

УДК 535.2.621.373.826

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Я. И. Малашко, В. М. Хабибулин

*ОАО «Главное системное конструкторское бюро
Концерна ПВО «Алмаз-Антей» им. акад. А. А. Расплетина»
125190, Москва, Ленинградский просп., 80
E-mail: malashko@yandex.ru
xbm.slava@gmail.com*

Рассмотрен принцип управления адаптивной оптической системой, использующий для этого интенсивность обратно рассеянного лазерного излучения в атмосфере. Методами математического моделирования исследованы особенности формирования сигнала управления в моностатической схеме и, как следствие, дальность фокусировки пучка при замкнутом контуре. Показано, что такой способ формирования не ведёт к коллимации даже пучка с дифракционным качеством.

Ключевые слова: адаптивная оптика, лазерное излучение, обратное рассеяние в атмосфере.

Введение. В последнее время интенсивно исследуются варианты построения адаптивных систем, в которых может быть обеспечена одновременно и корректировка фазовых искажений волнового фронта (ВФ), и коллимация, т. е. устранение сферической компоненты в ВФ. Использование обратного рассеяния атмосферы привлекательно тем, что оно присутствует при любых угловых направлениях лазерного излучения [1–5].

В данной работе исследована структура сигнала управления адаптивной системой, при этом в алгоритм управления заложен поиск максимума интенсивности в фокусе приёмника обратно рассеянного излучения в атмосфере. Численное моделирование сигнала управления проведено в волновом и геометрическом приближениях.

Формирование в приёмнике интенсивности лазерного излучения, обратно рассеянного в атмосфере. Рассмотрим случай, когда ось приёмника совмещена с осью лазерного излучения. Апертура приёмника находится в зоне геометрической тени кольцевого лазерного пучка. Такая схема называется совмещённой или моностатической (рис. 1). Установим, из какой области пучка на трассе распространения происходит рассеяние излучения, попадающего строго на ось приёмника в его фокус. Эти лучи могут прийти только из объёма цилиндра, диаметр которого равен диаметру приёмной апертуры приёмника, к тому же они должны быть параллельны оптической оси приёмника.

Лучи типа 2, попадающие в поле зрения приёмника, формируют внеосевое распределение интенсивности на приёмнике.

Лучи типов 1 и 3 не представляют интереса с точки зрения коллимации пучка (фокусирования его в дальнюю зону).

В задаче коллимации представляют интерес лучи типа 4 (из дальней зоны), где сформировалось угловое распределение пучка. Однако интенсивность этого излучения значительно меньше интенсивности из ближней зоны. Таким образом, на приёмнике образуются

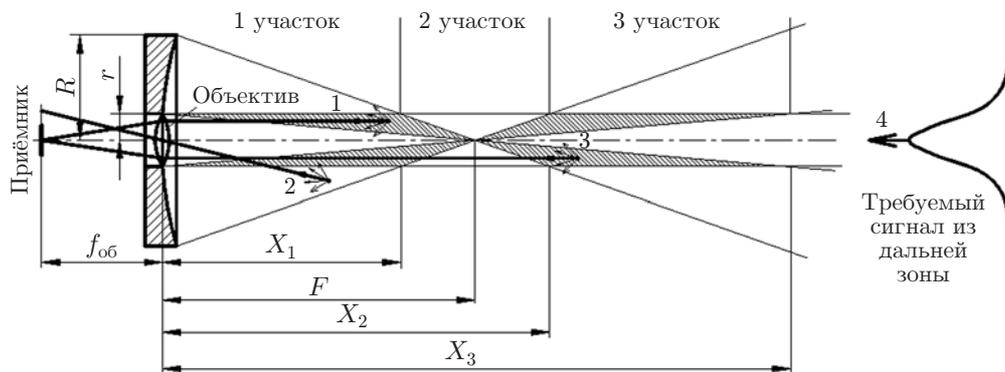


Рис. 1. Формирование интенсивности излучения обратного аэрозольного рассеяния (вторичное зеркало передающего телескопа не показано)

шум из лучей, приходящих из ближней зоны, и именно он является сигналом, который будет управлять работой адаптивной системы.

Существует, по меньшей мере, два способа получения излучения из дальней зоны и отсеечения при этом излучения из ближней зоны.

В моностатической схеме можно перейти на импульсно-периодическое излучение (в том числе имитационное) и стробировать его по дальности [2].

В бистатической схеме, где оси лазерного пучка и приёмника разнесены на некоторое расстояние, очевидна возможность использования пространственной (угловой) селекции ближней и дальней зон.

На рис. 1 показана моностатическая схема приёмопередатчика, где заштрихованная часть пучка даёт рассеянное излучение, попадающее на центральный осевой пиксель фотоприёмника.

Задача исследования заключается в поиске такой дальности фокусировки, при которой рассеянное назад излучение формирует максимальную величину интенсивности на оси приёмника.

Изменение поля зрения приёмника приведёт только к изменению внеосевого распределения интенсивности на нём. Увеличивая поле зрения, мы повышаем суммарную величину мощности шума на приёмнике.

Методика расчётов. Для анализа была взята осевая (точнее, приосевая) интенсивность, которая позволяет наиболее явно выразить сущность адаптивной моностатической системы описываемого типа. Для определённости выбрали излучающую апертуру $2R = 1$ м. Диаметры слепой зоны и приёмной апертуры $2r = 0,2$ м, фокусное расстояние объектива приёмника $f_{об} = 1$ м. Мощность излучения $P = 1$ Вт. Коэффициент обратного рассеяния (изотропного в 4π срад) $\beta = 10^{-5}$ км $^{-1}$, что характерно для рассеяния излучения на аэрозолях вулканического происхождения в верхнем слое атмосферы (10–20 км), называемом слоем Юнге. (Величина β не определяет основных выводов данной работы и приведена для конкретности расчётов.)

Распределение интенсивности на кольцевой излучающей апертуре $2R = 1$ м принято равномерным.

Для упрощения расчётов рассеянного излучения на трассе длиной 20 км использовалось усреднение распределения падающей мощности в слоях толщиной 400 м.

Распределение мощности излучения на трассе распространения для плоских пучков рассчитывалось в волновом приближении для длин волн 1,06, 5,0 и 10,6 мкм.

Для пучков с угловой расходимостью, значительно превышающей дифракционную, при расчёте распределения мощности применялся многолучевой геометрический подход (до 10^6 лучей на апертуре). При этом угловое распределение интенсивности излучения выбрано гауссовым.

Расчёт интенсивности обратно рассеянного излучения на приёмнике во всех случаях проводился в многолучевом приближении.

Результаты численного моделирования. На рис. 2 представлены результаты расчётов интенсивности излучения обратного рассеяния на оси приёмника для трёх длин волн.

Для удобства сравнительного анализа значения интенсивности дифракционно-ограниченных пучков нормированы. Максимум интенсивности для излучения с длиной волны $\lambda = 5$ мкм составляет величину $3,5P \cdot 10^{-6}$ Вт/м².

Наблюдается практически одинаковый ход кривых, незначительное различие связано, по-видимому, с посылкой дискретизацией расчётов по дальности.

Из рис. 2 следуют три важных результата.

1. В пределах рассматриваемого диапазона длин волн при выбранных соотношениях приёмной и передающей апертур вклад интенсивности дифрагирующего излучения в зону геометрической тени не существен для осевой интенсивности на приёмнике.

2. Максимум интенсивности на оси приёмника для дифракционно-ограниченных пучков достигается в диапазоне фокусировок 5–10 км, т. е. имеется зона неопределённости фокусировки.

3. Пучки не коллимируются при заданном алгоритме максимизации осевой интенсивности на приёмнике.

Фактически графики на рис. 2 являются целевыми функциями для адаптивной системы, максимизирующей интенсивность посредством управления сферической фокусировкой в моностатической схеме.

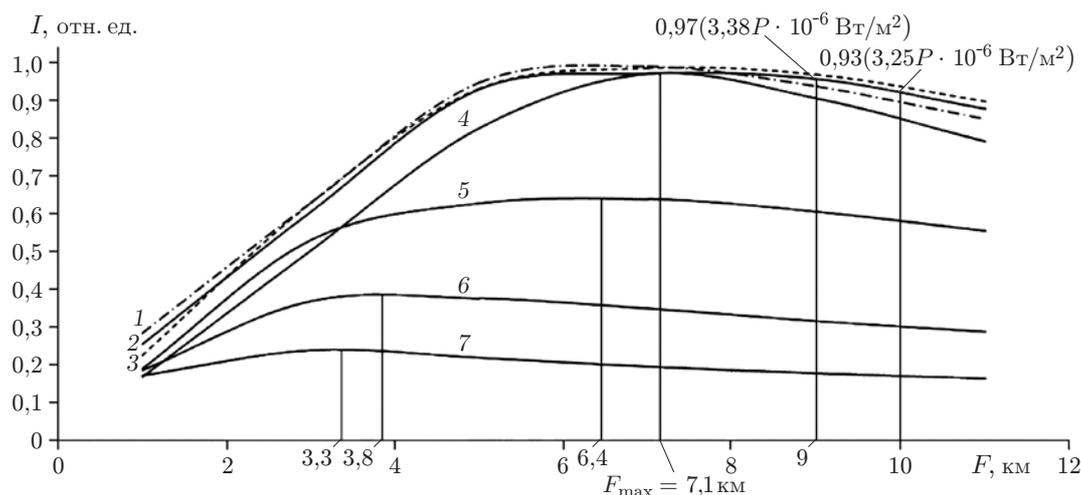


Рис. 2. Зависимость максимальной осевой интенсивности излучения обратного аэрозольного рассеяния на фотоприёмнике от дальности фокусировки F для дифракционно-ограниченных пучков (кривая 1 — $\lambda = 10,6$ мкм, 2 — 5 мкм, 3 — 1,06 мкм) и пучков с угловой расходимостью (кривая 4 — $\varphi = 0$, 5 — 30 мкрад, 6 — 60 мкрад, 7 — 100 мкрад). Вертикальными линиями отмечены дальности фокусировки при максимальной интенсивности пучков с угловой расходимостью. Значения интенсивностей пучков с угловой расходимостью нормированы к максимальной интенсивности для $\lambda = 5$ мкм (кривая 2)

Проведём оценку сигнала управления адаптивной оптической системой, работающей по методу апертурного зондирования для компенсации сферической составляющей ВФ. Для этого представим интенсивность как функцию дальности фокусировки в области $F_0 \pm \Delta F$ в виде разложения

$$\begin{aligned} I(F, P) &= I(F_0, P) \pm [I(F_0 + \Delta F, P) - I(F_0, P)] \frac{\Delta F_3}{\Delta F} = \\ &= I(F_0, P) \left[1 \pm \frac{\Delta I}{\Delta F I(F_0, P)} \Delta F_3 \right] = I(F_0, P) [1 \pm S \Delta F_3], \end{aligned}$$

где ΔF_3 — изменение дальности фокусировки при изменении сферической составляющей волнового фронта.

Выберем для расчёта $F_0 = 9$ км, $\Delta F = 1$ км. Из кривой 2 следует, что численные значения интенсивности для $\lambda = 5$ мкм будут $I(F_0 = 9 \text{ км}, P) = 3,38P \cdot 10^{-6}$ Вт/м², $I(F_0 + \Delta F = 10 \text{ км}, P) = 3,25P \cdot 10^{-6}$ Вт/м² и, значит, в окрестности дальности фокусировки $F_0 = 9$ км

$$I(F_0 + \Delta F_3, P) = I(F_0, P)(1 - S \Delta F_3) = I(F_0, P) \left(1 - 0,13 \left[\frac{1}{\text{км}} \right] \Delta F_3 \right). \quad (1)$$

Здесь коэффициент $S = 0,13 \text{ км}^{-1}$ является крутизной управления по фокусировке в области $F_0 = 9$ км и по размерности совпадает с оптической силой. Второй член в выражении (1) $I_0(F_0, P)S \Delta F_3$ и есть сигнал управления адаптивной оптической системой как результат отклика на сферическую модуляцию ВФ. Выберем в качестве изменения фокусировки величину $\Delta F_3 = 0,65$ км. Это соответствует изменению стрелки прогиба сферической составляющей ВФ на передающей апертуре диаметром 1 м на величину 1 мкм, что меньше длины волны. Тогда второй член в выражении (1) более чем на порядок меньше первого.

На рис. 2 приведены также нормированные графики для пучков, имеющих угловую расходимость 30–100 мкрад (кривые 5–7). Здесь дифракция излучения в зону геометрической тени существенна и дистанция фокусировки, соответствующая максимальной осевой интенсивности на приёмнике, составляет до 10 км.

Аналитические выражения для геометрического пучка. Для строго геометрического пучка (дифракция отсутствует, длина волны $\lambda = 0$) можно получить аналитическую зависимость приосевой плотности мощности на центральном пикселе матричного фотоприёмника от дальности фокусировки (см. рис. 1).

Обратим внимание, что на центральный пиксель попадает рассеянное на трассе излучение, ограниченное цилиндром с диаметром, равным диаметру приёмной апертуры.

Часть общей мощности P , попадающей в цилиндр, обозначим W . В зависимости от текущего участка трассы и координаты x мощность W можно представить в виде

$$W(x) = -k \frac{x(x - 2F)}{(x - F)^2} P, \quad 0 \leq x \leq X_1 = F(1 - \varepsilon),$$

— первый участок трассы,

$$W(x) = P, \quad X_1 \leq x \leq X_2 = F(1 + \varepsilon),$$

— второй участок трассы,

$$W(x) = -k \frac{x(x - 2F)}{(x - F)^2} P, \quad X_2 \leq x \leq X_3 = 2F,$$

— третий участок трассы. Здесь $k = \varepsilon^2/(1 - \varepsilon^2)$; $\varepsilon = r/R$; x — текущая дальность; F — дальность фокусировки.

Интенсивность рассеянного излучения на центральном пикселе имеет вид

$$I_{\text{pix}} = \frac{\beta k}{\pi a^2} \sum_1^N \left(\int_L \Omega(x) W(x) dx \right), \quad (2)$$

где N — количество участков интегрирования; L — длина участка трассы; $\Omega(x)$ — телесный угол распространения рассеянной мощности, попадающей на центральный пиксель приёмника; a — радиус пикселя.

Тогда $\Omega(x) = (\pi a^2)/f_{\text{об}}^2$ для $x < X_{\text{исх}}$ и $\Omega(x) = (\pi a^2)/x^2$ для $x \geq X_{\text{исх}}$, $X_{\text{исх}} = (r f_{\text{об}})/a \approx 6667$ м — исходная дальность, на которой видимый телесный угол объектива $\Omega = (\pi r^2)/x^2$ равен телесному углу пикселя $\Omega = (\pi a^2)/f_{\text{об}}^2$.

Число интервалов интегрирования в формуле (2) $N = 3$ при $F \leq \frac{1}{2} X_{\text{исх}}$ и $N = 4$ при $F > \frac{1}{2} X_{\text{исх}}$, так как один из участков трассы, в пределах которого находится $X_{\text{исх}}$, разбивается на два интервала.

Результаты расчётов строго геометрического пучка (без дифракции), соответствующие асимптотическому случаю и нормированные к дифракционно-ограниченному пучку с длиной волны $\lambda = 5$ мкм, представлены на рис. 2 (кривая 4).

Слабо выраженный максимум интенсивности на приёмнике при данных оптико-геометрических параметрах моностатической схемы достигается при дальности фокусировки F_{max} , определяемой выражением

$$F_{\text{max}} = f_{\text{об}} \frac{r}{a} \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon)^2} \ln \left(\frac{1 + \varepsilon}{2\varepsilon} \right)^2} \approx 7,1 \text{ км.}$$

Обсуждение результатов расчётов. Дальность фокусировки, при которой достигается максимальная интенсивность рассеянного излучения в моностатической схеме, зависит в основном от оптико-геометрических параметров совмещённой схемы.

Адаптивная оптическая система в моностатическом исполнении «приёмник—передатчик», использующая в качестве сигнала управления излучение, обратно рассеянное атмосферой, принципиально не коллимирует лазерный пучок. На это впервые было обращено внимание в [6].

Интенсивность такого излучения является в основном шумом и не может считаться сигналом управления коллимирующей адаптивной системой. Его правильная интерпретация раскрывается формулой (1), где используются крутизна целевой функции и амплитуда зондирования. При небольших амплитудах зондирования сигнал управления на 1–2 порядка меньше шума даже при сферическом зондировании волнового фронта на всей апертуре. При локальном зондировании одной апертурой интенсивность будет меньше в число раз, равное числу зон управления.

Полезный сигнал управления в моностатической схеме, позволяющий отсечь шум, может быть получен, например, в импульсно-периодическом режиме работы лазера, где указанный эффект достигается стробированием дальности фокусировки или дальней зоны [2, 6]. Естественно, что мощность рассеянного излучения из дальней зоны будет значительно меньше.

Неопределённость фокусировки пучка, отмеченная на рис. 2 (кривые 1–3), приводит к неопределённости угла схождения лазерного пучка, значительно превышающей дифракционный предел. Неопределённость фокусировки означает невозможность одновременно правильно корректировать волновой фронт при описанном алгоритме управления.

На этот процесс влияют также другие факторы, например характер внеосевого углового распределения излучаемой мощности пучка. Существенное значение имеет характер распределения аэрозоля вдоль трассы распространения излучения.

В любом случае описываемую адаптивную систему необходимо будет дополнять автономными средствами поиска фактического положения фокусировки [5–10].

Заключение. В данной работе показано, что адаптивная оптическая система в моностатическом исполнении схемы «приёмник—передатчик», использующая в качестве сигнала управления обратное рассеяние лазерного излучения в атмосфере, не коллимирует пучок при непрерывном излучении. Более того, даже для дифракционно-ограниченного пучка фокусировка в замкнутом контуре осуществляется на дальность, значительно меньшую, чем дальняя зона. При этом существует широкая зона неопределённости дальности фокусировки, при которой интенсивность меняется незначительно.

Алгоритм, обеспечивающий коллимацию излучения, может быть реализован в импульсно-периодическом режиме работы лазера при стробировании приёмника для получения рассеянного излучения из дальней зоны либо в бистатической схеме, имеющей пространственную (угловую) селекцию дальней зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Банах В. А., Жмылевский В. В., Игнатъев А. Б. и др.** Коррекция фазовых искажений лазерных пучков по сигналу обратного рассеяния в атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. **22**, № 3. С. 289–296.
2. **Банах В. А., Жмылевский В. В., Игнатъев А. Б. и др.** Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // *Оптика и спектроскопия*. 2010. **108**, № 1. С. 113–122.
3. **Банах В. А., Жмылевский В. В., Игнатъев А. Б. и др.** О возможности использования обратного аэрозольного рассеяния в адаптивном контуре атмосферных оптических систем // *Квантовая электроника*. 2008. **38**, № 8. С. 764–768.
4. **Банах В. А., Жмылевский В. В., Игнатъев А. Б. и др.** Компенсация искажений волнового фронта частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. **24**, № 7. С. 549–554.
5. **Ignatiev A. V., Kochegarov Yu. M., Malashko Ya. I., Khabibulin V. M.** Numerical modeling of the back scattering aerosol signal to control an adaptive system // *Fourteenth Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics: Abstracts*. Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2007. P. 242.
6. **Малашко Я. И.** Метод фокусировки излучения импульсной лазерной системы, использующей обратное аэрозольное излучения атмосферы // *Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»*. М.: МИРЭА, 2003. С. 221–222.
7. **Клейменов А. Н., Кочегаров Ю. М., Малашко Я. И., Хабибулин В. М.** Метод двойной гармоник сферического зондирования волнового фронта для определения положения фокусировки лазерного пучка // *Тез. докл. Шестой всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы создания лазерных систем»*. Ч. 1. Радужный: ФКП «ГЛП "Радуга"», 2008. С. 38–40.

8. Малашко Я. И., Клейменов А. Н., Потемкин И. Б. Высокоточный метод определения положения фокусировки лазерных пучков в условиях мобильного базирования // Научно-технические технологии. 2011. 12, № 12. С. 85–90.
9. Лукин В. П. Выбор базовых параметров адаптивных оптических систем // Автометрия. 2012. 48, № 2. С. 3–11.
10. Больбасова Л. А., Лукин В. П. Адаптивная фокусировка когерентного излучения с использованием флуктуирующего сигнала подсвечивания в качестве опорного // Там же. С. 76–85.

Поступила в редакцию 28 октября 2011 г.
