

УДК 535.8

В.И. Мещеряков, д.т.н.

Одесский государственный экологический университет

КОРРЕКТОР ИСКАЖЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО КАНАЛА

В работе рассматриваются особенности построения адаптивной фазосопряженной системы, принципы построения датчиков волнового фронта, определяющие функциональные возможности и алгоритмы управления всей системы коррекции волнового фронта. Приводятся результаты создания фазовых датчиков, обеспечивающих возможность построения фильтра Гартмана.

Ключевые слова: адаптивная оптика, волновой фронт, система управления, квазиоптическое приближение, фильтр Гартмана

Передача лазерного излучения через турбулентную атмосферу, характеризуемую вариациями локальных коэффициентов преломления, сопровождается искажением волнового фронта генерируемой волны, следствием чего является неопределенность распределения интенсивности на облучаемой мишени. Системы управления волновым фронтом призваны уменьшить эту неопределенность, используя отраженный сигнал от облучаемого объекта и формируя исходное излучение такой конфигурации, которое обеспечивает заданное поле на приемной стороне. Поскольку атмосферный канал передачи подвержен непредсказуемым флуктуациям, то система формирования излучения должна оперативно перестраивать свои характеристики в зависимости от состояния атмосферы за период, когда канал передачи можно считать стационарным или *замороженным*. Требования высокого быстродействия являются доминирующими при построении подобных систем, поэтому структура управления адаптивной оптикой строится с приоритетом этого критерия. Построение подобных систем и составляющих из компонентов до настоящего времени является актуальным.

Мгновенные значения напряженности электрического поля монохроматического излучения, характерного для лазера, обозначим $E(\rho, t) \exp(i\omega t)$, $\rho = \{r, z\} = \{x, y, z\}$. Полагаем, что длина волны λ существенно меньше пространства турбулентности, а временные изменения флуктуаций диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon(\rho, t)$ достаточно медленные, тогда справедливо волновое скалярное уравнение [1]

$$\nabla^2 E + k^2 n^2 E = 0, \quad (1)$$

где

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad - \quad \text{квадрат волнового числа,}$$

c - скорость света, $n^2 = \varepsilon$ - случайное поле показателя преломления. Обычно полагают усредненное значение $\langle \varepsilon \rangle = n^2 = 1$. Со случайной функцией n не существует общего решения этого уравнения.

В квазиоптическом приближении, когда распространение волны совпадает с осью z , в плоскости $z = 0$ при записи поля в виде

$$E(\rho, t) = A(r, z, t) \exp(-ikz),$$

где $r = \{x, y\}$, $A(r, z, t)$ - комплексная амплитуда волны, уравнение (1) приобретает вид [2]

$$\Delta_{\perp} A + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial A}{\partial z} + 2k^2 n_1 A = 0, \quad (2)$$

$$\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

где $n_1(\rho, t) = n - n_0$ - флуктуации показателя преломления, с граничным условием $A(r, 0, t) = A_0(r, t)$. Если учесть малость изменения комплексной амплитуды A вдоль направления распространения, можно пренебречь вторым членом уравнения (2) и прийти к параболическому уравнению квазиоптики [3]

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + 2k^2 n_1 A, \quad (3)$$

а при пренебрежении дифракционными эффектами на оптических неоднородностях, размеры которых существенно больше длины волны излучения, к приближению геометрической оптики

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = 2k^2 n_1 A. \quad (4)$$

Решением (4) для произвольной функции n_1 является [2]

$$A(r, z) = A_0(r) \exp \left[-ik \int_0^z n_1(r, z') dz' + iu_0(r) \right], \quad (5)$$

где $A_0(r)$, $u_0(r)$ - амплитудный и фазовый профили поля при $z = 0$, следовательно амплитуда волны в оптически неоднородной среде остается неизменной, а вариации показателя преломления приводят только к флуктуации фазового профиля и не зависят от характеристик исходной волны

$$\varphi(r, z) = -k \int_0^z n_1(r, z') dz'. \quad (6)$$

Результатом является возможность компенсации фазовых неоднородностей протяженного атмосферного канала длиной L сосредоточенным фазовым корректором с фазовым профилем

$$u(r) = -\varphi(r, L), \quad (7)$$

причем корректор можно установить и на передающей стороне.

Таким образом, при введении на передающей стороне фазового корректора с профилем нерегулярного $\varphi(r, L)$ и регулярного $u_1(r)$ фазового предискажений

$$u_0(r) = -(\varphi(r, L) + u_1(r)),$$

которые несут в себе информацию о турбулентной составляющей атмосферного канала и структуре фазового фронта исходного излучения, на облучаемой мишени можно получить неискаженное поле. Поскольку замена знака эквивалентна операции сопряжения комплексной фазы волны, метод получил название метода фазового сопряжения [1].

Более тщательный анализ [4] показывает, что приближение геометрической оптики позволяет методом фазового сопряжения компенсировать влияние только

крупных неоднородностей, существенно превышающих длину волны, тогда как мелкие неоднородности участвуют в процессе дифракции, поэтому рассматриваются как стохастическая составляющая со сложным законом распределения.

При формировании заданного закона пространственного распределения интенсивности на удаленной мишени возникает ситуация, когда излучаемый пучок дважды проходит через оптическую неоднородность – от излучателя к мишени и отраженный от мишени к приемнику излучения, положение которого практически совпадает с положением излучателя. Если обозначить комплексную амплитуду отраженного поля $\psi(r, z)$, функцию отражающих свойств мишени $g(r', r)$, комплексную амплитуду падающую на мишень волны $A(r', L)$, тогда для мишени с локальным коэффициентом отражения $V(r)$ выполняются условия [2]:

$$\begin{aligned} g(r', r) &= V(r)\delta(r' - r), \\ \psi(r, L) &= V(r)A(r, L), \end{aligned}$$

а для квазиоптического приближения выражения для излученной и отраженной волн приобретают вид:

$$\begin{aligned} 2ik \frac{\partial A}{\partial z} &= \Delta_{\perp} A + 2k^2 n_1 A, \\ -2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} &= \Delta_{\perp} \psi + 2k^2 n_1 A, \end{aligned}$$

и функциональная связь между комплексной амплитудой рассеянного поля в плоскости приемника и комплексной амплитудой, падающей на мишень для точечного источника, определяется как

$$\psi(0,0) = \int V(r)A^2(r, L)d^2r / A_0.$$

Из приведенных соотношений следует инвариант

$$J_u = \int A(r, z)\psi(r, z)d^2r = const, \quad (8)$$

называемый интерференционным критерием, который характеризует интегральное перекрытие излученной и отраженной волн. Важным для задачи рассмотрения является то, что интеграл перекрытия можно измерить, осуществив интерференцию этих волн, а также тот факт, что данное выражение справедливо для любых длин волн, распространяющихся в неоднородной среде во взаимно-противоположных направлениях.

Другой важной зависимостью, связывающей комплексную амплитуду рассеянного поля $\psi(r, 0)$ в плоскости регистрации (при $z = 0$) с интегральным распределением комплексной амплитуды $A(r, L)$ на поверхности мишени является [2]

$$\int A_0(r)\exp[iu_0(r) + i\varphi(r, 0)]\psi(r, 0)d^2r = \int V(r)A^2(r, L)d^2r,$$

где $\varphi(r, 0) = \arg\psi(r, 0)$ - фаза отраженного поля в плоскости $z = 0$.

В это выражение в явном виде входит фаза $u_0(r)$ излученной волны. Поскольку волновой фронт $u_0(r)$ формируется с помощью корректора волнового фронта, то это позволяет оценить воздействие процесса адаптации на распределение интенсивности в плоскости мишени. В частности, для точечного объекта

$$J_u \sim I(0, L)\exp(i\alpha),$$

где α - постоянный фазовый сдвиг. Следовательно, значение интерференционного критерия в плоскости приемной апертуры при $z = 0$, пропорционально интенсивности волны $I(0, L)$, падающей на точечную мишень.

Приведенные зависимости показывают, что управление адаптивной системой предполагает наличие данных о распределении амплитуды излучения $A(r, 0)$, распределении отраженного от мишени поля $\psi(r, 0)$, и распределении фазы отраженного сигнала $\varphi(r, 0)$ на выходе излучателя.

Типичная структура адаптивной системы управления волновым фронтом включает: источник излучения с гибким управляемым зеркалом, атмосферный канал передачи с искажениями, мишень, приемник отраженного сигнала, датчик волнового фронта, корректор фазы, управляющее устройство.

Синтез структуры системы управления волновым фронтом из данных элементов предполагает ответ на ряд вопросов, определяющих ее эффективность:

- 1) каковы пространственные и временные характеристики искажений волнового фронта,
- 2) каков алгоритм управления и метод коррекции волнового фронта и потенциальные возможности аппаратно-программной реализации,
- 3) каковы характеристики пространственно-временного энергетического поля исходного излучения,
- 4) выбранный принцип и система датчика волнового фронта,
- 5) каковы статические и динамические характеристики корректора волнового фронта и его энергетические возможности.

Очевидно, что каждая из приведенных задач является предметом самостоятельного исследования. Сложность вопроса усугубляется тем обстоятельством, что целевая функция управления не выражается через координаты отдельных сегментированных элементов, поскольку каналы оказываются взаимосвязанными и показатель качества зависит практически от всех координат составляющих субапертур. Результирующее поле интенсивности на приемной стороне правомерно рассматривать как совокупность векторных воздействий передающей стороны, направления которых искажены локальными вариациями коэффициентов преломления атмосферного канала, следовательно, непросто выделить определяющее влияние какой-либо одной составляющей.

Приведенные выражения выявляют принципиальные проблемы фазосопряженной коррекции волнового фронта.

- Пространственное распределение формы амплитуды A_0 излученного пучка, как правило, фиксированное, особенно для лазеров высокой мощности, поэтому управлению поддается только фазовая составляющая.
- Апертура приемника и передатчика имеет ограниченные размеры, поэтому на граничные условия накладываются краевые условия передающей апертуры.
- Решение обратной задачи может быть корректным лишь для линейных систем при отсутствии стохастической составляющей, что практически не выполняется.

Решение данной задачи только математическим моделированием вызывает серьезные сомнения, поэтому дополнение задачи физическим моделированием представляется корректным.

Для отработки системы были разработаны модульные матричные приемники излучения инфракрасного диапазона, из которых набирался матричный приемник излучения произвольной конфигурации. Разработаны модули двух типов: четырехэлементная матрица и восьмизэлементная линейка, из которых можно было набирать матричное поле с равномерным расположением чувствительных элементов.

Данные приемники использовались в качестве мишеней, поскольку на них можно было непосредственно в ходе эксперимента определять распределение интенсивности излучения по полю и судить об адекватности управления. Первичные преобразователи выполнены на пироэлектрических кристаллах ниобата лития. Выбор чувствительных элементов обоснован широким динамическим диапазоном преобразования, динамическими характеристиками, а также тем обстоятельством, что пироэлектрические кристаллы не требуют охлаждения, что существенно удешевляет конструкцию и упрощает условия эксплуатации. Приемники содержат вторичные преобразователи с нормированными выходами, что позволяет получать на аналоговых запоминающих элементах электрических эквивалент интенсивности воспринимаемого излучения практически в реальном времени процесса (задержка не превышает 30 мкс). Учитывая то, что время *замороженности* атмосферного канала составляет примерно 10 мс, этого оказывается достаточным для многих практических задач. Для ввода аналоговой информации от приемников излучения в компьютер для этих приемников излучения разработаны модули аналоговой памяти на 1 мс с погрешностью хранения не превышающей 0,1%, что обеспечивает возможность ввода в компьютер параллельно получаемых данных эксперимента.

Другим важным элементом адаптивной системы коррекции волнового фронта явилась разработка датчика волнового фронта – фильтра Гартмана. Принцип действия этого датчика основан на том, что пучок излучения попадает на квадрантный приемник, выходной сигнал которого пропорционален смещению пучка от центра приемника. Лучи, от деформированного волнового фронта, прошедшего через неоднородную атмосферу, распространяются по нормали к фронту. Таким образом, если расположить апертуру диафрагмы, находящейся на определенном расстоянии от перекрестья квадрантного приемника параллельно плоскости приемника, то при облучении фильтра Гартмана плоской волной, прошедшей через диафрагму симметричный пучок окажется на перекрестье приемного элемента, и площадь перекрытия всех четырех квадрантов окажется одинаковой. Выходной разностный сигнал будет равен нулю. При наклоне волнового фронта пучок будет отклоняться от центра, и на выходе вторичного преобразователя будет генерироваться разностный сигнал, пропорциональный этому отклонению. Чувствительные элементы квадрантных приемников выполнены из танталата лития и также не требуют принудительного охлаждения. Набирая матрицу таких датчиков, получаем поле отклонений, линейно связанных с наклоном волнового фронта. Разработанный датчик исключает влияние амплитуды сигнала на выходные результаты, поскольку определяет и суммарный сигнал от всех квадрантных датчиков и по нему осуществляет нормировку. Его линейный динамический диапазон составляет 0,01-2 мм, постоянная времени 1-2 мкс, что обеспечивает возможность фиксации импульсных волновых фронтов в инфракрасном диапазоне спектра.

Для анализа отраженного инфракрасного поля была разработана многоэлементная пироэлектрическая матрица с независимыми элементами и волоконным вводом. Шаг дискретизации матричного приемника излучения ограничен диаметром инфракрасных волокон. На концах этих волокон размещены независимые пироэлектрические неохлаждаемые приемники излучения, что позволило исключить взаимное тепловое влияние инфракрасных приемников излучения друг на друга.

Учитывая, жесткие требования к быстрдействию системы, поскольку время замороженности атмосферы не превышает единиц мс, значения фаз должны вычисляться практически в реальном времени процесса. Управляемые зеркала, выполняющие функции корректора фазы интенсивного излучения, имеют небольшое число независимых сегментов (обычно 25 или 57), как и датчики волнового фронта. Это

создает определенные проблемы при описании волнового фронта и эффективности коррекции. В частности, при использовании квадрантных приемников, из которых строится фильтр Гартмана, градиенты по координатам x, y измеряются в одной точке – центре квадрантной сетки. Значения градиентов при этом выражаются через значения фаз в четырех ближайших углах [5]:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{j,k} = \left[\frac{\varphi_{j+1/2, k+1/2} + \varphi_{j+1/2, k-1/2}}{2h} - \frac{\varphi_{j-1/2, k+1/2} + \varphi_{j-1/2, k-1/2}}{2h} \right],$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{j,k} = \left[\frac{\varphi_{j-1/2, k+1/2} + \varphi_{j+1/2, k+1/2}}{2h} - \frac{\varphi_{j+1/2, k-1/2} + \varphi_{j-1/2, k-1/2}}{2h} \right].$$

Если вместо выражений $\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ подставить полученные от координатно-чувствительных приемников фильтра Гартмана измеренные значения отклонения фазы, получим физическую реализацию решения системы линейных уравнений.

Проще задача решается при представлении выборок фаз в матричной форме, когда производные определяются через значения фаз в узловых точках аппроксимацией первого порядка

$$\varphi' \approx (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / h,$$

где h - шаг выборки. Более высокий порядок аппроксимации необоснован по причине значительного влияния стохастической составляющей сигнала. Поскольку требования к скорости обработки данных для системы крайне высоки, специализированный процессор был реализован на операционных усилителях.

Выводы:

1. Показана возможность управления распределением интенсивности лазерного излучения на объекте путем адаптивной коррекции фазового фронта отраженной волны.
2. Представлены результаты разработки фильтра Гартмана и матричных приемников излучения, обеспечивающие получение исходной информации для коррекции фазового фронта управляемым зеркалом в реальном времени процесса.

Список литературы

1. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985.
2. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. – 336с.
3. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
4. Распространение лазерного пучка в атмосфере / Под ред. Стробена Д. – М.: Мир, 1981
5. Фрид Д. Адаптивная оптика. М.: Мир, 1980. – 332с.

Корректор искривления атмосферного канала. Мещеряков В.И.

У роботі розглядаються особливості побудовання адаптивної фазоспряженої системи, принципи проектування сенсорів хвильового фронту, які зумовлюють функції ні можливості та алгоритми управління усієї системи корекції хвильового фронту. Наводяться результати створення хвильових сенсорів, що забезпечують можливість фільтру Гартмана.

Ключові слова: адаптивна оптика, хвильовий фронт, система управління, квазиоптичне наближення, фільтр Гартмана

Correction of atmospheric distortion. Mescherajkov V.I.

In activity the features of construction adaptive phase-conjugate of a system, principles of construction of sensors of a wave front set are esteemed, which one determine functional capabilities and control algorithms of all system of correction of a wave front set. The outcomes of creation of phase sensors ensuring a capability of construction of the filter Hartman's are resulted.

Keywords: adaptive optics, wave front, system of management, kwazioptical approaching, the Gartmana filter