

УДК 621.396.677.8.001.5

ПЛОСКИЕ РАДИООПТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С РЕЖЕКЦИЕЙ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПРИХОДА

А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, В. С. Темченко

Рассмотрен спектральный метод формирования управляемых провалов в веере диаграмм направленности антенных решеток (АР) с когерентно-оптической обработкой в направлениях на источники помех. Исследована структура процессора и получены соотношения, позволяющие целенаправленно строить оптические процессоры радиооптических АР с режекцией мешающих сигналов по направлению прихода.

Под радиооптическими антенными решетками (РОАР) понимают приемные антенные решетки (АР) с формированием диаграмм направленности (ДН) методами когерентной (КО) оптики. Наряду с формированием характеристик направленности РОАР способны осуществлять и другие виды обработки [1, 2].

Подобные системы обладают рядом достоинств [2], в частности, реализуют параллельный обзор пространства сплошным веером ДН. При таком обзоре РОАР формирует одновременно образы всех источников радиоизлучения, расположенных в зоне обзора (зона обзора определяется парциальной ДН излучателей АР), включая источники помех, которые могут вызвать «ослепление» системы.

Для повышения помехозащищенности РОАР целесообразно формировать веер ДН, минимизированных в направлениях на источники помех (с идеально-нулевыми провалами). В системах с последовательным обзором пространства (в электрически сканирующих АР) указанная задача решается путем формирования необходимого амплитудно-фазового распределения (АФР) возбуждения элементов АР [3, 4]; подобный метод решения неприемлем для систем с параллельным обзором.

Ниже рассматривается спектральный метод формирования управляемых провалов в веере ДН РОАР, который не нарушает режим параллельного обзора и реализуем средствами оптики, что делает его особенно привлекательным для рассматриваемых систем. Изложение проводится в приближении непрерывного раскрыва (излучатели расположены непрерывно) с последующим обобщением на дискретную структуру раскрыва АР.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На выходе когерентного оптического процессора (КОП) плоской РОАР формируется следующий образ пространственного спектра источников радиоизлучения $s(\mathbf{k}_\perp)$ [5]:

$$e(\mathbf{k}'_\perp) = e_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int s(\mathbf{k}_\perp) F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) d^2 \mathbf{k}_\perp, \quad (1)$$

где e_0 — нормирующий коэффициент КОПа; \mathbf{k}_\perp , \mathbf{k}'_\perp — векторные пространственные частоты, соответствующие реальному радиообъекту

и его образу ($\mathbf{k}_\perp = \mathbf{n}_x K \sin \theta \cos \varphi + \mathbf{n}_y K \sin \theta \sin \varphi$), $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y$ — единичные орты, K — волновое число, θ, φ — угол места и азимут; $F(\mathbf{k}_\perp) = \hat{F}\{J(\mathbf{R}_\perp)\}$ — ДН АР ($\hat{F}\{\dots\}$ — оператор фурье-преобразования, $J(\mathbf{R}_\perp)$ — АФР возбуждения элемента АР в точке \mathbf{R}_\perp).

В выходной плоскости одновременно воспроизводятся образы всех источников радиоизлучения (включая помехи). Для повышения помехозащищенности РОАР вместо ДН веера (1) целесообразно формировать ДН F_n с провалами в направлениях (\mathbf{k}_q) на источники помех:

$$F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{ideal}} = F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) \prod_{q=1}^Q t(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) =$$

$$= F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) - \sum_{q=1}^Q p(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) F(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_\perp), \quad (2)$$

где Q — число помех,

$$t(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mathbf{k}_\perp \neq \mathbf{k}_q, \\ 0 & \text{при } \mathbf{k}_\perp = \mathbf{k}_q, \end{cases}$$

$$p(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) = 1 - t(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q).$$

РОАР была бы невосприимчива к излучению помехоносителей, если бы формировался веер типа (1) из ДН (2). Однако такой веер ДН нельзя получить при помощи прежнего алгоритма обработки (фурье-преобразования апертурного отклика [5]) в силу того, что ДН (2) вариантна сдвигу \mathbf{k}'_\perp (направлению фазирования), так как $F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp) \neq F_n(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp)$ (см. (2)).

В работе [6] показано, что в общем случае процесс формирования веера вариантных (неизопланарных) ДН описывается следующим интегральным оператором:

$$\hat{L}\{\dots\} = \int_{\Sigma} \int \dots j(\mathbf{R}_\perp, \mathbf{k}'_\perp) d^2 \mathbf{R}_\perp, \quad (3)$$

где $j(\mathbf{R}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)$ — АФР, соответствующее остронаправленному приему из направления \mathbf{k}'_\perp ; Σ — поверхность АР.

Оператор (3) (алгоритм обработки) при действии на сигналы, принимаемые элементами АР, формирует образ источников радиоизлучения типа (1), с ДН (2), если его АФР взято из решения задачи синтеза [3, 4], $j(\mathbf{R}_\perp, \mathbf{k}'_\perp) = j_n(\mathbf{R}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)$:

$$F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{ideal}} = \int_{\Sigma} \int j_n(\mathbf{R}_\perp, \mathbf{k}'_\perp) \exp(-i\mathbf{k}_\perp \mathbf{R}_\perp) d^2 \mathbf{R}_\perp. \quad (4)$$

Однако полученный таким образом алгоритм не всегда можно воспроизвести оптическими методами (например, предложенными в [6]), даже если реализуем первоначальный алгоритм (фурье-преобразование)

$$\hat{L}\{\dots\} = \hat{F}\{\dots J(\mathbf{R}_\perp)\}.$$

Обратимся к более конструктивному подходу.

2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД

Представление (2) позволяет трактовать «негативные экраны» $p(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q)$ как некие парциальные ДН АР, нормированные к единице

Реализация подобных (бесконечно узких) ДН решетками конечных размеров едва ли достижима [7], поэтому воспользуемся аппроксимацией вида $p(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) \propto F_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q)$, где F_0 — реализуемая нормированная ДН, определенная ниже. С учетом сделанного замечания вместо ДН (2) имеем

$$F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}} = F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) - \sum_{q=1}^Q F_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q)F(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_\perp). \quad (5)$$

Потребуем далее, чтобы реализуемая ДН (5), во-первых, совпала (имела «нулевые» провалы) с идеальной ДН (2) в точках \mathbf{k}_q и, во-вторых, имела минимальное среднеквадратичное отклонение δ^2 от идеальной в остальных точках.

Установим вид парциальной ДН F_0 , обеспечивающей последнее условие,

$$\begin{aligned} \delta^2 &= \iint_{|\mathbf{k}_\perp| < K} |F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{ideal}} - F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}|^2 d^2 \mathbf{k}_\perp \leq \\ &\leq 4\pi \sum_{q=1}^Q \frac{F^2(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_\perp)}{D(\mathbf{k}_q)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $D(\mathbf{k}_q) = 4\pi \iint_{|\mathbf{k}_\perp| < K} F_0^2(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) d^2 \mathbf{k}_\perp$ — КНД парциальной ДН F_0 . (Случай сверхнаправленной ДН не рассматривается.)

Как видим, ошибка (6) минимальна при максимальных $D(\mathbf{k}_q)$.

Проверим выполнение первого требования по наличию нуля в одной из точек провалов $\mathbf{k}_\perp = \mathbf{k}_p$:

$$F_n(\mathbf{k}_p, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{ideal}} - F_n(\mathbf{k}_p, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}} = \sum_{q \neq p}^Q F_0(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q)F(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_\perp). \quad (7)$$

Если $Q = 1$, то ошибка (6) тождественно равна нулю; при $Q \geq 2$ (7) отлична от нуля и составляет порядка уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН F_0 .

Убедимся в том, что первому требованию (достижение абсолютных нулей в направлениях \mathbf{k}_q) удовлетворяет ДН вида

$$F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}^{(N)} = F_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}^{(N-1)} - \sum_{q=1}^Q F_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q)F_n(\mathbf{k}_q, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}^{(N-1)}, \quad (8)$$

где N — целый индекс (при $N = 1$ (8) совпадает с (5)).

Действительно, реализуемая ДН (8) отличается от идеальной (2) в точке \mathbf{k}_p на величину

$$F_n(\mathbf{k}_p, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{ideal}} - F_n(\mathbf{k}_p, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}^{(N)} = \sum_{q \neq p}^Q F_0(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q)F_n(\mathbf{k}_q, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}}^{(N-1)}.$$

Если $N \leq Q$, то ошибка тождественно равна нулю, при $Q > N$ — отлична от нуля и составляет величину порядка (УБЛ) ^{N} .

Итак, выбирая $N = Q$, можно обеспечить формирование абсолютных нулей в направлениях на помехи. Если подавление до величины УБЛ удовлетворительно, то достаточно реализовать ДН (4). В противном случае необходимо использовать ДН с $N = 2, 3, \dots$ При этом будет обеспечиваться подавление помех до уровня (УБЛ)^{2, 3, \dots}.

3. ВЫВОД АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ

Положим для начала, что исходная ДН $F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp)$ (см. (1)) оптимальна по КНД:

$$F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) = F(0)F_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) \quad (9)$$

(ниже в разд. 6 будет дано обобщение на произвольный вид исходной ДН).

Решение интегрального уравнения типа (4) с левой частью вида (5), очевидно, есть

$$j_\pi(R_\perp, \mathbf{k}_\perp) = j(R_\perp, \mathbf{k}'_\perp) - \sum_{q=1}^Q j(R_\perp, \mathbf{k}_q) F_0(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q), \quad (10)$$

где

$$j(R_\perp, \mathbf{k}'_\perp) = J(R_\perp) \exp(i\mathbf{k}'_\perp R_\perp).$$

Заметим, что вид полученного решения совпадает по форме с аналогичными выражениями, полученными методом парциальных ДН [4, 7].

Можно убедиться, что решение уравнения (4) с левой частью вида (8) есть

$$j_\pi(R_\perp, \mathbf{k}'_\perp)^{(N)} = j_\pi(R_\perp, \mathbf{k}'_\perp)^{(N-1)} - \sum_{q=1}^Q j_\pi(R_\perp, \mathbf{k}_q)^{(N-1)} F_0(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q), \quad (11)$$

где $j_\pi(R_\perp, \mathbf{k}'_\perp)^I$ совпадает с (10).

Как видим, АФР (10) и (11), формирующие веер ДН с провалами в направлениях \mathbf{k}_q , выражаются через исходное АФР, формирующее веер ДН (1). Прямой подстановкой (10) и (11) в (3) с использованием фильтрующего свойства дельта-функции $\delta(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp)$ [8] получаем

$$\hat{L}_\pi\{\dots\}^I = \hat{L}\{\dots\} - \hat{I}\{\hat{L}\{\dots\} \sum_{q=1}^Q \delta(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q)\}; \quad (12)$$

$$\hat{L}_\pi\{\dots\}^{(N)} = \hat{L}_\pi\{\dots\}^{(N-1)} - \hat{I}\{\hat{L}_\pi\{\dots\}^{(N-1)} \sum_{q=1}^Q \delta(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q)\}, \quad (13)$$

где

$$\hat{I}\{\dots\} = \iint_S \dots F_0(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}'_\perp) d^2 \mathbf{k}_\perp^S \quad (14)$$

— ограниченно-воспроизводящий оператор [9], заданный на вспомогательной плоскости S («спектральной» плоскости $\mathbf{k}^S \in S$), а $\hat{L}\{\dots\} = \hat{F}\{\dots J(R_\perp)\}$.

При обработке сигналов АР по алгоритму (12) формируется веер ДН (5), а по алгоритму (13) — ДН (8).

4. К РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ КО-МЕТОДОМ

Отметим прежде то очевидное обстоятельство, что алгоритм (13) реализуем, если возможна реализация алгоритма (12). Выясним последнее.

Структурно алгоритм (12) содержит исходный алгоритм (3) — фурье-преобразование. Операция вычитания также осуществима опти-

чески, с помощью, например, полупрозрачного зеркала (рис. 1). Реализуемость оператора (14) вытекает из того обстоятельства, что этот оператор по форме совпадает с преобразованием свертки и может быть приведен к виду [8]

$$\hat{I}\{\dots\} = 4\pi^2 \hat{F}\{\hat{F}^{-1}\{\dots\} J_0(R_{\perp})\}, \quad (15)$$

где

$$J_0(R_{\perp}) = \hat{F}^{-1}\{F_0(k_{\perp})\} = \begin{cases} 1, & R_{\perp} \in \Sigma \\ 0, & R_{\perp} \text{ „не принадлежит“ } \Sigma \end{cases} \text{ — равномерное АФР,} \\ \Sigma \text{ — площадь раскрытия АР.}$$

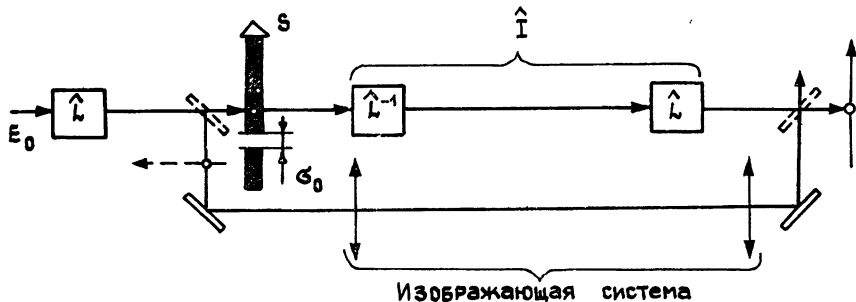


Рис. 1.

Таким образом, оператор (14) реализуется при помощи дифракционно-ограниченной изображающей системы (ДОИС) [9], состоящей из двух фурье-процессоров (линзы L_2 и L_3 на рис. 3), в плоскости Π_2 которой установлено окно, по форме совпадающее с ПВМС (пространственно-временным модулятором света).

В соответствии с (12) вспомогательное изображение, формируемое в спектральной плоскости S (рис. 1), должно быть взвешено «гребенкой» Дирака $\sum_{q=1}^Q \delta(k_{\perp}^S - k_q)$, которая физически нереализуема. Осуществим указанную операцию приближенно с помощью «негативных» транспарантов конечных размеров σ_0 (рис. 1):

$$\sigma_0 = \frac{\iint_S \rho(k_{\perp}^S) d^2 k_{\perp}^S}{\rho_0},$$

а

$$\rho(k_{\perp}^S - k_q) = \begin{cases} \rho_0 \leq 2, & k_{\perp}^S \in \sigma_0 \ni k_q \\ 0, & k_{\perp}^S \text{ „не принадлежит“ } \sigma_0 \end{cases} \quad (16)$$

— функция пропускания физически реализуемого пассивного «негативного» транспаранта.

Подставим (16) в оператор (12) вместо «гребенки» Дирака и учтем нормировку ограниченно-воспроизводящего оператора (14) (свойственную физически реализуемым операторам), чтобы не нарушить «удельный вес» каждого из слагаемых в (12):

$$\hat{L}_{\Pi}\{\dots\}^I_{\text{real}} = i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0 \hat{L}\{\dots\} - i_0^{-1} \hat{I}\{\hat{L}\{\dots\} \sum_{q=1}^Q \rho(k_{\perp}^S - k_q)\} = \quad (17)$$

$$= i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0 \left[\hat{L}\{\dots\} - \hat{I} \left\{ \hat{L}\{\dots\} \sum_{q=1}^Q \frac{\rho(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q)}{\rho_0 \sigma_0} \right\} \right] \approx i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0 \hat{L}_n\{\dots\}^1,$$

где $i_0 = 4\pi^2/\Sigma$ — норма оператора (14) [9].

Заметим, что величина i_0 равна площади главного лепестка ДН вида F_0 [7].

Рассуждая аналогично, для оператора (13) имеем

$$\hat{L}_n\{\dots\}_{\text{real}}^{(N)} \approx (i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0)^N \hat{L}_n\{\dots\}^{(N)}. \quad (18)$$

Итак, полученные алгоритмы (12), (13) можно приближенно реализовать (см. рис. 1) с точностью до безразмерного коэффициента $(i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0)^N$, причем это приближение тем точнее, чем уже пассивные транспаранты (16). Однако при этом неэффективно используется энергия лазера ($i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0 \rightarrow 0$). Кроме того, использование оптического вычитающего устройства также является недостатком данного процессора.

Учитывая, что для $\hat{L}\{\dots\} = \hat{F}\{\dots J(\mathbf{R}_\perp)\}$ [9]

$$\hat{I}\{\hat{L}\{\dots\}\} = i_0 \hat{L}\{\dots\},$$

операторы (17), (18) можно привести к виду

$$\hat{L}_n\{\dots\}_{\text{real}}^1 = i_0^{-1} \hat{I}\{\tau(\mathbf{k}_\perp^S) \hat{L}\{\dots\}\}, \quad (19)$$

где

$$\tau(\mathbf{k}_\perp^S) = \frac{\rho_0 \sigma_0}{i_0} - \sum_{q=1}^Q \rho(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) \quad (20)$$

— функция пропускания транспаранта в спектральной плоскости S ;

$$\hat{L}_n\{\dots\}_{\text{real}}^{(N)} = [i_0^{-1} \hat{I} \tau(\mathbf{k}_\perp^S)]^N \hat{L}\{\dots\}. \quad (21)$$

Алгоритмы (19), (21) в отличие от (17), (18) реализуемы более простыми процессорами (рис. 2а, б), где в спектральных плоскостях S установлены транспаранты (20), негативные по отношению к транс-

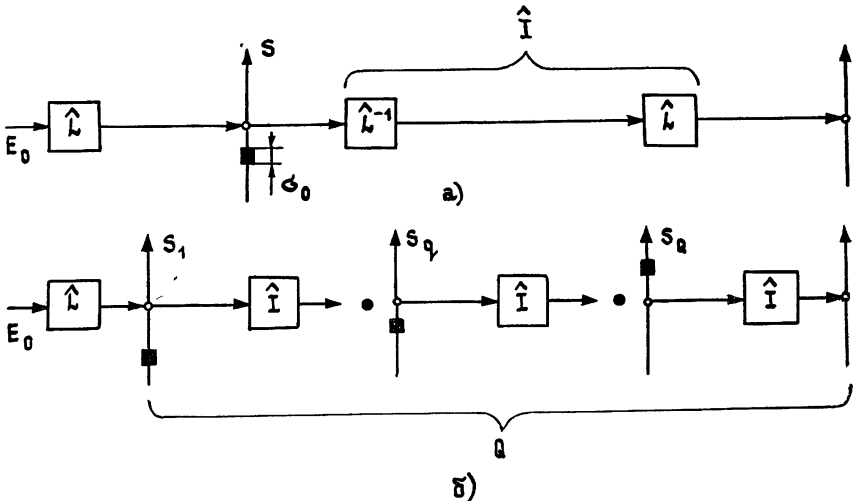


Рис. 2.

парантам на рис. 1. Детальный вид помехозащищенного процессора для случая прямоугольного раскрыва АР приведен на рис. 3.

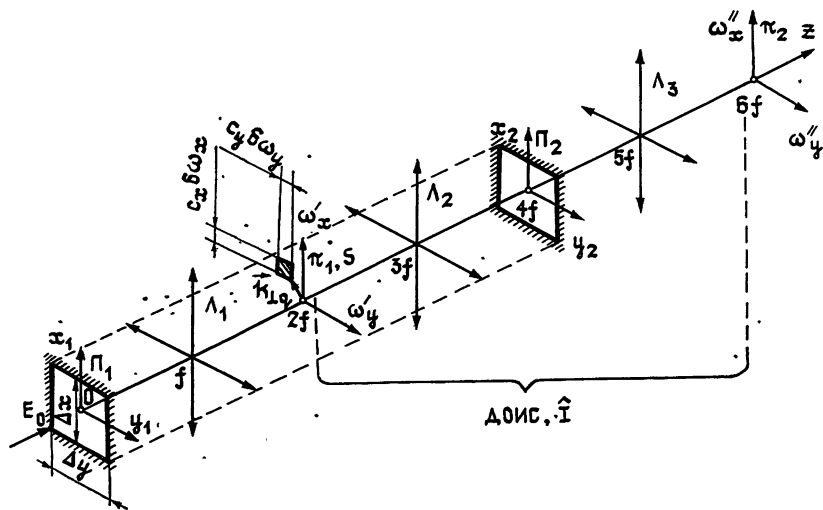


Рис. 3.

5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПАРАНТА И ОЦЕНКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ДН

Исследуем структуру транспаранта (20) с учетом его пассивности, т. е.

$$-1 \leq \tau(k_{\perp}^S) \leq 1.$$

Рассмотрим случай, когда $\sigma_0/i_0 = c_0 \ll 1$ («негативный» транспарант (16) много уже главного лепестка ДН АР в плоскости S). Тогда положим $\tau(k_q) = \frac{\rho_0 \sigma_0}{i_0} - \rho_0 = -1$, поскольку для повышения энергетической эффективности пассивного транспаранта необходимо использовать весь интервал возможных значений его функции пропускания.

В случае же $\frac{\sigma_0}{i_0} = c_0 \gg 1$ («негативный» транспарант (16) полностью закрывает главный лепесток ДН) полагаем, рассуждая аналогично, $\tau(k_{\perp}^S \notin \sigma_0) = \frac{\rho_0 \sigma_0}{i_0} = 1$. На рис. 4 пунктиром показано семейство транспарантов (20), где при $c_0 < 0,5$ верхняя огибающая семейства имеет вид $\tau = \frac{c_0}{1 - c_0}$, а нижняя при $c_0 \geq 0,5$ $\tau = 1 - 1/c_0$.

Из рис. 4 видно, что подсемейство транспарантов с параметром $c_0 \geq 0,5$ предпочтительнее подсемейства с $c_0 < 0,5$ как энергетически, так и с точки зрения его реализации (при $c_0 < 0,5$ вся плоскость S полужатемнена транспарантом $\tau = c_0/(1 - c_0)$). Очевидно, что в оптимальном с энергетической точки зрения случае $c_{opt} = 0,5$.

Из-за конечной ширины выбранного транспаранта ($c_0 = 0,5$) полученные выше приближения (17), (18) не выполняются, вследствие чего искажаются желаемые ДН (5), (8) («заплывают» нули в направлениях на помехи и искажается форма). Исследуем эти искажения при параметре $c_0 \neq 0$ и выясним способ их устранения, для чего разложим исходную нормированную ДН — F_0 , совпадающую в рассматриваемом случае с ядром ограниченно-воспроизводящего оператора (14), по функциям двойной ортогональности Ψ_n , порождаемым этим оператором [9]:

$$\frac{1}{i_0} \hat{I} \left\{ \frac{\rho(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q)}{\rho_0} \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) \right\} = \lambda_n(c_0) \Psi_n(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q),$$

где λ_n — собственные значения, i_0 — норма оператора (14) (см. (17)), а система собственных функций Ψ_n полна и ортогональна на всей плоскости S :

$$\iint_S \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) \Psi_m(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) d^2 \mathbf{k}_\perp^S = \begin{cases} 1, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases},$$

и конечной площадке:

$$\iint_{c_0} \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) \Psi_m(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) d^2 \mathbf{k}_\perp^S = \begin{cases} \lambda_n, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases}.$$

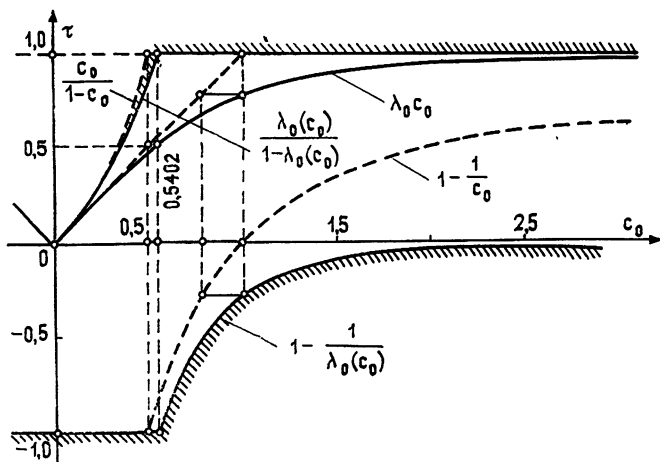


Рис. 4.

Упомянутое разложение с использованием отмеченных свойств функции Ψ_n имеет вид

$$F_0(\mathbf{K}_\perp^S - \mathbf{K}'_\perp) = i_0 \sum_{n=0}^{\infty} \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) \Psi_n(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q). \quad (22)$$

Подставляя (22) в (19) и заменяя $\hat{L}\{\dots\}$ на исходную ДН $F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp)$ (9), получаем выражение для искаженной ДН:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_n(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{k}'_\perp)_{\text{real}} &= i_0^{-1} \hat{I} \{ \tau(\mathbf{k}_\perp^S) F(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) \} \approx \\ &\approx i_0^{-1} \rho_0 \sigma_0 F(0) \left[F_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) - \frac{\lambda_0(c_0)}{c_0} i_0 \sum_{q=1}^Q \Psi_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) \Psi_0(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q) \right], \end{aligned} \quad (23)$$

где учтена асимптотика собственных значений [9]:

$$\lambda_0(c_0) \approx c_0 \gg \lambda_1 \approx c_0^3 \gg \dots \gg \lambda_n \approx c_0^{2n+1} \rightarrow 0 \text{ при } c_0 \rightarrow 0.$$

В пределе при $c_0 \rightarrow 0$ искаженная ДН (23) совпадает с (5), так как $\lambda_0 \rightarrow c_0$, а $\Psi_0 \rightarrow F_0$. Однако при конечном c_0 ДН (23) отлична от (5), причем $\tilde{F}_n(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_\perp) \neq 0$ даже при $Q = 1$ (одна помеха). Оценим глубину подавления помехи при $c_0 \neq 0$ и $Q = 1$ как отношение мощностей

помехи на выходе КОПа при наличии подавления ($\Pi_{\text{вых}}$) и без ($\Pi_{\text{вых}_0}$):

$$\frac{\Pi_{\text{вых}}}{\Pi_{\text{вых}_0}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{F}_n(\mathbf{k}_q, \mathbf{k}'_{\perp})|^2 d^2 \mathbf{k}'_{\perp} / |\tilde{F}_n(\mathbf{k}'_{\perp}, \mathbf{k}'_{\perp})|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F_0(\mathbf{k}_q - \mathbf{k}'_{\perp})|^2 d^2 \mathbf{k}'_{\perp}} \approx \approx \left[1 - \frac{\lambda_0(c_0)}{c_0} \right]^2, \quad (24)$$

где учтены свойства функций двойной ортогональности и то обстоятельство, что при $c_0 \leq 1$ $i_0 \Psi_0^2(0) \approx 1$ [9].

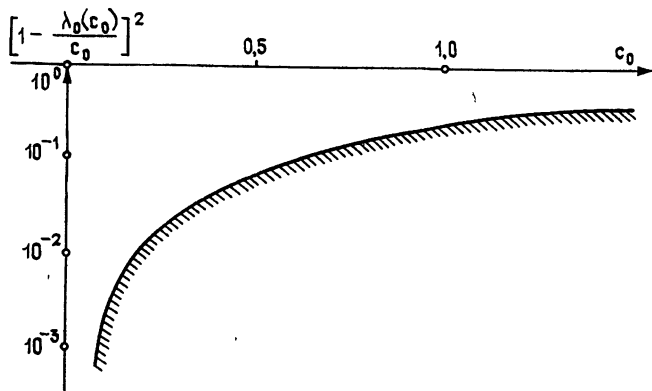


Рис. 5.

На рис. 5 представлена зависимость (24), рассчитанная для случая линейной АР (см. Приложение). Как видно, при конечном $c_0 \neq 0$ (в частности, при $c_0 = 0,5$) подавление помехи не полно и ухудшается с увеличением c_0 .

6. РЕАЛИЗАЦИЯ ДН С ИДЕАЛЬНЫМИ ПРОВАЛАМИ

Таким образом, налицо следующее противоречие. Для получения оптимальной в среднеквадратичном смысле ДН (5), имеющей идеальные нулевые провалы в направлениях на помехи, необходимо использовать бесконечно узкий транспарант (20) ($c_0 \rightarrow 0$), который, однако, энергетически не выгоден (см. выше), так как блокирует почти всю энергию лазера. С другой стороны, конечный транспарант энергетически выгоднее ($c_0 = 0,5$ — оптимальный случай), однако искажает ДН (5) — см. (23): искажает ее форму и ухудшает глубину «нулевых» провалов.

Предлагается следующий компромисс: используем транспарант конечной протяженности ($c_0 \neq 0$), однако вместо ДН (5) находим такую ДН, у которой сохраняются бесконечно глубокие провалы в требуемых направлениях. Для этого заменим оптимальную по КНД исходную ДН (F_0) на неоптимальную (но близкую к ней — см. ниже) вспомогательную ДН (Ψ_0), т. е. вместо (9) полагаем

$$F(\mathbf{k}_{\perp} - \mathbf{k}_{\perp}^S) = \frac{F(0)}{\Psi_0(0)} \Psi_0(\mathbf{k}_{\perp} - \mathbf{k}_{\perp}^S). \quad (25)$$

Разложим ДН (25) по собственным функциям оператора (14)

$$\Psi_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_\perp^S) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q), \quad (26)$$

где

$$b_n(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) = \int_S \int \Psi_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_\perp^S) \Psi_n(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q) d^2 \mathbf{k}_\perp^S,$$

причем

$$b_n(0) = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0 \\ 0 & \text{при } n \neq 0 \end{cases}.$$

Тогда по аналогии с (23) находим

$$\begin{aligned} \Psi_n(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) &= i_0^{-1} \hat{I} \left\{ \tau_\Psi(\mathbf{k}_\perp^S) \frac{F(0)}{\Psi_0(0)} \Psi_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_\perp^S) \right\} \approx \\ &\approx i_0^{-1} \frac{F(0)}{\Psi_0(0)} [\tau_0 \Psi_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}'_\perp) - \rho_0 \lambda_0 \sum_{q=1}^Q b_0(\mathbf{k}_\perp - \mathbf{k}_q) \Psi_0(\mathbf{k}'_\perp - \mathbf{k}_q)], \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\tau_\Psi(\mathbf{k}_\perp^S) = \tau_0 - \sum_{q=1}^Q \rho(\mathbf{k}_\perp^S - \mathbf{k}_q), \quad (28)$$

$\tau_0 \neq \frac{\rho_0 \sigma_0}{i_0}$ — подлежащий определению постоянный уровень пропускания транспаранта в плоскости S .

Необходимо, чтобы ДН (27) обращалась в нуль в направлении \mathbf{k}_q при $Q = 1$, откуда

$$\tau_0 - \rho_0 \lambda_0(c_0) = 0. \quad (29)$$

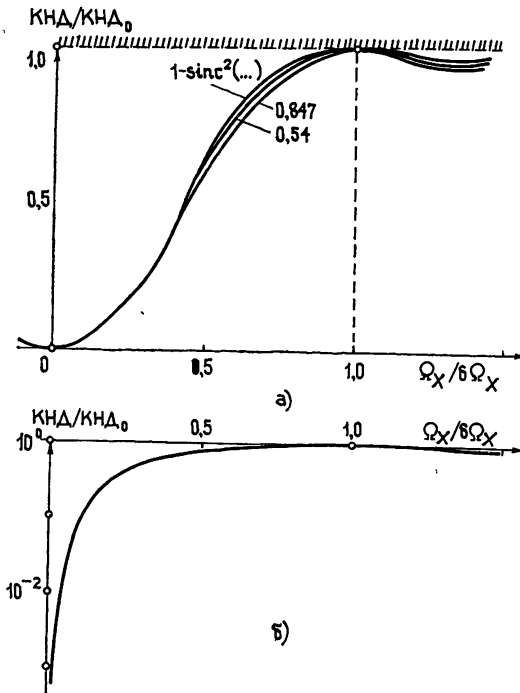


Рис. 6.

Проводя рассуждения аналогично разд. 5, с помощью (29) устанавливаем, что поставленному условию удовлетворяет семейство транспарантов (28) со следующими огибающими:

$$\tau_{\Psi} = \frac{\lambda_0(c_0)}{1 - \lambda_0(c_0)} \quad \text{при } c_0 < c_{\text{opt}},$$

$$\tau_{\Psi} = 1 - \frac{1}{\lambda_0(c_0)} \quad \text{при } c_0 \geq c_{\text{opt}},$$

где c_{opt} удовлетворяет трансцендентному уравнению $\lambda_0(c_{\text{opt}}) = 0,5$. Поскольку $\lambda_0(c_0)/c_0 > 1$ [9], то $c_{\text{opt}} > 0,5$, т. е. для формирования абсолютного провала необходим более широкий транспарант (см. разд. 5). На рис. 4 сплошными линиями показаны полученные огибающие для линейной АР (см. Приложение). Заметим, что при $c_0 \rightarrow 0$ $\tau_{\Psi} \rightarrow \tau$. Оценим глубину подавления помехи при $c_0 \neq 0$ и $Q = 1$ по относительному падению КНД (см. (24)):

$$\frac{П_{\text{вых}}}{П_{\text{выд}_0}} = \frac{\text{КНД}(k_{\perp} - k_q)}{\text{КНД}_0} \approx 1 - b_0^2(k_{\perp} - k_q), \quad (30)$$

функция b_0 определена в разложении (26). Из (30) и (26) следует, что при $k_{\perp} - k_q$ достигается идеальный провал. На рис. 6а, б представлена зависимость (30) в случае линейного раскрыва при $c_0 = 0; 0,54; 0,847$ (см. Приложение), где для сравнения показана кривая

$$\frac{\text{КНД}(k_{\perp} - k_q)}{\text{КНД}_0} = 1 - F_0^2(k_{\perp} - k_q), \quad (31)$$

соответствующая ДН (5).

7. ОБОБЩЕНИЕ НА СЛУЧАЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ИСХОДНОЙ ДН

На практике в качестве исходной не обязательно используют ДН (25). Укажем вид КО-процессора, позволяющего при произвольной исходной ДН формировать идеальные провалы в заданных направлениях.

Пусть исходный алгоритм обработки $\hat{L}_F\{\dots\} = \hat{F}\{\dots(\hat{J}_F R_{\perp})\}$ формирует веер требуемых ДН вида $F(k_{\perp}) = \hat{F}\{J_F(R)\}$.

Представим АФР J_F в виде

$$J_F(R_{\perp}) = J_{\Psi}(R_{\perp})J_F(R_{\perp})/J_{\Psi}(R_{\perp}),$$

где

$$J_{\Psi}(R_{\perp}) = \hat{F}^{-1}\{\Psi_0(k_{\perp})\}.$$

Тогда справедливо следующее представление:

$$\hat{L}_F\{\dots\} = \hat{I}_{F/\Psi}\{\hat{L}_{\Psi}\{\dots\}\}, \quad (32)$$

где $\hat{L}_{\Psi}\{\dots\} = \hat{F}\{\dots J_{\Psi}(R_{\perp})\}$ — оператор, формирующий веер вспомогательных ДН (25)!

$$\hat{I}_{F/\Psi}\{\dots\} = \hat{F}\{\hat{F}^{-1}\{\dots\}J_F(R_{\perp})/J_{\Psi}(R_{\perp})\}.$$

Для реализации оператора \hat{L}_{Ψ} необходимо поместить транспарант J_{Ψ}

в плоскость Π_1 фурье-КОПа (см. рис. 3). Операцию же $\hat{I}_{F\Psi}$ выполняет ДООС на рис. 3, в плоскости Π_2 которой установлен транспарант J_F/J_Ψ .

На рис. 7а, б изображены ДН (25) и соответствующие им АФР $J_\Psi(R_\perp)$, рассчитанные для линейной АР (см. Приложение).

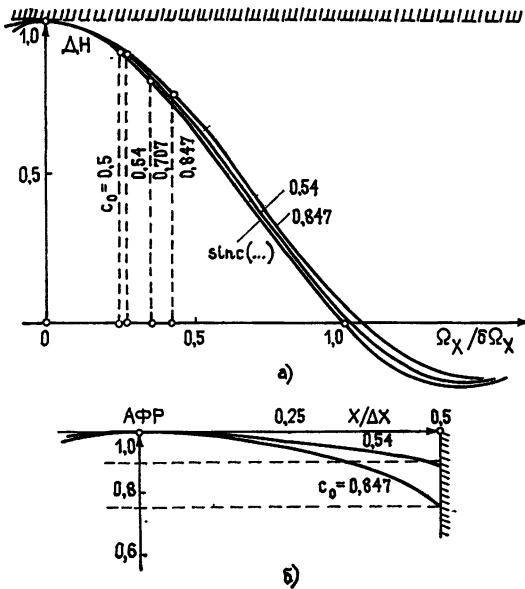


Рис. 7.

Проведенное рассмотрение можно обобщить на дискретные структуры, у которых ДН в общем случае отлична от ДН непрерывного раскрыва (у эквидистантной АР, например, она периодична в плоскости направляющих косинусов — плоскости π_1 на рис. 3).

Таким образом, рассмотренный метод и полученные соотношения позволяют целенаправленно строить КОПы плоских радиооптических антенных решеток с режекцией мешающих сигналов по направлению прихода.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В случае прямоугольного раскрыва (рис. 1) оператор (14) разделяется по переменным

$$\hat{I}\{\dots\}/i_0 = \hat{I}_X\{\dots\}\hat{I}_Y\{\dots\},$$

где

$$\hat{I}_{X,Y}\{\dots\} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots d\Omega_{X,Y} \operatorname{sinc}\left(\frac{\Omega'_{X,Y} - \Omega_{X,Y}}{\delta\Omega_{X,Y}}\right) / \delta\Omega_{X,Y},$$

$\Omega_{X,Y}$ — компоненты вектора \mathbf{k}_\perp [5], $\delta\Omega_{X,Y} = 2\pi/\Delta X, \Delta Y$ — полуширины ДН (по нулям).

В работах [9–11] рассмотрено решение следующего интегрального уравнения (соответствующего случаю линейного раскрыва):

$$\hat{I}\{\rho_X(\Omega'_X - \Omega_{X_0})\Psi_0^X(\Omega'_X)\} = \lambda_0^X(c_0^X)\Psi_0^X(\Omega_X),$$

где $\rho_X(\Omega_X) = \text{rect}(\Omega_X/\sigma_0^X)$, σ_0^X — одномерный вариант σ_0 (см. (16)),
 $c_0^X = \frac{\sigma_0^X}{\delta\Omega_X} = \frac{\sigma_0^X \Delta X}{2\pi} = \frac{2}{\pi} c$ (c — параметр, фигурирующий в [9]).

В [10, 11] показано, что собственная функция Ψ_0^X и собственное значение λ_0^X с оцениваемой точностью выражаются через функции Бесселя первого рода полуцелого индекса.

По известным функциям $\Psi_0^X(\Omega_X)$ и значениям λ_0^X можно определить собственные функции и значения интегрального оператора с разделяющимися переменными (в случае прямоугольного раскрыва) [8]:

$$\Psi_0(\mathbf{k}_\perp) = \Psi_0^X(\Omega_X)\Psi_0^Y(\Omega_Y),$$

$$\lambda_0(c_0) = \lambda_0^X(c_0^X)\lambda_0^Y(c_0^Y),$$

$$c_0 = c_0^X c_0^Y.$$

На рис. 3 в плоскости π_1 показан транспарант типа (28), размещенный в точке \mathbf{K}_\perp , размеры которого равны

$$\sigma_x^x = c_0^X \delta\omega_x, \quad \sigma_y^y = c_0^Y \delta\omega_y, \quad \left(\delta\omega_x = \frac{2\pi}{\Delta x}, \quad \delta\omega_y = \frac{2\pi}{\Delta y} \right).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Lambert, M. Arm, A. Aimette, in. Optical and electrooptical information processing, MIT, Press, 1966.
2. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Зарубежная радиоэлектроника, № 9, 69 (1977).
3. Ю. И. Абрамович, Б. Г. Данилов, Радиотехника и электроника, 23, № 2, 257 (1978).
4. О. А. Судаков, Труды РТИ АН СССР, вып. 27, 143 (1978).
5. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Изв. вузов — Радиоэлектроника, 21, № 2, 74 (1978).
6. А. Ю. Гринев, Е. Н. Воронин, Изв. вузов — Радиоэлектроника, 22, № 2, 25 (1979).
7. Б. М. Минкович, В. П. Яковлев, Теория синтеза антенн, изд. Сов. радио, М., 1969.
8. А. Папулис, Теория систем и преобразований в оптике, изд. Мир, М., 1971.
9. М. К. Размахнин, В. П. Яковлев, Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике, изд. Сов. радио, М., 1971.
10. М. С. Гуревич, Радиотехника и электроника, 1, № 3, 313 (1956).
11. М. К. Веневцев, Б. А. Хаджи, Радиотехника и электроника, 15, № 11, 2372 (1970).

Московский авиационный институт

Поступила в редакцию
1 июня 1979 г.

PLANAR RADIOOPTICAL ANTENNA ARRAYS WITH REJECTION OF JAMMING SIGNALS FROM GIVEN ARRIVAL DIRECTION

A. Yu. Grinev, E. N. Voronin, V. S. Temchenko

A spectral technique for forming of adaptive depressions in the pattern fan of antenna arrays with coherent-optical signal processing is discussed. Processor structure is investigated and relations are developed, allowing to construct optical processors of radiooptical antenna arrays with rejection of jamming signals.