

А.А. Докторов

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ЩЕЛЕВОЙ АНАЛИЗАТОР ВОЛНОВОГО ФРОНТА
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приводится описание основанного на методе Фуко анализатора волнового фронта оптического излучения. При использовании в адаптивных оптических системах и исследованиях характеристик лазерного излучения он имеет ряд существенных преимуществ перед датчиками Гартмана. Такой анализатор значительно проще в реализации, поскольку вместо набора квадрантных фотоприемников может применяться монолитная матрица, имеющая к тому же в четыре раза меньше элементов при одинаковом пространственном разрешении. Обеспечивается значительно больший (на порядок и более) диапазон измерений.

Анализатор волнового фронта – один из главных элементов адаптивных оптических систем (АОС), по сложности часто превосходящий их остальные компоненты. Не является исключением и датчик Гартмана [1], применяемый, как правило, в условиях сильных искажений волнового фронта (ВФ) и большой мощности оптического излучения. Несмотря на простоту принципа действия, он достаточно сложен в исполнении и требует кропотливой юстировки. Для этого датчика, применяемого обычно в сочетании с квадрантными фотоприемниками, характерен и другой недостаток – ограниченность линейного диапазона измеряемых наклонов ВФ в субапертурах пределами угла дифракции θ_d (а это, как правило, единицы угловых минут), что явно недостаточно в большинстве типичных ситуаций, когда в анализируемом волновом фронте доминируют линейные и сферическая составляющие с наклоном, превосходящим θ_d . В конечном итоге эти недостатки приводят к снижению эффективности АОС, имеющих в своем составе такие датчики.

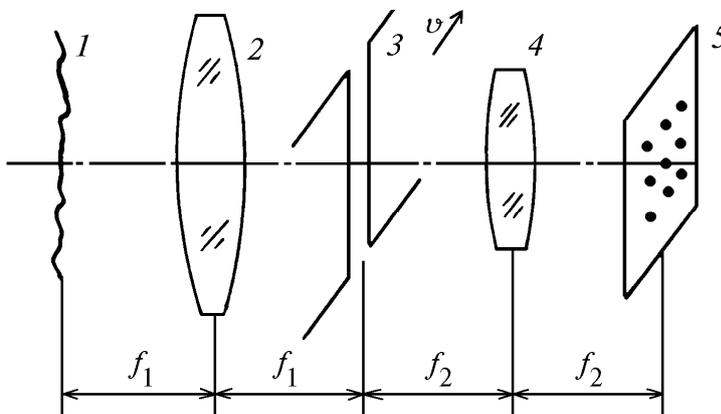


Схема многоканального щелевого анализатора волнового фронта оптического излучения

Между тем исследователями остается невостребованным способ анализа ВФ, предложенный Фуко в 1876 г. для исследования оптических поверхностей (так называемый теневой метод Фуко). Сложилось устойчивое мнение о его практической неприменимости в АОС ввиду сложности реализации. Тем не менее после некоторой модификации на базе этого метода могут быть созданы анализаторы ВФ, по ряду характеристик, в том числе по простоте реализации, превосходящие известные датчики Гартмана. Метод Фуко, первоначально предложенный для анализа качества вогнутых сферических поверхностей, заключается в засветке исследуемой поверхности параллельным световым пучком и изучении зависимости изображения на отстоящем от фокальной плоскости экране от положения другого непрозрачного экрана (ножа

Фуко), перемещаемого в фокальной плоскости. Иными словами, метод состоит в сочетании действий последовательного анализатора пространственного спектра изображения и параллельного анализатора самого изображения, позволяющего определить искажения ВФ, вносимые исследуемой поверхностью. Возможный вариант реализации этого метода на современной элементной базе имеет вид, представленный на рисунке, где 1 – исследуемый волновой фронт, 2, 4 – линзы, образующие телескопическую систему, 3 – пространственный фильтр в виде узкой щели в непрозрачном экране, 5 – многоэлементный приемник излучения. Исследуем зависимость сигналов на выходах приемников от положения щели-анализатора. Комплексные амплитуды сигналов во входной и выходной плоскостях такой системы связаны известным в оптике соотношением

$$s_{\text{вых}} = F \{F \{s_{\text{вх}}\} T\},$$

где $s_{\text{вх}} = s_{\text{вх}}(\mathbf{r})$ и $s_{\text{вых}} = s_{\text{вых}}(\mathbf{R})$ – амплитуды сигналов во входной и выходной плоскостях; $F\{\dots\}$ – оператор преобразования Фурье; T – модуляционная характеристика транспаранта (щели). Выполняя преобразования, имеем

$$s_{\text{вых}}(\mathbf{R}) = \gamma s_{\text{вх}}(-\gamma \mathbf{R}) * F \{T\}, \quad (1)$$

где $\gamma = f_1/f_2$ – увеличение телескопической системы; $*$ – операция свертки. Для вертикальной щели, смещенной в фокальной плоскости,

$$F \{T\} = \text{sinc}(x/\Theta_d) \exp(-2\pi i x h f_1/\lambda) \delta(y), \quad (2)$$

где x, y – нормированные на фокусное расстояние f_2 декартовы координаты в выходной плоскости анализатора; $\Theta_d = \lambda/af_1$ – угол дифракции на щели; λ – длина волны излучения; a, h – ширина и смещение щели относительно оптической оси, нормированные на фокусное расстояние f_1 ; $\delta(\dots)$ – дельта-функция, sinc – функция, определяемая равенством:

$$\text{sinc}(t) = \sin(\pi t)/\pi t.$$

Зададим входной сигнал в виде $A(\mathbf{r})\exp(i\varphi(\mathbf{r}))$, где характерный масштаб, на котором наблюдаются заметные изменения амплитуды, существенно превышает масштаб изменения фазы, и выберем ширину щели такой, чтобы в пределах $\Theta_d f_1$ изменения фазы ВФ можно было бы считать линейными. Подставим (2) в (1), заменив для получения аналитического выражения интеграла функцию sinc функцией окна единичной ширины $\text{rect}(x/2\Theta_d)$. Такая замена существенно не повлияет на окончательный результат, поскольку при $x \geq |\Theta_d|$ функция $\text{sinc}(x/2\Theta_d)$ осциллирует, а ее абсолютное значение быстро уменьшается. Вынесем из-под знака интеграла медленноменяющуюся функцию $A(\mathbf{r})$, а функцию $\varphi(\mathbf{r})$ представим в виде ряда, сохранив линейный член разложения. Тогда, проводя интегрирование в формуле (1), имеем

$$s_{\text{вых}}(\mathbf{R}) = \gamma A(-\gamma \mathbf{R}) \exp(i\varphi(-\gamma \mathbf{R})) \text{sinc}([q_x(-\gamma \mathbf{R}) - h]/a), \quad (3)$$

где $q_x = \varphi'_x \lambda/2\pi$ – наклон ВФ к оси OX (направлению перемещения щели-анализатора). Из полученного выражения следует, что распределение сигнала в выходной плоскости в масштабе 1: γ зеркально отображает распределение входного сигнала. При этом амплитуда сигнала на выходе также зависит от положения щели-анализатора. Когда угловое положение щели соответствует наклону отображаемого участка волнового фронта, тогда амплитуда сигнала максимальна. Отсюда вытекает алгоритм обработки изображения на выходе анализатора. Перемещая щель во всем диапазоне пространственного спектра сигнала, необходимо для каждого фотоприемника матрицы определять угловое положение щели, при котором достигается максимум сигнала на выходе этого элемента. При этом, чтобы не было потерь информации, шаг фотоприемной матрицы не должен превышать определяемого из теоремы отсчетов значения $\lambda/a\gamma$ (спектр пространственных частот сигнала ограничен шириной щели-анализатора). Алгоритм заметно упрощается, если перемещать щель с постоянной скоростью. В этом случае на выходах фотоприемников будут наблюдаться импульсы одинаковой формы, но имеющие разную амплитуду и временное положение:

$$u_i(t) \sim A^2(-\gamma \mathbf{R}_i) \operatorname{sinc}^2([q_x(-\gamma \mathbf{R}_i) - v(t - t_0)]/a), \quad (4)$$

где \mathbf{R}_i – координата центра i -го элемента фотоприемной матрицы; v – скорость углового перемещения щели; t_0 – время пересечения осью щели-анализатора оси оптической системы. Поэтому обработка сигналов сведется к определению момента прихода импульса известной формы, фиксируемого по его максимальному значению, что является стандартной радиотехнической задачей. Имея массив измеренных задержек $\{t_i\}$, можно оценить наклоны соответствующих участков ВФ, исходя из выражения

$$q_x(-\gamma \mathbf{R}_i) = v(t_i - t_0). \quad (5)$$

Для определения другой составляющей ВФ необходимо наличие второй щели-анализатора, ориентированной и, соответственно, перемещаемой перпендикулярно первой. С ней необходимо повторить тот же цикл измерений, что и с первой щелью. На практике такие анализаторы проще всего реализовать в виде прорезей в синхронно вращающихся дисках. Эти диски должны иметь достаточно большой радиус, чтобы перемещение каждой прорези в зоне анализа спектра сигнала можно было бы считать параллельным.

Завершая описание щелевого анализатора ВФ, остановимся на его основных характеристиках. Абсолютная погрешность измерений, реализуемая в данной схеме, обусловлена нестабильностью скорости движения щели и флуктуационной погрешностью, связанной с изменениями времени прихода импульса и имеющей порядок $a/\sqrt{q^2}$, где q^2 – отношение сигнал-шум на выходе элемента матрицы приемников излучения. Что касается первой составляющей, то скорость движения может быть в свою очередь измерена и учтена при получении оценок (5). Флуктуационная же составляющая может быть сделана существенно меньшей, чем в датчике Гартмана. Во-первых, это связано с тем, что измерения в каждом элементе разрешения обеспечиваются одним приемником излучения, а не четырьмя, как в распространенных схемах датчиков Гартмана. Во-вторых, при работе в ИК-диапазоне возможно использование высокочувствительной охлаждаемой матрицы фотоприемников, в то время как для достижения аналогичной чувствительности в датчике Гартмана потребуется применение набора охлаждаемых четырехплощадочных приемников излучения, что крайне затруднительно (поэтому, как правило, в таких случаях применяются квадрантные пироэлектрические фотоприемники). При реализации обычных для таких схем значений $q^2 \sim 1000$ погрешность измерений наклонов ВФ составит единицы процента от угловой ширины щели-анализатора.

Определим теперь линейный диапазон наклонов ВФ, в котором обеспечиваются измерения по данному методу. Он ограничен угловым полем оптической системы, образуемой линзами 2, 4 (см. рисунок). В литературе она известна как телескопическая система Кеплера и широко применяется в астрономии и геодезии. Угловое поле, в котором реализуется дифракционное качество изображения, в таком телескопе составляет не менее 30...60 угл. мин, что заведомо превышает диапазон возможных наклонов ВФ, обрабатываемых в АОС. Что касается такой важной характеристики анализатора, как быстродействие, то она обусловлена использованием в схеме механических анализаторов. Общий их недостаток состоит в том, что они имеют ограничение по скорости вращения, вытекающее из условий прочности. Увеличение же числа щелей-анализаторов на одном диске повлечет рост его размеров, что часто недопустимо из-за конструктивных соображений. Поэтому в приборах с механической модуляцией чаще всего ограничиваются частотами ~ 3 кГц, что, однако, вполне достаточно для анализатора, работающего в контуре АОС, поскольку полоса пропускания адаптивных зеркал обычно не превышает 100 ... 1000 Гц [1], а значит, и полоса всего контура адаптации не может быть сделана большей.

Таким образом, основанный на методе Фуко многоканальный щелевой анализатор имеет ряд существенных преимуществ перед используемыми в аналогичных целях датчиками Гартмана. Во-первых, такой анализатор значительно проще в реализации, поскольку вместо набора обычно применяемых в датчиках Гартмана квадрантных фотоприемников может использоваться монолитная матрица, имеющая к тому же в четыре раза меньше элементов при одинаковом пространственном разрешении. Во-вторых, обеспечивается по крайней мере на порядок больший диапазон измерений наклонов ВФ. В-третьих, при работе в ИК-диапазоне такой анализатор из-за возможности применения охлаждаемой фотоприемной матрицы имеет значи-

тельно более высокую чувствительность. Перечисленные достоинства анализатора позволяют считать его перспективным при исследованиях характеристик оптического излучения и при создании более эффективных систем адаптивной оптики.

1. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 111 с.

Государственное научно-производственное объединение «Альтаир»
Москва

Поступила в редакцию,
22 марта 1996 г.

A . A . D o k t o r o v . Multichannel Slit Analyzer of the Optical Radiation Wave Front.

The description of a wave front analyzer based on the Fuko method is presented in the paper. Such analyzer offers a number of advantages over Hartmann sensor when applying to adaptive optical systems. Its fabrication is simpler because it may consist of monolithic matrix one forth as many elements instead of a set of quadrant photoreceivers with the same spatial resolution. The measurement range is significantly wider (by an order of magnitude or more).