

УДК 621.396.677.49

## ОСТРОНАПРАВЛЕННЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПРИЕМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КОНФОРМНЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ С КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Д. И. Воскресенский, А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин*

Предложен и проанализирован когерентно-оптический метод формирования ДН приемных неплоских АР. Оценены предельные возможности метода и получены соотношения, позволяющие целенаправленно строить соответствующие когерентно-оптические процессоры.

Известны плоские приемные антенные решетки (АР) с когерентно-оптическим (КО) формированием диаграмм направленности (ДН), обзор которых дан в [1]. В [2] рассмотрен метод КО формирования ДН произвольных неплоских АР, реализация которого на элементах сферической оптики возможна лишь в некоторых частных случаях (цилиндрическая, кусочно-плоская АР и ряд других).

Ниже предложен отличный от [2] способ решения аналогичной задачи, который всегда реализуем на элементах сферической оптики, но его возможности ограничены максимально допустимым отклонением поверхности АР от плоской.

Как показано в [2], параллельный обзор пространства сплошным веером остронаправленных ДН достигается обработкой сигналов, принимаемых элементами АР, расположенными на неплоской поверхности  $R = R_{\perp} + n_z Z(R_{\perp})$  (рис. 1а), с помощью алгоритма вида

$$\hat{L}\{\dots\} = \iint_{\Sigma} \dots J_{\text{opt}}(R, K) d^2 R, \quad (1)$$

где  $\{\dots\}$  — сигналы элементов АР,  $\Sigma$  — поверхность АР,  $J_{\text{opt}}(R, K) = |J_{\text{opt}}(R, K)| \exp(iKR)$  — оптимальное (например, по КУ, УБЛ) амплитудно-фазовое распределение (АФР), формирующее остронаправленный прием из направления  $K = K_{\perp} + n_z \Omega_z$  ( $\Omega_z = \sqrt{K^2 - K_{\perp}^2} = K \cos \theta$ ,  $K_{\perp} = n_x K \sin \theta \cos \varphi + n_y K \sin \theta \sin \varphi$ ,  $K = 2\pi/\Lambda$  — волновое число,  $n_x, n_y, n_z$  — орты,  $\varphi$  — азимут,  $\theta$  — угол места [3]),  $d^2 R$  — элемент поверхности.

При небольшом  $Z$  (по сравнению с размером АР, см. ниже)

$$|J_{\text{opt}}(R, K)| d^2 R \approx J(R_{\perp}) d^2 R_{\perp}$$

( $J(R_{\perp})$  — АФР плоского эквивалентного раскрыва,  $d^2 R_{\perp}$  — элемент раскрыва), т. е. допустимо пренебрежение амплитудными искажениями сигналов, принимаемыми элементами АР [4]. В этом случае (1) представим в виде

$$\hat{L}\{\dots\} = \iint_{-\infty}^{\infty} \dots J(R_{\perp}) \exp[-i[K_{\perp} R_{\perp} + \Omega_z Z(R_{\perp})]] d^2 R_{\perp}, \quad (2)$$

где бесконечные пределы взяты с учетом того, что  $J(\mathbf{R}_\perp) = 0$  вне АР.

Для произвольной неплоской поверхности реализация оператора (2) КО методом невозможна, так как  $\Omega_z = \sqrt{K^2 - K_\perp^2}$ . Аппроксимируем данную функцию следующей ступенчатой зависимостью:

$$\Omega_z \approx \sum_{n=1}^N H_n(\mathbf{K}_\perp) \sqrt{K^2 - K_{\perp n}^2}, \quad (3)$$

где

$$H_n(\mathbf{K}_\perp) = \begin{cases} 1, & K_{n-1} < |\mathbf{K}_\perp| \leq K_n \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

$$K_{n-1} < |\mathbf{K}_{\perp n}| \leq K_n, \text{ причем } \sum_{n=1}^N H_n(\mathbf{K}_\perp) = \begin{cases} 1, & |\mathbf{K}_\perp| \leq K \\ 0, & |\mathbf{K}_\perp| > K \end{cases}.$$

Аппроксимация (3) тем точнее, чем уже кольцевые области  $H_n$ . В пределе ( $N \rightarrow \infty$ ) она превращается в тождество. Подставляя (3) в (2), находим

$$\hat{L}_N \{ \dots \} = \sum_{n=1}^N H_n(\mathbf{K}_\perp) \hat{F} \{ \dots J(\mathbf{R}_\perp) \exp[-i \sqrt{K^2 - K_{\perp n}^2}] Z(\mathbf{R}_\perp) \}, \quad (4)$$

где  $\hat{F} \{ \dots \} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \exp(-i \mathbf{K}_\perp \mathbf{R}_\perp) d^2 \mathbf{R}_\perp$  — оператор фурье-преобразования.

Оператор  $\hat{L}_N \rightarrow \hat{L}$  при  $N \rightarrow \infty$  в силу непрерывности ядра в (2). Однако, чем меньше  $N$ , тем проще реализация приближенного оператора (4) средствами оптики. Установим необходимое число  $N$  и построим соответствующий ему КО процессор (КОП), обеспечивающие заданную величину КНД АР во всей зоне обзора ( $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  или  $|\mathbf{K}_\perp| \leq K$ )  $d_{\min} \leq \frac{D}{D_0} \leq 1$  ( $D_0$  — КНД АР с обработкой по алгоритму (2)).

Можно показать, что при  $K_n = \sqrt{(2n-1)K\Delta K - \left(\frac{2n-1}{2}\right)^2 (\Delta K)^2}$  ( $\Delta K$  — шаг ступенчатой аппроксимации (3), определенный ниже), оператор (4) представим в виде

$$\hat{L}_N \{ \dots \} = H_N(\mathbf{K}_\perp) \hat{F} \{ \dots J(\mathbf{R}_\perp) \exp\{-i[K - (N-1)\Delta K]\} Z(\mathbf{R}_\perp) \} + \hat{L}_{N-1} \{ \dots \} = H_N(\mathbf{K}_\perp) (\hat{L}_0 \hat{F}^{-1})^{(N-1)} \hat{L}_1 \{ \dots \} + \hat{L}_{N-1} \{ \dots \}, \quad (5)$$

где

$$\hat{L}_0 \{ \dots \} = \hat{F} \{ \dots \exp[i\Delta K Z(\mathbf{R}_\perp)] \},$$

$$\hat{L}_1 \{ \dots \} = \hat{F} \{ \dots J(\mathbf{R}_\perp) \exp[-iKZ(\mathbf{R}_\perp)] \}.$$

Конечный шаг  $\Delta K$  приводит к ошибке АФР и, как следствие, к падению КНД, которое в соответствии [3, 4] и (5) равно

$$\frac{D_N}{D_0} \approx \{ 1 + [\Omega_z - K + (N-1)\Delta K]^2 \sigma_z^2 \}^{-1}, \quad (6)$$

где

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{\Sigma} \int_{-\infty}^{\infty} |Z(\mathbf{R}_\perp)|^2 d^2 \mathbf{R}_\perp.$$



Из условия  $D_N/D_0 \geq d_{\min}$  определяем шаг  $\Delta K = 2 \sqrt{\frac{d_{\min}^{-1} - 1}{\sigma_z^2}}$ .

На рис. 16 изображен КОП, реализующий алгоритм (5). Сигналы элементов АР (рис. 1а) управляют соответствующими каналами многоканального модулятора света в плоскости  $\Pi_1$ . КОП состоит из ряда соосных фурье-процессоров (по числу ступенек аппроксимации), на входах которых ( $\Pi_1, \Pi_2, \dots$ ) стоят транспаранты с записью соответствующих ступенек АФР, а на выходах ( $\Pi_1, \Pi_2, \dots$ ) — фильтры, осуществляющие невозмущенный перенос сфокусированных образов в заштрихованных областях ( $H_1, H_2, \dots$ ) на общий выход КОПа ( $\Pi_N$ ). В качестве таких фильтров можно, например, использовать фазовые транспаранты с прозрачностью  $\exp[-iR_0 K_{\perp}]$ , смещающие фурье-образы на  $\hat{m}^{-1}R_0$  относительно оси КОПа ( $\hat{m}$  — масштаб моделирования [3]).

Установим необходимое количество приближений  $N$ , при котором требования к КНД удовлетворяются во всей зоне обзора  $|K_{\perp}| \leq K_N = K \sin \theta_{\max}$  ( $\theta_{\max}$  — максимальный угол места). Из выражения для  $K_n$  (см. выше) получаем

$$N = \text{entier} \left[ \frac{K \sigma_z (1 - \cos \theta_{\max})}{2 \sqrt{d_{\min}^{-1} - 1}} + \frac{1}{2} \right], \quad (7)$$

где entier — целая часть числа.

Число  $N$ , определяющее сложность КОПа, ограничено.

Поскольку шаг  $\Delta K$  должен быть больше ширины ДН  $\Delta \Omega_X \approx 2\pi/\Delta X$  ( $\Delta X$  — размер АР), то  $\sigma_z < \sigma_{z_{\max}} = \frac{\Delta X}{\pi} \sqrt{d_{\min}^{-1} - 1}$ .

Отсюда, согласно (7)

$$N < N_{\max} = \text{entier} \left( \frac{\Delta X}{\Lambda} + \frac{1}{2} \right). \quad (8)$$

Величина  $\sigma_{z_{\max}}$  характеризует экстремальное среднеквадратичное значение отклонения неплоской поверхности АР от плоской, допускаемое данным методом. Полагая  $d_{\min} = 0,9$ , получаем  $\sigma_{z_{\max}} = 0,1 \Delta X$ , что превосходит возможности метода [5].

В сочетании с [2] рассмотренный метод позволяет расширить класс неплоских АР, позволяющих формировать веер остронаправленных ДН средствами когерентной оптики.

В заключение авторы выражают признательность Б. Е. Кинберу за дискуссию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Зарубежная радиоэлектроника, № 9, 69 (1977).
2. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Изв. вузов — Радиоэлектроника, 22, № 2, 25 (1979).
3. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Изв. вузов — Радиоэлектроника, 21, № 2, 74 (1978).
4. Д. И. Воскресенский, Л. И. Пономарев, В. С. Филиппов, Выпуклые сканирующие антенны, изд. Сов. радио, М, 1978.
5. Л. Д. Бахрах, В. А. Макеев, Радиотехника и радиоэлектроника, 18, № 4, 741 (1973).

PARALLEL PENCIL-BEAM RECEPTION BY CONFORMAL ANTENNA  
ARRAYS WITH COHERENT OPTICAL PROCESSING

*D. I. Voskresensky, A. Yu. Grinev, E. N. Voronin*

A coherent optical technique for beamforming of nonplanar receiver arrays is proposed and analysed. Limitations of technique are estimated. Relations are developed, which are useful for synthesis of coherent optical processors with given properties.

---