

Г.Н. Доля, И.В. Трушко, С.Н. Шостко

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ АВТОФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Статья посвящена синтезу и анализу алгоритма оптимальной обработки оптического сигнала в адаптивной системе автофокусировки излучения. При этом учтена реальная ширина спектра сигнала, что привело к необходимости введения в алгоритм оптимальной обработки новой операции — обращения во времени комплексной амплитуды сигнала.

В настоящее время развитие оптических локационно-информационных систем, использующих атмосферный канал, тесно связано со все более широким применением адаптивных систем на основе обращения волнового фронта (ОВФ). Обусловлено это тем, что именно такие системы позволяют не использовать специальную систему оперативного зондирования атмосферы, т. к. компенсация искажающего воздействия атмосферы достигается за счет операции ОВФ рассеянного объектом сигнала подсвета [1, 2]. Известны исследования в этой области, посвященные анализу качества коррекции волнового фронта при реализации ОВФ управляемыми адаптивными зеркалами [3, 4] и влиянию на эффективность фокусировки ограниченного динамического диапазона системы коррекции профиля адаптивного зеркала [5, 6].

При этом в основу разработанных алгоритмов и проведенных исследований положено утверждение о монохроматичности используемого излучения. Однако таких идеальных сигналов в природе не существует, в связи с чем представляет интерес синтез алгоритма оптимальной обработки сигнала в адаптивной системе автофокусировки излучения с учетом реального спектра обрабатываемого сигнала.

При общем подходе для эффективного функционирования адаптивной системы автофокусировки важно, чтобы вся переизлучаемая ею энергия полностью перехватывалась объектом, при этом для осуществления, например, передачи энергии не имеет значения, каким образом она будет распределена по поверхности объекта.

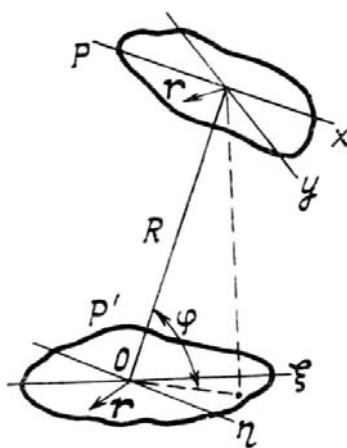


Схема взаимного расположения картинной плоскости объекта и плоскости приемной апертуры

Поэтому рассматриваемая задача создания алгоритмов обработки сигнала может иметь, по крайней мере, три варианта решения в предположении, что:

максимум излучаемой энергии на объекте обеспечивается за счет воспроизведения на нем распределения поля, совпадающего с начальным распределением;

излучаемая энергия концентрируется в некоторой ограниченной области объекта;

и вся излучаемая энергия будет случайным образом распределена в пределах объекта.

Далее рассмотрен первый вариант решения поставленной задачи, имеющий единственное решение в силу того, что исходное распределение поля можно воспроизвести единственным образом. Кро-

ме того, такой подход позволяет одновременно выявить оптимальный алгоритм обработки сигнала в адаптивных системах восстановления неискаженного изображения объектов, что тоже является актуальным для оптических локационно-информационных систем.

Предположим, что рассеянное объектом P (см. рисунок) поле проходит через неоднородную среду — турбулентную атмосферу — и принимается апертурой p' , причем центры приемной апертуры и картинной плоскости объекта находятся на прямой, образующей угол $(\pi/2 - \varphi)$ с нормалью к плоскости приемной апертуры. При этом будем считать, что распределение $E(\mathbf{r}, t)$ в картинной плоскости является выборочной функцией нормального случайного поля. Найдем алгоритм оптимальной обработки поля $E_{\Pi}(\mathbf{r}', t)$ на раскрыве приемной апертуры, позволяющий наилучшим образом восстановить исходное распределение поля $E(\mathbf{r}, t)$ в картинной плоскости объекта P .

В качестве критерия оптимальности будем использовать среднюю по времени дисперсию ошибки воспроизведения истинного распределения поля в картинной плоскости:

$$\xi(\mathbf{r}) = \int_{\tau_{\Pi}} \langle |E(\mathbf{r}, t) - \hat{E}(\mathbf{r}, t)|^2 \rangle dt, \quad (1)$$

где

$$\hat{E}(\mathbf{r}, t) = \int_{P'} \int_{\Delta\omega} E_{\Pi}(\mathbf{r}, \omega) h_{\Phi}(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega) \exp(-j\omega t) d\omega d\mathbf{r}'$$

— оценка распределения поля в картинной плоскости, полученная при пропускании через фильтр с импульсным откликом $h_{\Phi}(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega)$ принятой спектральной составляющей $E_{\Pi}(\mathbf{r}', \omega)$, а $\Delta\omega$ и τ_{Π} — ширина спектра сигнала и его длительность соответственно.

В свою очередь

$$E_{\Pi}(\mathbf{r}', \omega) = \int_P E(\mathbf{r}, \omega) h_{\text{ср}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) d\mathbf{r} + E_{\text{ш}}(\mathbf{r}', \omega), \quad (2)$$

где $h_{\text{ср}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ — импульсный отклик «замороженной» среды на частоте ω ;

$$E(\mathbf{r}, \omega) = \int_{\tau_{\Pi}} E(\mathbf{r}, t) \exp(j\omega t) dt$$

— спектральная составляющая сигнала на частоте ω в точке \mathbf{r} картинной плоскости объекта. $E_{\text{ш}}(\mathbf{r}', \omega)$ — спектральная составляющая шумового фона на частоте ω в точке \mathbf{r}' приемной апертуры. Будем полагать, что каждая спектральная составляющая шумового фона является нормальным случайным полем с нулевым средним значением и пространственной корреляционной функцией вида $K_{\text{ш}}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'_1, \omega) = N_0(\omega)\delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}'_1)$, где $N_0(\omega)$ — спектральная плотность мощности шума.

Запишем выражение (1) на основании теоремы Планшереля в виде

$$\xi(\mathbf{r}) = \int_{\Delta\omega} \xi(\mathbf{r}, \omega) d\omega = \int_{\Delta\omega} \langle |E(\mathbf{r}, \omega) - \hat{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2 \rangle d\omega, \quad (3)$$

где

$$\hat{E}(\mathbf{r}, \omega) = \int_{P'} E_{\Pi}(\mathbf{r}', \omega) h_{\Phi}(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega) d\mathbf{r}'$$

— оценка спектральной составляющей на частоте ω в точке \mathbf{r} картинной плоскости объекта.

Физический смысл выражения (3) заключается в том, что оптимизацию оценки можно произвести, минимизировав ошибку воспроизведения поля на каждой спектральной составляющей.

В результате такой минимизации $\xi(\mathbf{r}, \omega)$ методом, описанным в [7], и ряда математических преобразований и допущений можно показать, что выражение для оптимальной оценки $\hat{E}(\mathbf{r}, \omega)$ имеет вид

$$\hat{E}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{J_0(\omega)}{N_0(\omega) + J_0(\omega)} \int_{P'} E_{\Pi}(\mathbf{r}', \omega) h_{\text{ср}}^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega) d\mathbf{r}', \quad (4)$$

где $J_0(\omega)$ — спектральная плотность сигнала на частоте ω .

Прежде, чем определить содержание алгоритма оптимальной обработки, приведем некоторые соображения, позволяющие сделать это более наглядно. Учтем, что величина $\xi(\mathbf{r})$, вычисляемая в соответствии с (3), не изменится при замене $|E(\mathbf{r}, \omega) - \hat{E}(\mathbf{r}, \omega)|$ на $|E^*(\mathbf{r}, \omega) - \hat{E}^*(\mathbf{r}, \omega)|$.

Физическая же сущность критерия оптимальности позволяет сравнивать как распределение поля в картинной плоскости объекта $E(\mathbf{r}, \omega)$ с оценкой $\hat{E}(\mathbf{r}, \omega)$, так и их комплексно-сопряженные величины, при этом распределение интенсивности в картинной плоскости объекта не изменяется, что важно для системы автофокусировки. Поэтому допустимо для формулировки физической сущности алгоритма оптимальной обработки использовать вместо (4) комплексно-сопряженное выражение:

$$\hat{E}^*(\mathbf{r}, \omega) = \frac{J_0(\omega)}{N_0(\omega) + J_0(\omega)} \int_{P'} E_n^*(\mathbf{r}', \omega) h_{cp}(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega) d\mathbf{r}'. \quad (5)$$

Таким образом, физическая сущность алгоритма оптимальной обработки для спектра принимаемого сигнала заключается в следующем: каждая его спектральная составляющая должна подвергнуться фазовому сопряжению и переизлучению на объект.

Возьмем обратное преобразование Фурье от обеих частей равенства (5) в предположении, что спектр сигнала равномерный, а шумовая составляющая характеризуется одинаковой мощностью на всех частотах. При этом учтем, что для оптического сигнала [8]:

$$h_{cp}(\mathbf{r}', \mathbf{r}, \omega) = \frac{h_{ат}(\mathbf{r}', \mathbf{r})}{j\lambda_0 R} \exp(j\omega t_3(\mathbf{r}', \mathbf{r})), \quad (6)$$

где $h_{ат}(\mathbf{r}', \mathbf{r})$ — импульсный отклик атмосферы, а

$$t_3(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \frac{R}{C} \left(1 + \frac{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^2}{2R^2} \right).$$

В результате преобразования Фурье из (5) получим

$$\hat{E}^*(\mathbf{r}, -t) = \frac{1}{j\lambda_0 R} \cdot \frac{J_0}{N_0 + J_0} \int_{P'} E_n^*(\mathbf{r}', t_3(\mathbf{r}', \mathbf{r}) - t) h_{ат}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (7)$$

Отсюда следует, что оптимальный алгоритм обработки квазимонохроматического сигнала в адаптивных системах автофокусировки излучения, в отличие от оптимального алгоритма обработки монохроматического сигнала, включает в себя кроме фазового сопряжения сигнала еще инверсию комплексной амплитуды сигнала во времени, т.е. формирование и переизлучение на объект зеркальной во времени фазосопряженной копии принятого сигнала.

Осуществление такого алгоритма обработки сигнала, как показывает анализ известных методов обращения волнового фронта, возможно, в частности, на основе нестационарных эффектов при четырехволновом смещении (с. 156, [2]).

1. Херманн Я. Адаптивная оптика. М.: Мир, 1980. С. 91–105.
2. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.
3. Киракосянц В. Е., Логинов В. А., Слонов В. В. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 12. С. 2485.
4. Воронцов М. А., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. М.: Наука, 1988. 272 с.
5. Лукин В. П., Миронов В. Л. // Квантовая электроника, 1985. Т. 12. № 9. С. 1959.
6. Тараненко В. Г. // Известия академии наук СССР. Сер. физическая. 1984. Т. 48. № 7. С. 1419.
7. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Сов. радио, 1972. 684 с.
8. Лазерная локация/И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов: Под ред. чл.-кор. АН СССР Н.Д. Устинова, М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

Поступила в редакцию
20 ноября 1989 г.

G. N. Dolya, I. V. Trushko, S. N. Shostko. **The Nonmonochromatic Signal Optimal Processing Algorithm in the Emission Autofocusing Adaptive System.**

The paper is devoted to the synthesis and analysis of the optical signal optimal processing algorithm in the radiation autofocusing adaptive system. Actual width of the signal spectrum is taken into consideration. This has led to the necessity of including new operation into the algorithm, i. e., the operation of the complex signal amplitude time inversion.