«Оптика атмосферы и океана», **12**, № 12 (1999)

УДК 621.396

А.А. Ковалев

АКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЦЕЛИ

Военный университет ПВО, г. Тверь

Поступила в редакцию 26.07.99 г.

Синтезирован метод активного восстановления изображений в условиях амплитудно-фазовых искажений пространственного спектра сигналов, учитывающий пространственно-временную модуляцию сигнала, обусловленную вращением цели, и не предполагающий наличие или формирование опорного источника в картинной плоскости цели. Предложенное решение пригодно также и для сверхразрешения по угловой координате, в том числе и при построении объемных изображений.

В работах [1–4] рассмотрен метод активного восстановления изображений целей, предполагающий компенсацию мультипликативных искажений пространственного спектра сигналов. Причиной таких искажений могут служить как неоднородности элементов антенно-фидерного тракта, так и турбулентность среды распространения сигнала.

В настоящей статье предлагается дальнейшее развитие метода, учитывающее сложный характер движения лоцируемых целей.

Действительно, любое движение цели может быть представлено в виде совокупности тангенциального, радиального и вращательного перемещений. При этом оказывается, что вращательное движение «само» создает предпосылки для активного восстановления.

Под изображением цели $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$ будем по-прежнему понимать вертикальное комплексное пространственно-временное распределение сигнала в картинной плоскости цели после облучения цели плоской волной, ориентированной по линии визирования. Такой подход удобен тем, что позволяет в расчетах абстрагироваться от объемного характера лоцируемых целей и, понимая, что информация о ее радиальной структуре заключена в аргументе комплексной функции $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$, свести задачу к интегралу Кирхгофа по поверхности, расположенной в картинной плоскости цели.

Для удобства будем вести рассуждения в приближении Фраунгофера, подразумевая при этом, что при соответствующих подстановках можно будет воспользоваться и френелевским приближением.

Итак, пусть за малое время Δt, не превышающее время когерентности сигнала, цель повернулась на малый угол $\Delta\theta$ относительно нормали к линии визирования. Далее, как и ранее в [1–3], $\mathbf{r}$ – вектор в картинной плоскости цели, ρ – вектор в плоскости апертуры. Пусть также

$$\phi_{\text{Ц}}(\mathbf{r}) = \dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})\ . \tag{1}$$

При повороте на $\Delta\theta$ в каждой точке $\mathbf{r}$ фаза изменяется в соответствии с уравнением прямой

$$\Delta\phi_{\text{Ц}}(\mathbf{r}) \equiv 2\mathbf{k}\ \mathrm{tg}\ (\Delta\theta)\ \mathbf{r}, \tag{2}$$

где для упрощения расчетов (но без ущерба для общности) принято, что центр вращения принадлежит линии визирования; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

Тогда в момент времени Δt в картинной плоскости цели формируется сигнал

$$\dot{\mathbf{E}}(r, \Delta t) = E(r) \exp\ \{\ j[\phi_{\text{Ц}}(r) + \Delta\phi_{\text{Ц}}(r)]\} =$$
$$= E(r) \exp\ \{\ j[\phi_{\text{Ц}}(r) + 2k\ \mathrm{tg}\ (\Delta\theta)\ r]\}\ , \tag{3}$$

что для малых $\Delta\,\theta$ и $\Delta\,t$ можно представить в виде

$$\dot{E}(r, \Delta t) = E(r) \exp\ \{\ j[\phi_{\text{Ц}}(r) + 2k\ \Delta\theta\ r]\}\ . \tag{3$'$}$$

С учетом

$$\Delta\theta = \omega_{\text{вр}}\ \Delta t\ , \tag{4}$$

где $\omega_{\text{вр}}$ – скорость вращения цели, из (3′) получим

$$\dot{E}(r, \Delta t) = E(r) \exp\ \{\ j[\phi_{\text{Ц}}(r) + 2k\ \omega_{\text{вр}}\ \Delta t\ r]\}\ . \tag{5}$$

В приближении Фраунгофера, опуская несущественные для последующего рассмотрения сомножители, в плоскости приемной апертуры в момент t получим следующее амплитудно-фазовое распределение:

$$\dot{\varepsilon}(\rho, t) = \exp\ [j\varphi_{\text{а}}(\rho)]\ A(\rho) \int dr\ \exp\ (-j2\pi r\rho/\lambda R)\ \dot{E}(r, t)\ , \tag{6}$$

или с учетом определения пространственного спектра полезного сигнала

$$\dot{\varepsilon} = \int dr\ \exp\ (-j2\pi r\rho/\lambda R)\ \dot{E}(r) \tag{7}$$

Получим

$$\dot{\varepsilon}(\rho, t) = A(\rho) \exp\ [j\varphi_{\text{а}}(\rho)]\ \dot{\varepsilon}(\rho)\ . \tag{6$'$}$$

Здесь и далее $A(\rho)$ – амплитудные, а $\varphi_{\text{а}}(\rho)$ – фазовые мультипликативные искажения, неизменные за время рассмотрения.

Тогда в момент времени $(t + \Delta t)$ в плоскости приемной апертуры получим

$$\dot{\varepsilon}(\rho, t + \Delta t) = A(\rho) \exp\ [j\varphi_{\text{а}}(\rho)] \int dr\ \exp\ (-j2\pi r\rho/\lambda R)\ \dot{E}(r, t{+}\Delta t) =$$

$$= A(\rho)\exp[j\varphi_а(\rho)]\int dr \exp(-j2\pi r\rho/\lambda R)\, E(r)\times$$

$$\times \exp\{j[\phi_Ц(r) + 2k\,\omega_{вр}\,\Delta t\, r]\},$$

а с учетом (1) и теоремы смещения

$$\dot\varepsilon(\rho, t+\Delta t) = A(\rho)\exp[j\varphi_а(\rho)]\times$$

$$\times \int dr \exp[-j2\pi r\rho/(\lambda R)\,(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t)]\,\dot E(r) =$$

$$= A(\rho)\exp[j\varphi_а(\rho)]\,\dot\varepsilon(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t)\,. \qquad (8)$$

Вводя обозначения

$$\varphi(\rho) = \arg\dot\varepsilon(\rho), \qquad (9)$$

$$\psi(\rho, t) = \arg\dot\varepsilon(\rho, t), \qquad (10)$$

из (6′) и (8) получим следующие две системы уравнений относительно фаз и амплитуд:

$$\begin{cases} \psi(\rho,t) = \varphi_a(\rho) + \varphi(\rho), \\ \psi(\rho, t+\Delta t) = \varphi_a(\rho) + \varphi(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t), \end{cases} \qquad (11)$$

$$\begin{cases} \varepsilon(\rho,t) = A(\rho)\varepsilon(\rho), \\ \varepsilon(\rho, t+\Delta t) = A(\rho)\varepsilon(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t, \end{cases} \qquad (12)$$

где отсутствие точек над ε означает операцию взятия модуля от $\dot\varepsilon$.

Решим сперва (11) относительно φ(ρ). Вычитая из второго уравнения системы (11) первое, имеем

$$\psi(\rho, t+\Delta t) - \psi(\rho, t) = \varphi(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t) - \varphi(\rho)\,. \qquad (13)$$

Разделив левую и правую части (13) на Δt, получим

$$\frac{\psi(\rho, t+\Delta t) - \psi(\rho, t)}{\Delta t} = \frac{\varphi(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t) - \varphi(\rho)}{\Delta t}\,. \qquad (14)$$

Введем обозначение

$$\Delta\rho = -\,2R\,\omega_{вр}\,\Delta t\,, \qquad (15)$$

с учетом которого соотношение (14) примет вид

$$-\frac{\psi(\rho, t+\Delta t) - \psi(\rho, t)}{\Delta t} = -\,2R\,\omega_{вр}\frac{\varphi(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t) - \varphi(\rho)}{\Delta\rho}\,. \qquad (16)$$

Устремляя Δt к нулю и замечая, что при этом и Δρ согласно (15) также стремится к нулю, из (16) получим

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\psi(\rho, t+\Delta t) - \psi(\rho, t)}{\Delta t} = -\,2R\,\omega_{вр}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\varphi(\rho+\Delta\rho) - \varphi(\rho)}{\Delta\rho}. \qquad (17)$$

В результате с учетом определения производной имеем

$$\frac{\partial\psi(\rho, t)}{\partial t} = -\,2R\,\omega_{вр}\frac{\partial\varphi(\rho)}{\partial\rho}\,. \qquad (18)$$

Интегрируя (18), находим

$$\varphi(\rho) = \frac{-1}{2R\,\omega_{вр}}\int d\rho\,\frac{\partial\psi(\rho, t)}{\partial t}\,. \qquad (19)$$

Выражения (18) и (19) содержат искомое решение относительно фазы пространственного спектра сигналов, свободное от мультипликативных фазовых искажений $\varphi_а(\rho)$.

В свою очередь, систему уравнений (12) разрешим относительно модуля пространственного спектра полезного сигнала ε(ρ), для чего удобно будет уравнения сначала прологарифмировать:

$$\begin{cases} \ln\varepsilon(\rho,t) = \ln A(\rho) + \ln\varepsilon(\rho), \\ \ln\varepsilon(\rho, t+\Delta t) = \ln A(\rho) + \ln\varepsilon(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t). \end{cases} \qquad (20)$$

Вновь вычитая из второго уравнения системы (20) первое, находим

$$\ln\varepsilon(\rho, t+\Delta t) - \ln\varepsilon(\rho, t) = \ln\varepsilon(\rho - 2R\,\omega_{вр}\,\Delta t) - \ln\varepsilon(\rho)\,. \qquad (21)$$

Повторяя выкладки, аналогичные приведенным в соотношениях (14)–(17), из выражения (20) получим

$$\frac{\partial\ln\varepsilon(\rho, t)}{\partial t} = -\,2R\,\omega_{вр}\frac{\partial\ln\varepsilon(\rho)}{\partial\rho}\,, \qquad (22)$$

откуда

$$\ln\varepsilon(\rho) = \frac{-1}{2R\,\omega_{вр}}\int d\rho\,\frac{\partial\ln\varepsilon(\rho, t)}{\partial t} \qquad (23)$$

или, в окончательном виде,

$$\varepsilon(\rho) = \exp\left[\frac{-1}{2R\,\omega_{вр}}\int d\rho\,\frac{\partial\ln\varepsilon(\rho, t)}{\partial t}\right]. \qquad (24)$$

Выражения (22)–(24) содержат искомое решение относительно модуля пространственного спектра сигналов, свободное от мультипликативных амплитудных искажений A(ρ).

Имея свободные от мультипликативных искажений модуль (выражение (24)) и фазу (выражение (18)) пространственного спектра сигнала (по сути, амплитудно-фазовое распределение поля на раскрыве апертуры), вычисляем (оцениваем) далее само восстанавливаемое изображение $\dot E(r)$, обращая при соответствующих подстановках интегральное преобразование вида (7), каковое, выражая собой фраунгоферову дифракцию, с точностью до масштабирующих есть пространственное преобразование Фурье.

Что касается вопросов технической реализации предложенного метода, то понятно, что временного разноса сигнала можно добиться с помощью временных линий задержек, а операции интегрирования и дифференцирования заменить соответственно суммированием и вычитанием.

Предложенное решение пригодно и для задач объемного видения, подобных той, что рассматривается в [5], где высокое разрешение по угловой координате достигается путем инверсного синтеза апертуры, а высокое разрешение по радиальной дальности – за счет использования сложных сигналов, произведение ширины спектра которых на их длительность больше единицы. Заметим лишь, что в отличие от [5] здесь высокое разрешение по радиальной дальности отнюдь не является залогом высокого разрешения по угловой координате; последнее достигается без привлечения концепции опорного точечного источника.

Итак, в данной статье синтезирован метод активного восстановления изображений в условиях амплитудно-фазовых искажений пространственного спектра сигналов, учитывающий пространственно-временную модуляцию сигнала, обусловленную вращением цели, и не предполагающий наличие или формирование опорного источника в картинной плоскости цели.

1. *Иргизов Р.С., Ковалев А.А., Никитин В.М.* Активное восстановление когерентных изображений в условиях фазовых искажений сигналов // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 10. С. 1054–1060.
2. *Иргизов Р.С., Ковалев А.А., Никитин В.М.* Авторская заявка № 49478642/22 053105/ с приоритетом от 25.06.1991.
3. *Ковалев А.А.* Вариационный синтез сигналов в задаче активного восстановления изображений // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 6. С. 780–785.
4. *Ковалев А.А., Хассан Х.М.* Активное восстановление когерентных изображений в условиях мультипликативных амплитудно-фазовых искажений пространственного спектра сигналов // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 7. С. 921.
5. *Лещенко С.П., Горшков С.А., Ширман Я.Д.* Принцип получения двумерных радиолокационных изображений при недостаточном азимутальном разрешении // Радиотехника и электроника. 1991.

A.A. Kovalev. **Active Restoration of Images Accounting for Relative Motion of Target.**

A method is proposed for active restoration of images under condition of amplitude-phase distortions of spatial spectrum of signals. The method takes into account spatiotemporal modulation of the signal due to target rotation and disregarding a presence or formation of some reference source in the target plane pattern. The proposed method is also suitable for extraresolution over angular coordinate including the case of constructing 3-D images.