

УДК 621.396.677.001.5

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИОННЫХ АНТЕНН

В. С. Рабинович

Предлагаются несколько алгоритмов случайного фазирования коммутационной антенны для уменьшения уровня паразитных лепестков в ее диаграмме направленности. На каждом излучателе антенны найден оптимальный закон распределения случайной фазы, осуществляющий в заданном классе функций максимальное подавление паразитных лепестков диаграммы направленности, усредненной по ансамблю реализаций. Определена зависимость среднего значения диаграммы направленности основного луча от вида названного распределения. Показано, что при большом числе излучателей случайные реализации диаграммы направленности практически не отличаются от ее среднего значения.

При конструировании фазиремых решеток в современной антенной технике используются фазовращатели, содержащие лишь дискретный набор фазовых состояний (как правило, M фиксированных положений, позволяющих изменять фазу скачками на $\Delta = 360/M$ градусов). При условии, что модуль фазовой ошибки, обусловленной дискретностью фазовращателей, в каждой точке антенного полотна выбирается минимальным, отклонение возможно реализуемого фазового распределения на каждом элементе решетки от необходимого для излучения в заданном направлении является периодической функцией непрерывной координаты раскрыва.

Как показано в работе [1], это приводит к появлению в диаграмме направленности специфических паразитных лепестков, достигающих значительной величины при больших дискретах Δ . Кроме того, в направлении главного лепестка диаграммы направленности мощность излучения или, что то же самое, кнд ортогональных решеток (см. [2]) падает до величины

$$(1) \quad P = P_0 \left(\frac{\sin(\Delta/2)}{\Delta/2} \right)^2,$$

P_0 — мощность излучения в направлении главного максимума исходной антенной решетки с непрерывными фазовращателями.

В последнее время исследуются фазовые распределения, уменьшающие уровень паразитных лепестков. Так в [3] для разрушения периодической фазовой ошибки в алгоритм фазирования антенной решетки предложено ввести элемент случайности. Предположив, что на n -м излучателе фаза принимает случайное значение с заданным функционально законом распределения, в [3] показано, что уровень паразитных лепестков в средней диаграмме направленности значительно снижается, правда, за счет некоторого уменьшения уровня основного максимума, а отдельные реализации, полученные методом Монте-Карло, практически не отличаются от средней диаграммы направленности для многоэлементных антенных решеток.

Мы обобщим результаты работы [3] для линейки, состоящей из N изотропных излучателей, рассмотрев несколько возможных законов распреде-

ления случайной фазы на каждом излучателе и определив зависимости глубины подавления амплитуды максимального паразитного лепестка и уровня основного луча от вида функции распределения фазового набега на n -м излучателе решетки.

Пусть, как и в [3], номинальная фаза на выходе n -го излучателя является случайной функцией

$$(2) \quad \bar{\varphi}_{n0} = -\varphi_{n0} + \xi_n.$$

Здесь $-\varphi_{n0} = -kd_n \sin \theta_0 = -kd_n u_0$ — фазовый набег на n -м излучателе, необходимый для отклонения максимума диаграммы направленности на угол θ_0 ; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; d_n — расстояние от начала координат до n -го излучателя; ξ_n — случайная величина, принимающая два возможных значения.

$$(3) \quad \xi_n = \psi_n = \varphi_{n0} - \Delta[\varphi_{n0}/\Delta]$$

(квадратные скобки означают взятие целой части числа) с вероятностью $P_1 = f(\psi_n)$ и

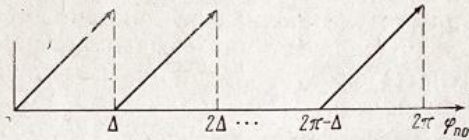


Рис. 1

$$\xi_n = -(\Delta - \psi_n)$$

с вероятностью $P_2 = 1 - f(\psi_n)$; $f(\psi_n)$ — некоторая функция фазовой ошибки.

Из формулы (3) видно, что ψ_n является периодической функцией фазового набега φ_{n0} с периодом $T_1 = \Delta$. Вид этой функции представлен на рис. 1. Заметим, что при замене расстояния d_n непрерывной координатой раскрыва x ψ_n заменяется на ψ_x и становится периодической функцией x с периодом $T_2 = \Delta/k \sin \theta_0$, т. е. T_1 и T_2 однозначно связаны друг с другом.

Определим теперь среднее значение диаграммы направленности по полю:

$$(4) \quad F(u, u_0) = \sum_{n=1}^N A_n e^{i(\varphi_n - \varphi_{n0})} \{e^{i\psi_n} f(\psi_n) + e^{-i(\Delta - \psi_n)} (1 - f(\psi_n))\};$$

A_n — амплитуда отдельного излучателя; $\varphi_n = kd_n \sin \theta = kd_n u$; θ — угол, отсчитываемый от нормали к линейке.

Предложим в качестве $f(\psi_n)$ функцию, удовлетворяющую следующим условиям в интервале $(0, \Delta)$:

$$(5) \quad f(\psi_n) \leq 1; f(\psi_n) = 1 - f(\Delta - \psi_n); f(0) = 1.$$

Из условия (5) следует, что $f(\Delta/2) = 1/2$. Теперь, используя периодичность функции ψ_n и условие (5), преобразуем выражение (4) к виду

$$(6) \quad F(u, u_0) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \bar{C}_m F(u - u_m),$$

где $F(u - u_m)$ — парциальная диаграмма направленности линейки излучателей с линейным фазовым и исходным амплитудным распределениями; $u_m = u_0(1 - (2\pi/\Delta)m)$ — координата максимума m -й парциальной диа-

граммы направленности;

$$(7) \quad \bar{C}_m = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} e^{i(x-m\omega x)} f(x) dx + \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} e^{-i(\Delta-x+m\omega x)} \times \\ \times \{1-f(x)\} dx = \frac{(-1)^m \sin(\Delta/2)}{(\Delta/2) - \pi m} + \\ + \frac{2}{\Delta} \sin \frac{\Delta}{2} \int_0^{\Delta/2} f(\Delta-x) \sin \left(x - m\omega x - \frac{\Delta}{2} \right) dx$$

— действительные коэффициенты, характеризующие амплитуду m -й парциальной диаграммы направленности; $\omega = 2\pi/\Delta$. Нетрудно заметить, что в формуле (7) первое слагаемое соответствует весовым коэффициентам, получающимся при обычном дискретном фазировании (см. [1]), а второе слагаемое существенно зависит от вида вероятностного распределения величины ψ_n .

Сузим класс распределений (5), предложив функции следующего вида:

$$(8) \quad f_1(\psi_n) = 1 - \frac{2^{\mu-1}}{\Delta^{\mu}} \psi_n^{\mu} \quad \left(0 \leq \psi_n \leq \frac{\Delta}{2} \right), \\ f_1(\psi_n) = \frac{2^{\mu-1}(\Delta - \psi_n)^{\mu}}{\Delta^{\mu}} \quad \left(\frac{\Delta}{2} \leq \psi_n \leq \Delta \right),$$

где $0 \leq \mu < \infty$. Очевидно, (8) удовлетворяет условиям (5). Семейство функций $f(\psi_n)$ для различных μ представлено на рис. 2. Распределение, рассмотренное в работе [3], соответствует $\mu = 1$. Подставив (8) в (7), получим

$$(9) \quad \bar{C}_m = \bar{C}_m(\mu) = \frac{(-1)^m \sin(\Delta/2)}{(\Delta/2) - \pi m} + \\ + \sin \frac{\Delta}{2} \int_0^{\Delta} x^{\mu} \sin \left(\frac{\Delta x}{2} - \pi m x - \frac{\Delta}{2} \right) dx.$$

Интеграл в (9) выражается элементарными функциями только при целых μ . Нетрудно заметить, что при $\mu = 0$

$$\bar{C}_m(0) = \sin \Delta / (\Delta - 2\pi m)$$

соответствует равновероятному распределению, а

$$\bar{C}_m(\infty) = (-1)^m \sin \frac{\Delta}{2} / \left(\frac{\Delta}{2} - \pi m \right)$$

— методу фазирования, рассмотренному в [1]. При $\mu = 1$ получаем

$$\bar{C}_m(1) = \left(\frac{\sin(\Delta/2)}{(\Delta/2) - \pi m} \right)^2$$

что совпадает с результатами работы [3].

Представляется интересным найти $\bar{C}_m(\mu)$ при непрерывном изменении параметра μ . Такие кривые, построенные при помощи ЭВМ для $\Delta = \pi/2$,

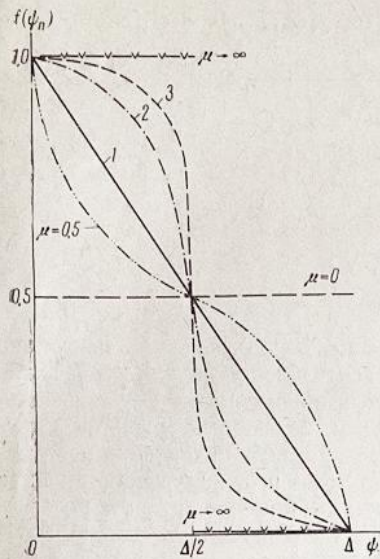


Рис. 2

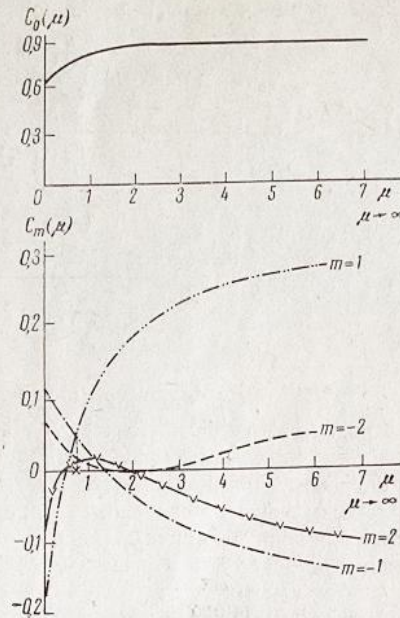


Рис. 3

приведены на рис. 3. Крестиком отмечено значение μ , соответствующее оптимальному (минимальному) уровню $\beta_\mu = \max \{|\bar{C}_m|\}_{m \neq 0}$.

Итак, при $\mu = 0,75$ $\beta_{0,75} = \bar{C}_1 = \bar{C}_{-1} \approx 0,05$.

Одной из наиболее важных практических зависимостей является функциональная связь между уровнем основного лепестка (кнд для ортогональных решеток) и глубиной подавления максимального паразитного лепестка. Соответствующий график показан на рис. 4. Здесь по оси абсцисс отложена величина

$$B_\mu = \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{C}_0(\mu)}{\bar{C}_0(\infty)} \right)^2 \right\} \cdot 100\%$$

— падение кнд, выраженное в процентах, а по оси ординат

$$A_\mu = 20 \lg \times \left\{ \frac{\beta_\mu}{\bar{C}_0(\mu)} / \frac{\bar{C}_1(\infty)}{\bar{C}_0(\infty)} \right\}$$

— относительный уровень максимального паразитного лепестка. Нетрудно заметить, что максимальная глубина подавления

$$A_{0,75} \approx -14,6 \text{ при } B_{0,75} \approx 22\%.$$

Можно показать, что при обычном дискретном фазировании средняя диаграмма направленности по мощности (с нормировкой по мощности, излученной в главном направлении) дается выражением

$$(10) \quad P_n(u, u_0) = |F_n(u, u_0)|^2 + \delta_n F(u, u_0).$$

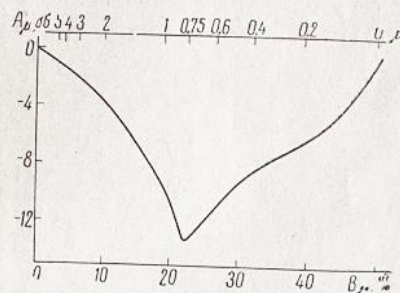


Рис. 4

Здесь дисперсия $\delta_N F(u, u_0)$ определяется следующим образом:

$$(11) \quad \delta_N = \frac{4 \sin^2(\Delta/2) \sum_{n=1}^N A_n^2 f(\psi_n) \{1 - f(\psi_n)\}}{|F(u, u_0)|^2} \simeq$$

$$\simeq \frac{\sin^2(\Delta/2)}{2} \frac{\sum_{n=1}^N A_n^2}{\left(\sum_{n=1}^N A_n\right)^2} \rightarrow 0 \quad \text{при } N \rightarrow \infty.$$

На основании полученных результатов необходимо сделать следующие выводы. Введение параметра μ в закон распределения случайной фазовой ошибки ψ_n позволяет выявить некоторые закономерности формирования диаграммы направленности многоэлементных антенных решеток с дискретными фазовращателями. Оптимальный алгоритм подавления дает малый уровень паразитных лепестков, но при этом и существенное падение кнд. Это обстоятельство может ограничить его применение в антенных решетках, в которых требуется незначительное снижение кнд. Однако, отойдя от оптимального алгоритма, можно получить хорошее подавление паразитных лепестков при небольшом падении уровня основного луча.

В заключение автор выражает благодарность В. В. Меркулову за внимание к работе и полезные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Долженков, Д. Б. Зимин, Радиотехника, 1968, 23, 7, 14.
2. В. В. Меркулов, Радиотехника и электроника, 1966, 11, 5, 928.
3. Ф. А. Аропов, Радиотехника и электроника, 1966, 11, 7, 1181.

Поступила в редакцию
5 XI 1970