

## ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНОГО ТРАНСПАРАНТА

Н.А. Макенова<sup>1,2</sup>, Р. Ф. Джураев<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск<sup>2</sup>Томский политехнический университет

E-mail: mna.05@mail.ru

*Рассмотрено обращение волнового фронта с использованием амплитудного транспаранта (модулятора). В результате численных исследований показано, что, несмотря на значительное поглощение модулятором энергии, достигается практически полная компенсация турбулентных искажений.*

**Ключевые слова:**

*Алгоритм ОВФ, адаптивная система, амплитудный модулятор, турбулентные искажения.*

**Key words:**

*Algorithm of wavefront, adaptive system, amplitude modulator, turbulent distortions.*

Существует несколько методов задания амплитудно-фазового распределения пучка: так, в работе Вохник О.М. [1] экспериментально исследована эффективность адаптивной системы с ОВФ-зеркалом на основе вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). Показано, что в такой системе возможно выполнить коррекцию внутрирезонаторных искажений. Эффективность конвертации гауссовского пучка ВРМБ-зеркалом составила приблизительно 60 %, т. е. в системе наблюдались достаточно большие потери мощности. Еще одна возможность управления амплитудой и фазой излучения — это использование амплитудного модулятора совместно с упругим зеркалом. Модулятор [2] (пластина с регулируемой прозрачностью) задает требуемое распределение амплитуды, тогда как зеркалом выполняется фазовое сопряжение. Недостатки такой системы очевидны: при поглощении мощности пластинкой снижается эффективность передачи энергии системой [3]. В настоящее время методы амплитудно-фазового управления интенсивно развиваются в России и за рубежом [3–7]. Наибольшее количество публикаций по данной теме сделано Джеффри Барчерсом [4]. Им рассматривалась возможность увеличения быстродействия итерационного алгоритма [5]. Был предложен алгоритм, позволяющий сформировать распределение амплитуды и фазы за одну итерацию [6]. Несмотря на большое количество публикаций по данной проблеме, невозможно сказать, что в настоящее время разработан эффективный универсальный быстродействующий алгоритм амплитудно-фазовой коррекции. Поэтому попытка построения такого алгоритма обсуждается в настоящей статье.

Для выполнения обращения волнового фронта необходимо задать требуемое распределение амплитуды и фазы излучения на основе информации о параметрах опорного сигнала. Одна из возможностей задания требуемого распределения амплитуды — это модулятор, т. е. пластинка с регулируемой прозрачностью. Для проведения анализа решалась модельная задача. Турбулентность задавалась одним экраном, который был расположен в середине трассы. Интенсивность искажений изменялась. Фаза излучения формировалась идеальной системой, ампли-

туда — с использованием модулятора. При решении задачи варьировался начальный радиус пучка.

Компенсация искажений в рассматриваемой системе иллюстрируется данными, помещенными в табл. 1. Результаты приведены для двух начальных радиусов:  $a_0=1$  и  $a_0=5$ .

Интенсивность турбулентных искажений достаточно велика:  $r_0=0,005$ . Так как экран расположен в середине трассы, задача является симметричной относительно плоскости его размещения. Поэтому представить искажения «прямого» пучка возможно по распределению амплитуды опорного сигнала. Это распределение помещено во втором столбце табл. 1. В третьем столбце показан пучок, падающий на модулятор, и в столбце № 4 — результат формирования амплитуды модулятором. Можем видеть, что пластинка с регулируемой прозрачностью поглощает достаточно большое количество энергии излучения. Для пучка с малым радиусом ( $a_0=1$ ) поглощение составляет около 90 %, при увеличении радиуса ( $a_0=5$ ) эта величина возрастает до 97 %. В первом случае в плоскости наблюдения амплитуда, сформированная в результате ОВФ, остается искаженной (табл. 1, ст. 5), во втором случае достигается практически полная компенсация турбулентных возмущений. Таким образом, качество ОВФ зависит от размеров области, на которой оно выполняется. Этот результат отмечался также в работе Лукина В.П. [8].

Для характеристики светового поля в плоскости наблюдения в адаптивной системе использовались следующие критерии:

- критерий фокусировки:

$$J(t) = \frac{1}{P} \iint \rho(x, y) I(x, y, t) dx dy,$$

где  $J(t)$  пропорционален мощности излучения, падающей в пределы апертуры с диаметром, равным диаметру элементарного пучка. Так как критерий нормирован на полную мощность  $P$ , генерируемую лазерным источником, он является безразмерной величиной. В формуле также имеется

$$\rho(x, y) = \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{S^2}\right] - \text{функция пропуска-}$$

**Таблица 1.** Иллюстрация работы модулятора ( $z=0,5, r_0=0,005$ , экран расположен в середине трассы)

Начальный радиус пучка	Распределение амплитуды опорного пучка, $z = 0$	Распределение амплитуды пучка до модулятора, $z = 0$	Распределение амплитуды пучка, прошедшего модулятор, $z = 0$	Распределение амплитуды пучка в плоскости наблюдения, $z = 0,5$
1	2	3	4	5
1		 Полная энергия 100 %	 Полная энергия 10 %	 $J = 0,021, \varepsilon = 0,640$
5		 Полная энергия 100 %	 Полная энергия 3 %	 $J=0,015, \varepsilon=0,038$

ния апертуры приемника и распределение интенсивности излучения в плоскости регистрации  $I(x,y,t)$ ;  $x$  и  $y$  – текущие координаты;  $S$  – площадь апертуры приемника;

- *квадратичная ошибка:*

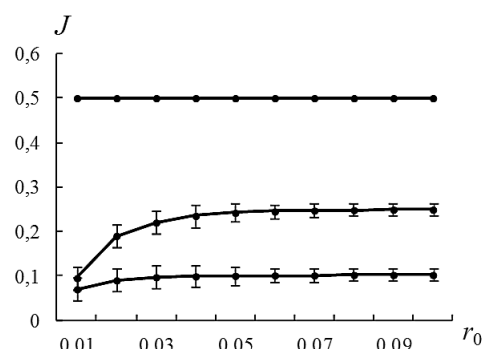
$$\varepsilon = \left\{ \frac{\iint (A(x,y) - A_G(x,y))^2 dx dy}{\iint (A_G(x,y))^2 dx dy} \right\},$$

где  $A_G(x,y)$  – гауссовский профиль;  $A(x,y)$  – распределение амплитуды пучка.

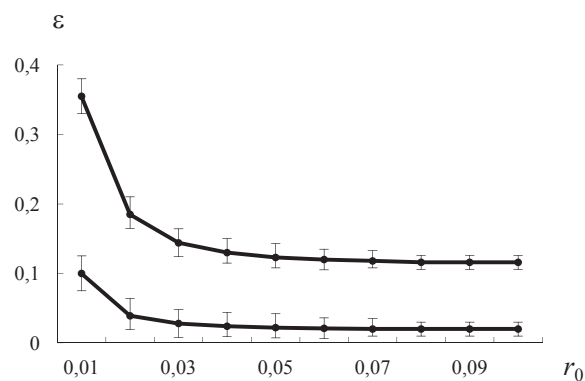
Количественные данные, характеризующие использование модулятора в адаптивной системе, помещены на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлены результирующие значения критерия фокусировки  $J$ , на рис. 2 – отклонение формы пучка, полученного в результате коррекции, от гауссовского профиля.

Графики показывают, что из-за поглощения энергии модулятор обеспечивает результирующие значения критерия фокусировки существенно более низкие по сравнению с идеальной системой (сравнение кривых 1 и 2 с кривой 3, рис. 1). При увеличении начального радиуса пучка потери возрастают, критерий фокусировки уменьшается (из сравнения кривых 1 и 2).

В то же время в рассматриваемой системе с высокой точностью можно сформировать в плоскости наблюдения пучок с гауссовским распределением амплитуды. Этот вывод основан на данных, помещенных на рис. 2, где показана зависимость квадратичной ошибки  $\varepsilon$ . Можем видеть, что квадратичная ошибка  $\varepsilon$  уменьшается с увеличением радиуса пучка, но одновременно возрастает поглощаемая модулятором энергия.



**Рис. 1.** Эффективность коррекции турбулентных искажений с использованием модулятора. Длина трассы  $z = 0,5$ , экран расположен в середине трассы. Кривая 1 – ОВФ с использованием модулятора, выполняемое на одном радиусе пучка; 2 – ОВФ на двух радиусах пучка; 3 – ОВФ в идеальной системе



**Рис. 2.** Относительное отклонение амплитуды пучка, сформированного при адаптивном управлении от гауссовского профиля. Кривая 1 – ОВФ с использованием модулятора, выполняемое на одном радиусе пучка; 2 – ОВФ на двух радиусах пучка

### Выводы

В целом по приведенным результатам заключаем, что амплитудный модулятор целесообразно использовать при формировании пучка с заданным

распределением интенсивности, в то же время его применение не обеспечивает эффективной передачи энергии лазерного излучения в турбулентной среде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вохник О.М., Снажакин В.А., Терентьева И.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик твердотельного лазера с ВРМБ-зеркалом // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 3. – С. 393–396.
2. Love G.D., Fender J.S., Restaino. Adaptive wave front shaping with liquid crystals // Opt. Photon. News. – 1995. – V. 6. – P. 16–21.
3. Roggemann M.C., Lee D.J. A two deformable mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere // Applied Optics. – 1998. – V. 37. – № 21. – P. 4577–4585.
4. Barchers J.D. Evaluation of the impact of finite-resolution effects on scintillation compensation using two deformable mirrors // J. Opt. Soc. Am. A. – 2001. – V. 18. – № 12. – P. 3098–3109.
5. Barchers J.D. Application of the parallel generalized projection algorithm to the control of two finite-resolution deformable mirrors

- for scintillation compensation // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V. 19. – № 1. – P. 54–63.
6. Barchers J.D. Closed-loop stable control of two deformable mirrors for compensation of amplitude and phase fluctuations // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V. 19. – № 5. – P. 926–945.
7. Barchers J.D., Ellerbroek B.L. Improved compensation of turbulence-induced amplitude and phase distortions by means of multiple near-field phase adjustments // J. Opt. Soc. Am. A. – 2001. – V. 18. – № 2. – P. 399–411.
8. Лукин В.П. Сравнительные характеристики некоторых алгоритмов коррекции // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8. – № 10. – С. 2145–2153.

Поступила 05.07.2012 г.

УДК 534.2

## АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Д.С. Провоторов, А.В. Соловьев, Ю.А. Виноградов

Томский государственный университет  
E-mail: provotorov@sibmail.com

*Определены амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых сигналов, генерируемых наземными взрывами. С помощью метода триангуляции определены направления прихода акустических сигналов, которые указывают на источник, где проводились взрывные работы. Использование вейвлет-преобразования с базовой функцией Морле позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов.*

### Ключевые слова:

*Инфразвук, источники инфразвуковых сигналов, наземные взрывы.*

### Key words:

*Infrasound, sources of infrasonic signals, land explosions.*

В настоящее время исследованию низкочастотных акустических сигналов уделяется большее внимание. Их изучение актуально в связи с необходимостью обоснования надежных сигнальных признаков техногенных воздействий (запуски ракет, несанкционированные взрывы и ядерные испытания). Кроме того, результаты этих работ могут быть использованы для идентификации отливков от цунами и предвестников землетрясений.

На сегодняшний день Организация по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний ведет мониторинг сейсмических и инфразвуковых сигналов от ядерных взрывов, но наряду с этим во многих районах земного шара выполняется большой объем горных, дорожных работ, сопровождающихся подземными и наземными

взрывами, а также взрывы от деятельности военных, которые не отслеживаются всемирной сетью. Очень важно иметь представление об инфразвуковых сигналах, порождающихся наземными взрывами, с целью обнаружения источников этих сигналов.

Целью данной работы является исследование сигналов от наземных взрывов для выявления сигнальных признаков низкочастотных акустических сигналов, разработка методики выделения и определения пеленга на источник.

Исследованию инфразвуковых сигналов от наземных взрывов посвящено большое количество работ. В работе [1] представлены результаты анализа исследования распространения инфразвуковых волн от взрывов. В работе [2] на примере повто-