляет собой специально подобранную двумерную функцию, не обладающую центральной симметрией. Реализация этого ограничения обеспечивает гарантированную сходимость алгоритма для семилазерной системы.

Однако с увеличением числа фазированных каналов алгоритм начинает впадать в локальные экстремумы или так называемые стагнационные состояния [9]. Физически образование локальных экстремумов связано с поиском энергетического баланса между различными составляющими сигнала ошибки.

3. Методика восстановления фазовой информации

Характерное свойство алгоритма, заключающееся в присутствии состояний стагнации, серьезно

ограничивает возможности его применения. Хотя этот метод достаточно прост и быстр, он сходится к правильному решению только при особых условиях, например, таких как удачное начальное приближение или небольшое количество каналов для фазирования. Хорошим решением обеспечения надежной сходимости алгоритма в таких условиях является использование методов глобальной оптимизации.

Единой методики по решению задач с множеством экстремумов, признанной универсальной, не существует, так как выбор подходящего метода зависит от множества условий и параметров конкретной системы. Для алгоритма Гершберга – Сэкстона важно обеспечить быструю и легкую локальную оптимизацию без необходимости вычисления частных производных. Высокая скорость выполнения итераций обеспечивается простой операцией замены модуля, на которую не влияет размерность задачи. Таким образом, при синтезе метода глобальной оптимизации стоит использовать алгоритм «случайный мултистарт» – многократный поиск из случайных начальных точек с последующим выбором лучшего результата [10]. Этот алгоритм глобального поиска обладает высокой скоростью выполнения приближений и позволяет осуществлять одновременный поиск локальных экстремумов из различных исходных точек.

Однако при большом количестве каналов фазовой синхронизации увеличение количества параллельных процессоров мало влияет на результат. Даже при числе каналов $N = 37$ процент сходимости алгоритма всего 50 %. При дальнейшем увеличении количества каналов наступает момент, когда алгоритм перестает сходиться из любой начальной точки. Поэтому при большом количестве каналов необходимо использовать некоторые методы уменьшения размерности задачи. Исходя из вышеизложенного, для использования данного алгоритма для фазовой синхронизации произвольного числа оптических источников необходимо использовать следующие оптимизационные методы [11]:

- 1) реализация антисимметричной амплитудной модуляции для устранения симметричных решений;
- 2) разделение системы, размерностью более 19 каналов на блоки и синхронизация отдельных блоков;

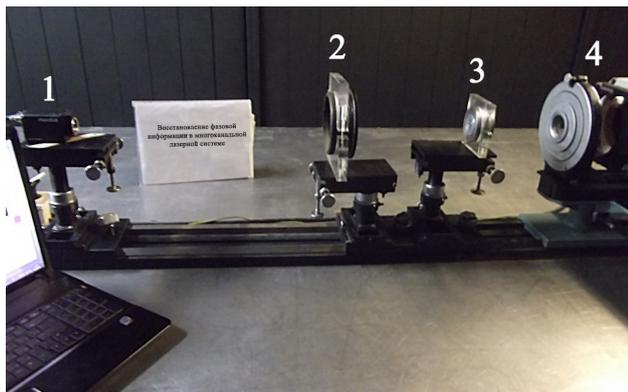


Рис. 2. Лабораторный стенд по восстановлению фазовых характеристик в семиканальной системе: 1 – видеочамера; 2 – светоделитель; 3 – маска; 4 – интерферометр
 Fig. 2. Laboratory stand for the restoration of phase characteristics in a seven-channel system: 1 – camera; 2 – beam splitter; 3 – mask; 4 – interferometer

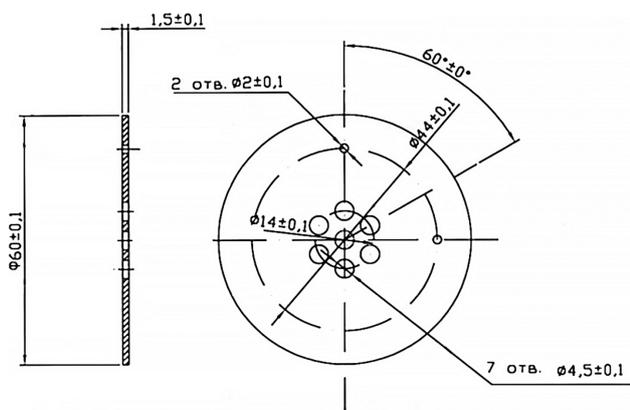


Рис. 3. Конструкция макета семиканальной лазерной системы
 Fig. 3. Design of a seven-channel laser system model

3) применение алгоритмов глобальной оптимизации, в частности алгоритма «случайный мултистарт»;

4) использование дополнительной априорной информации, основанной на свойствах системы, одномодовых лазерных источников, их упаковке и восстановлении только фазовых сдвигов.

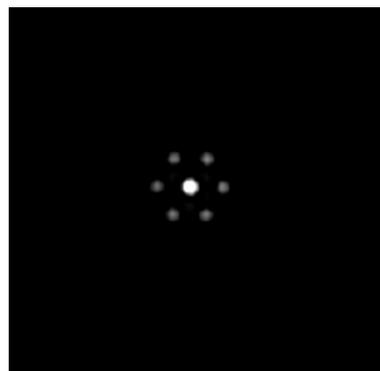
Таким образом, алгоритм Гершберга – Сэкстона входит составной частью в численную процедуру, осуществляющую глобальную оптимизацию, которую можно определить как стратегию восстановления фазовой информации в мультиапертурном датчике волнового фронта.

4. Экспериментальное восстановление фазовой информации

Физический эксперимент по восстановлению фазовой информации проводился на модели семиканальной лазерной системы с равномерным распределением интенсивности и различным фа-



a



b

Рис. 4. Зарегистрированные изображения в фокальной плоскости: а – система со случайным сдвигом в каждом канале; б – сфазированная система
 Fig. 4. Images recorded in the focal plane: a – system with a random shift in each channel; b – phased system

зовым сдвигом φ в каждом канале. Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 2.

В качестве основного источника излучения, был использован интерферометр Zygo, лазерный пучок которого имеет равномерное поляризованное распределение. С выхода интерферометра излучение попадает на специально изготовленный для эксперимента макет семиканальной лазерной системы [12] с различным фазовым сдвигом в каждом канале (рис. 3).

С помощью светоделителя часть излучения отводится для регистрации распределения в плоскости изображения. В качестве измерителя распределения интенсивности применялась система измерения энергетических и пространственных характеристик.

При этом основную роль играет распределение интенсивности в фокальной плоскости, так как распределение в апертурной плоскости не изменялось в зависимости от фазовых сдвигов и в ряде экспериментов заменялось численным моделированием. Основная часть излучения фокусируется линзой на поверхности приемника, где регистри-

руется изображение в фокальной плоскости пучка. Полученные распределения обрабатываются специализированным программным обеспечением, в котором реализовано восстановление фазового распределения с помощью алгоритма Гершберга – Сэкстона. Примеры зарегистрированных изображений для сфазированной и несфазированной систем представлены на рис. 4.

Восстановление происходило как из нулевой, так и из случайных начальных точек. Восстановленное распределение сравнивалось с численным моделированием при минимуме ошибки модуля в фокальной плоскости при 10 000 различных случайных вариациях фазовых сдвигов в каждом канале. Фазовое поле восстанавливалось в среднем за 15–20 последовательных итерационных процедур. Точность измерения волнового фронта составила порядка $\lambda / 100$, при этом основной вклад в

ошибку внесла точность юстировки и установки фазовых пластин.

Заключение

Рассмотренный в настоящей работе подход к построению датчика волнового фронта для фазовой синхронизации одномодовых излучателей в мультиапертурной лазерной системе основан на методах обработки изображений, в частности на алгоритме Гершберга – Сэкстона. Использование разработанной методики восстановления волнового фронта в совокупности с методами глобальной оптимизации позволяет убрать основную проблему используемого алгоритма, связанную с отсутствием гарантированной сходимости в общем случае. Можно сделать вывод, что такой подход будет являться достойной альтернативой существующим в настоящее время методам.

Список литературы

1. Милютин Е.Р. Флуктуации интенсивности сигнала в атмосферных оптических системах передачи информации // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19, № 1. С. 12–15. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7152>
2. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials / J.W. Dawson [et al.] // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7686. P. 768611. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.852393>
3. Веденькин Д.А., Седелников Ю.Е. Свойства и технические приложения антенных решеток, сфокусированных по широкополосному сигналу // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 4. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.88-94>
4. Minden M.L. Passive coherent combining of fiber oscillators // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6453. P. 64530P. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.714437>
5. Vorontsov M.A., Lachinova S.L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis // Journal of the Optical Society of America A. 2008. Vol. 25, no. 8. P. 1949–1973. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.001949>
6. Vorontsov M.A., Filimonov G.A. The self-learning AI controller for adaptive power beaming with fiber-array laser transmitter system // Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 731–760. DOI: <https://doi.org/10.54364/AAIML.2023.1148>
7. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik. 1971. Vol. 35. P. 237–250.
8. Польских С.Д., Семёнов П.А. Многоапертурный датчик волнового фронта для системы когерентного сложения лазерных пучков // Оптический журнал. 2016. Т. 83, № 6. С. 7–13. URL: <https://opticjourn.ru/ru/abstract/2016-83-6-7-13>
9. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a comparison // Applied Optics. 1982. Vol. 21, no. 15. P. 2758–2769. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.21.002758>
10. Жиглявский А.А., Жилинскас А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 248 с.
11. Семёнов П.А., Земляков В.В., Вяткина С.А. Анализ эффективности реконструкции фазового поля в мультиапертурных оптических системах на основе алгоритмов обработки изображений // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 2. С. 268–279. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68623783>
12. Семёнов П.А. Разработка макета семиканальной лазерной системы для физического моделирования мультиапертурного датчика волнового фронта // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10. С. 701–708. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8764>

Информация об авторах

Семёнов Петр Алексеевич, аспирант физического факультета Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия.
Область научных интересов: компьютерное моделирование, обработка изображений, адаптивные оптические системы.
E-mail: piter@bk.ru

Земляков Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной электродинамики и компьютерного моделирования физического факультета Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия.

Область научных интересов: физика радиоволн, численные методы прикладной электродинамики, инфокоммуникационные системы и технологии.

E-mail: vvzemlyakov@sfedu.ru

Вяткина Светлана Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики физического факультета Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия.

Область научных интересов: электродинамика СВЧ, спиновая электроника, устройства на магнитостатических волнах, СВЧ-электроника.

E-mail: svyatkina@sfedu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7858-8607>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2027, vol. 27, no. 3, pp. 40–46

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.3.40-46](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.3.40-46)

UDC 535.41

Original Research

Received 28 June 2024

Accepted 29 July 2024

Published 30 September 2024

Phase synthesis method in multi-aperture optical systems based on iterative image processing algorithms

Petr A. Semenov, Viacheslav V. Zemlyakov, Svetlana A. Vyatkina 

Southern Federal University
105/42, Bolshaya Sadovaya Street,
Rostov-on-Don, 344006, Russia

Abstract – Background. Modern technologies in the field of optics and photonics place high demands on the quality and output power of the radiation source. The fulfillment of these requirements can currently be achieved by creating multi-aperture laser systems with coherent beam addition. The main problem of creating such systems is the development of phase synthesis methods in a multichannel optical system. **Aim.** In this paper, we consider a phase synchronization method without a reference beam for a coherent addition system with active feedback, which is based on the Gerchberg–Saxton algorithm. This algorithm makes it possible to reconstruct complex field amplitudes in the aperture and focal planes from intensity distributions in these fields. The application of this algorithm for multichannel systems is analyzed and its features, such as the occurrence of stagnation and ambiguity of the solution, are revealed. **Methods.** Solutions are proposed to eliminate the problem of convergence of the algorithm to side solutions and getting the iterative procedure into the local extremum using global optimization algorithms, methods of reducing the dimension of the problem and the introduction of antisymmetric amplitude modulation. **Results.** The paper demonstrates the results of phase field reconstruction for a large number of optical sources. For a seven-aperture system, a physical simulation was performed to restore phase information, confirming the results of numerical modeling. **Conclusion.** The proposed approach is a reasonable alternative to currently existing methods and can be used in the problem of coherent addition in multichannel optical systems.

Keywords – Gerchberg–Saxton algorithm; phase field reconstruction; multi-aperture laser systems; physical modeling; global optimization.

✉ piter@bk.ru (Petr A. Semenov)



© Petr A. Semenov, Viacheslav V. Zemlyakov, Svetlana A. Vyatkina, 2024

References

1. E. R. Milyutin, “The irradiance fluctuations signal in atmospheric optical systems transmit of informations,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 12–15, 2016, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7152>. (In Russ.)
2. J. W. Dawson et al., “Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials,” *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7686, p. 768611, doi: <https://doi.org/10.1117/12.852393>.
3. D. A. Veden’kin and Yu. E. Sedel’nikov, “Properties and technical applications of antenna arrays focused on a broadband signal,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 88–94, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.88-94>. (In Russ.)
4. M. L. Minden, “Passive coherent combining of fiber oscillators,” *Proc. of SPIE*, vol. 6453, p. 64530P, 2007, doi: <https://doi.org/10.1117/12.714437>.
5. M. A. Vorontsov and S. L. Lachinova, “Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 25, no. 8, pp. 1949–1973, 2008, doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.001949>.
6. M. A. Vorontsov and G. A. Filimonov, “The self-learning AI controller for adaptive power beaming with fiber-array laser transmitter system,” *Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning*, vol. 3, no. 1, pp. 731–760, 2023, doi: <https://doi.org/10.54364/AAILM.2023.1148>.
7. R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures,” *Optik*, vol. 35, pp. 237–250, 1971.

8. S. D. Pol'skikh and P. A. Semenov, "Multi-aperture wavefront sensor for coherent laser beam combining system," *Opticheskiy zhurnal*, vol. 83, no. 6, pp. 7–13, 2016, url: <https://opticjourn.ru/ru/abstract/2016-83-6-7-13>. (In Russ.)
9. J. R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison," *Applied Optics*, vol. 21, no. 15, pp. 2758–2769, 1982, doi: <https://doi.org/10.1364/AO.21.002758>.
10. A. A. Zhiglyavskiy and A. G. Zhilinskas, *Methods for Searching for a Global Extremum*. Moscow: Nauka, 1991. (In Russ.)
11. P. A. Semenov, V. V. Zemlyakov, and S. A. Vyatkina, "Analysis of the efficiency of phase field reconstruction in multi-aperture optical systems based on image processing algorithms," *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii*, vol. 7, no. 2, pp. 268–279, 2024, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68623783>. (In Russ.)
12. P. A. Semenov, "Development of a seven-channel laser system layout for physical modeling of a multi-aperture wavefront sensor," *Inzhenernyy vestnik Dona*, no. 10, pp. 701–708, 2023, url: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8764>. (In Russ.)

Information about the Authors

Petr A. Semenov, postgraduate student of Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.
Research interests: computer modeling, image processing, adaptive optical systems.
E-mail: piter@bk.ru

Viacheslav V. Zemlyakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, professor of the Department of Applied Electrodynamics and Computer Modeling, Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.
Research interests: physics of radio waves, numerical methods of applied electrodynamics, infocommunication systems and technologies.
E-mail: vvezemlyakov@sfnedu.ru

Svetlana A. Vyatkina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Radiophysics, Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.
Research interests: microwave electrodynamics, spin electronics, magnetostatic wave devices, microwave electronics.
E-mail: svyatkina@sfnedu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7858-8607>