

## СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУГЛОЙ СФОКУСИРОВАННОЙ АПЕРТУРЫ СО СПАДАЮЩИМ АМПЛИТУДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИ НАЛИЧИИ КВАЗИДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ ОШИБОК

Известно, что одним из эффективных способов снижения уровня боковых лепестков является уменьшение поля возбуждения на краю антенны. Результаты изучения направленных свойств антенн со спадающим амплитудным распределением (АР), описываемым различными функциями, широко представлены в литературе по детерминированной теории антенн. В статистической теории антенн этот вопрос изучен значительно слабее [1].

В данной работе изучаются характеристики сфокусированной в зону Френеля круглой апертуры со спадающим АР при наличии в антенне квазидетерминированных случайных фазовых (в дальнейшем квазидетерминированных) ошибок. Главное внимание при этом уделяется двум вопросам: а) усиливается или ослабевает воздействие квазидетерминированных ошибок на среднюю диаграмму направленности (ДН) по мощности при спадающем АР по сравнению с равномерным, б) в каком случае уменьшение поля возбуждения на краю антенны приводит к большим изменениям в ДН – при наличии квазидетерминированных ошибок или в их отсутствие.

### Исходные соотношения.

Антенна с круглой апертурой, имеет радиус  $R$ , центр её апертуры лежит в начале цилиндрической системы координат  $\rho, \varphi, z$  и она сфокусирована в точку с координатами  $\rho = 0, z = r$ . Напряженность электрического поля, создаваемого апертурой в точке  $P(\rho, \varphi, z)$ , находящейся на фокальной сфере, при наличии флуктуаций поля возбуждения определяется соотношением [2]:

$$\vec{E}(P) = V_0 e^{-ik\frac{\rho^2}{2r}} \int_S \vec{E}_0(Q) e^{i\Phi(\rho_1, \varphi_1)} e^{ik\frac{\rho_1 \rho}{r} \cos(\varphi - \varphi_1)} \rho_1 d\rho_1 d\varphi_1, \quad (1)$$

где  $V_0 = \frac{ik}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} (1 + \cos\theta)$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $\vec{E}_0(Q)$  – напряженность поля на апертуре в отсутствие ошибок;  $\Phi(\rho_1, \varphi_1)$  – случайная функция, описывающая флуктуации фазы;  $S$  – площадь апертуры. Введя безразмерную радиальную координату  $u = \rho_1 \delta / R$ , где  $\delta = R \sqrt{\frac{k}{r}}$ , и обобщенный угол  $\psi = kR \sin\theta$ , выражение для среднего значения квадрата напряженности поля на поверхности фокальной сферы можно записать следующим образом:

$$\overline{E^2}(\psi) = \frac{(1 + \cos\theta)^2}{16\pi^2} \iint_S E_0(Q) E_0^*(Q') \cdot \overline{\exp\{i[\Phi(u, \varphi_1) - \Phi(u', \varphi'_1)]\}} \times \\ \times \exp\left\{i\frac{\psi}{\delta} [u \cos(\varphi - \varphi_1) - u' \cos(\varphi - \varphi'_1)]\right\} ds ds', \quad (2)$$

где  $\overline{\phantom{x}}$  – черта означает знак усреднения;  $ds = u du d\varphi_1$ .

Будем считать, что поле в отсутствие ошибок линейно поляризовано, имеет фазу, равную нулю. Фазовые ошибки порождаются одним из трех взаимно независимых механизмов. В дальнейшем величины с индексами  $m = \overline{1,3}$  относятся к ситуациям, когда в антенне имеют место линейные, квадратичные или кубические квазидетерминированные случайные

фазовые ошибки. К появлению таких фазовых ошибок могут привести малые колебания синфазной антенны относительно своего номинального положения, смещения облучателя из фокуса и т.п. Известно, что квазидетерминированные случайные процессы – это случайные процессы, реализации которых описываются функциями заданного вида, содержащими один или несколько случайных параметров [3,4]. В упомянутых случаях роль такого параметра играет значение фазы на краю апертуры, а функциями заданного типа являются линейные, квадратичные или кубические функции.

Примем следующую статистику ошибок. Случайные функции  $\Phi_m(u, \varphi_1)$  подчиняются нормальному закону распределения, имеют нулевые средние значения, коэффициенты корреляции, равные единице, а дисперсии  $\alpha_m = \sigma_m^2$  зависят от радиальной координаты. Соответствующие стандартные отклонения равны:

$$\sigma_m(u, \varphi_1) = \sigma_{m, \max} f_m(u, \varphi_1), \quad m = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где

$$f_1(u, \varphi_1) = \frac{u}{\delta} \cos(\varphi_1 - \varphi_0); \quad f_2(u, \varphi_1) = \left(\frac{u}{\delta}\right)^2; \quad f_3(u, \varphi_1) = \left(\frac{u}{\delta}\right)^3 \cos^3(\varphi_1 - \varphi_0);$$

$\sigma_{m, \max}$  – максимальное значение стандартного отклонения при  $m$ -м механизме ( $m = \overline{1, 3}$ ); угол  $\varphi_0$  определяет направление, вдоль которого происходит регулярный рост фазы по линейному или кубическому законам со случайной величиной максимального значения её на краю апертуры. Будем полагать  $\varphi_0$  случайной величиной с равномерным законом распределения. Максимальное значение дисперсии на краю антенны  $\alpha_{m, \max}$  обозначим как  $\alpha_{m0}$ .

Амплитудное распределение поля возбуждения в отсутствие ошибок представим в виде разложения по четным степеням безразмерной радиальной координаты

$$E_0(\rho_1) = \sum_{p=0}^P e_p \left(\frac{\rho_1}{R}\right)^{2p} = \sum_{p=0}^P e_p \left(\frac{u}{\delta}\right)^{2p}. \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), для среднего квадрата поля получим:

$$\overline{E_m^2(\psi)} = \frac{1}{16} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\psi}{kR}\right)^2} \right]^2 \delta^4 \overline{F_m^2(\psi)}. \quad (4)$$

Поскольку выражение в квадратных скобках в (4) есть медленно меняющаяся функция от  $\psi$ , особенно для больших  $R$ , то можно считать, что  $\overline{F_m^2(\psi)}$  полностью определяют средние ДН по мощности сфокусированной апертуры. Они определяются соотношениями: Для  $m = 1, 3$

$$\overline{F_m^2(\psi)} = \left(\frac{2}{\psi}\right)^2 e^{-\alpha_{m0}} \sum_{n=0}^N (-1)^n \frac{\alpha_{m0}^n (2n)!}{2^{n(2m+1)} n!} \sum_{p,q=0}^P e_p e_q \sum_{l=0}^{2n} b_{nl} \sum_{k=0}^{E\left(\frac{ml}{2}\right)} W_k^{(m,1)}(\psi) W_k^{(m,2)}(\psi), \quad (6)$$

где

$$W_k^{(m,1)} = \frac{(mt + p - k)!(p + k)!^{k+p}}{(mt - k)!k!} \sum_{s=0}^{k+p} \frac{(-1)^s (mt - 2k + 2s + 1)}{(k + p - s)!(mt + p - k + s + 1)!} J_{mt-2k+2s+1}(\psi); \quad (7)$$

$$W_k^{(m,2)} = \frac{(mn + q - k)(mn + k + q - mt)!^{n(n-1)+k+q}}{(mn - k)!(mn + k - mt)!} \sum_{s=0}^{n(n-1)+k+q} \frac{(-1)^s (mt - 2k + 2s + 1)}{(mn + q - k + s + 1)!(mn + k + q - mt - s)!} \times J_{mt-2k+2s+1}(\psi); \quad (8)$$

$$b_{nt}^{(m)} = (-1)^t \frac{[m(2n-t)]!(mt)!}{(2n-t)!t!} \left[ 2 - \delta_{mt-2E\left(\frac{mt}{2}\right)} \right]. \quad (9)$$

Для  $m = 2$

$$\overline{F_2^2}(\psi) = \left(\frac{2}{\psi}\right)^2 e^{-\alpha_{2,0}} \sum_{n=0}^N (-1)^n \frac{\alpha_{2,0}^n (2n)!}{2^n n!} \sum_{p,q=0}^P e_p e_q \sum_{t=0}^{2n} (-1)^t W_t^{(2,1)}(\psi) W_t^{(2,2)}(\psi), \quad (10)$$

где

$$W_i^{(2,1)} = \frac{[(p+t)!]^2}{t!} \sum_{s=0}^{p+t} \frac{(-1)^s (2s+1)}{(p+t-s)!(p+t+s+1)!} J_{2s+1}(\psi); \quad (11)$$

$$W_i^{(2,2)} = \frac{[(2n+q-t)!]^2}{(2n-t)!} \sum_{s=0}^{q+2n-t} \frac{(-1)^s (2s+1)}{(2n+q-t-s)!(2n+q-t+s+1)!} J_{2s+1}(\psi), \quad (12)$$

где  $J_n(\psi)$  – функция Бесселя первого рода.

В дальнейшем будем полагать, что спадающее к краям антенны амплитудное распределение описывается функцией типа парабола на пьедестале. В этом случае в (6) – (12) верхний предел в суммах по  $p$  и  $q$  следует положить равным единице и  $e_0 = 1$ ,  $e_1 = \Delta - 1$ , где  $\Delta$  – высота пьедестала, то есть значение амплитуды поля возбуждения на краю апертуры.

При малых ошибках ( $\alpha \ll 1$ ) можно ограничиться членами первого порядка малости по  $\alpha_{m,0}$  и тогда выражение для средней ДН примет вид:

$$\overline{F_m^2}(\psi) = F^2(\psi) + \alpha_{m,0} \cdot f_m(\psi), \quad (13)$$

где  $F^2(\psi)$  – диаграмма направленности в отсутствие ошибок:

$$F^2(\psi) = F_0^2(\psi) \left[ 1 - \frac{1-\Delta}{2} \cdot \left( 1 - \frac{J_3(\psi)}{J_1(\psi)} \right) \right]^2, \quad (14)$$

а величина  $f_m(\psi)$  обусловлена наличием квазидетерминированных фазовых ошибок.

### Средние ДН по мощности

Рассчитанные по полученным соотношениям средние ДН по мощности для ряда значений дисперсии и высоты пьедестала в амплитудном распределении при наличии линейных, квадратичных и кубических квазидетерминированных ошибок фазы изображены на рис. 1-3 соответственно. Эти рисунки иллюстрируют характер влияния высоты пьедестала на

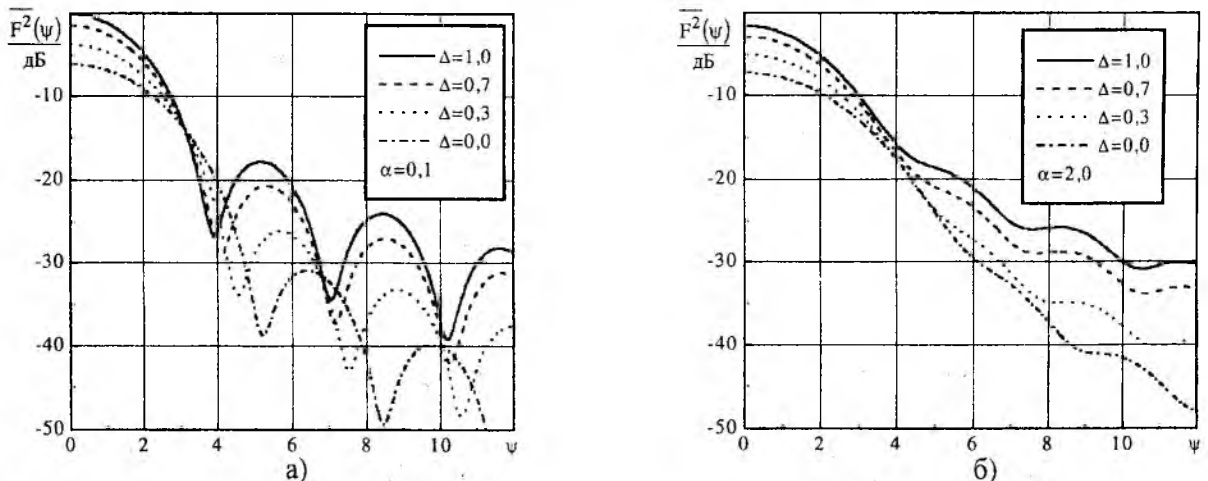


Рис. 1

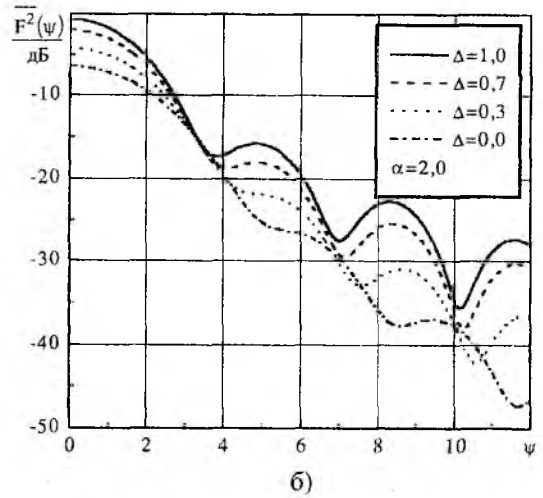
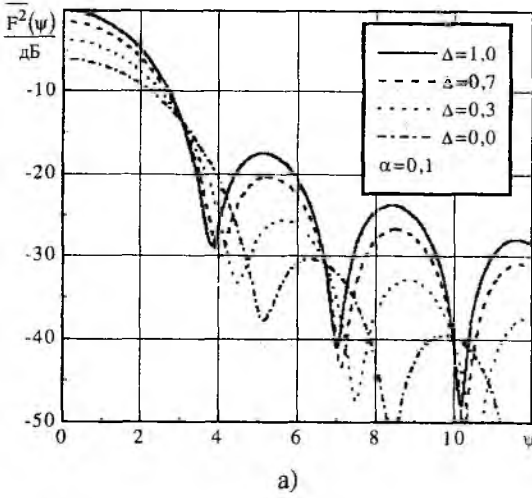


Рис. 2

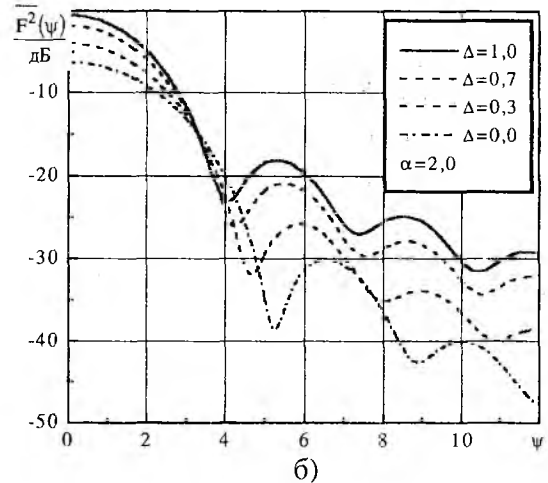
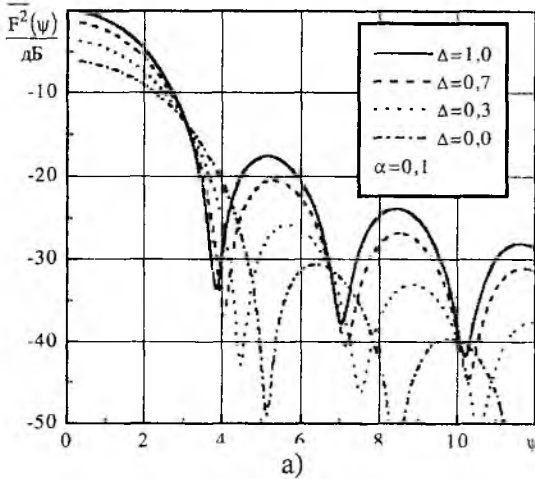


Рис. 3

среднюю ДН при различных величинах дисперсии. При всех видах квазидетерминированных фазовых ошибок уменьшение поля возбуждения на краю антенны приводит к уменьшению средней мощности, излучаемой в направлении главного максимума, к увеличению ширины главного лепестка средней ДН по мощности и снижению уровня боковых лепестков. Однако количественно указанные эффекты для ошибок различных типов проявляются по-разному и степень их проявления зависит от значения дисперсии ошибок.

### Уровень средней ДН по мощности в направлении главного максимума

Аналитическую оценку влияния квазидетерминированных фазовых ошибок в случае неравномерного АР на уровень средней мощности, излучаемой в направлении главного максимума, наиболее просто провести в случае малых ошибок.

При малых  $\alpha$  главные максимумы средней ДН по мощности описываются выражениями:

$$\overline{F^2}_{1,\max}(\Delta, \alpha) = \frac{(1+\Delta)^2}{4} \left\{ 1 - \alpha_{1,0} \frac{1}{(1+\Delta)^2} \left[ 1 - \frac{7}{6}(1-\Delta) + \frac{1}{3}(1-\Delta)^2 \right] \right\}, \quad (15)$$

$$\overline{F^2}_{2,\max}(\Delta, \alpha) = \frac{(1+\Delta)^2}{4} \left\{ 1 - \alpha_{2,0} \frac{1}{3(1+\Delta)^2} \left[ \Delta + \frac{1}{6}(1-\Delta)^2 \right] \right\}, \quad (16)$$

$$\overline{F^2}_{3,\max}(\Delta, \alpha) = \frac{(1+\Delta)^2}{4} \left\{ 1 - \alpha_{3,0} \frac{5}{16(1+\Delta)^2} \left[ 1 - \frac{13}{10}(1-\Delta) + \frac{2}{5}(1-\Delta)^2 \right] \right\} \quad (17)$$

для линейных, квадратичных и кубических квазидетерминированных фазовых ошибок соответственно. Тогда для значений главных максимумов, отнесенных к их величине в отсутствие ошибок для значений  $\Delta$ , равных нулю и единице, имеем:

$$\Delta = 1 \quad \frac{\overline{F^2}_{1,\max}(1, \alpha)}{F^2_{1,\max}(1, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{1,0}}{4}, \quad \frac{\overline{F^2}_{2,\max}(1, \alpha)}{F^2_{2,\max}(1, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{2,0}}{12}, \quad \frac{\overline{F^2}_{3,\max}(1, \alpha)}{F^2_{3,\max}(1, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{3,0} 5}{64}. \quad (18)$$

$$\Delta = 0 \quad \frac{\overline{F^2}_{1,\max}(0, \alpha)}{F^2_{1,\max}(0, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{1,0}}{6}, \quad \frac{\overline{F^2}_{2,\max}(0, \alpha)}{F^2_{2,\max}(0, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{2,0}}{18}, \quad \frac{\overline{F^2}_{3,\max}(0, \alpha)}{F^2_{3,\max}(0, 0)} = 1 - \frac{\alpha_{3,0}}{32}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что появление всех видов квазидетерминированных ошибок приводит к уменьшению уровня главного максимума средней ДН по мощности и чем больше  $\alpha$ , тем больше это уменьшение. Эта зависимость сохраняется при любом спадающем амплитудном распределении. При этом, чем меньше возбуждающее поле на краю антенны, тем ошибки рассматриваемого вида влияют слабее. Значение главного максимума в наибольшей степени снижается при линейных ошибках, в наименьшей – при кубических. Следовательно, при спадающем амплитудном распределении отрицательное воздействие ошибок на значение главного максимума средней ДН по мощности, приводящее к уменьшению его по сравнению со случаем отсутствия ошибок, слабее, чем при равномерном.

Для количественной оценки влияния высоты пьедестала  $\Delta$  на уровень главного максимума средней ДН при наличии фазовых квазидетерминированных ошибок достаточно рассмотреть соотношения для значений главных максимумов при  $\Delta = 0$ , отнесенных к их величине при равномерном амплитудном распределении ( $\Delta = 1$ ):

$$\frac{\overline{F^2}_{1,\max}(0, \alpha)}{F^2_{1,\max}(1, \alpha)} = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{\alpha_{1,0}}{12} \right), \quad \frac{\overline{F^2}_{2,\max}(0, \alpha)}{F^2_{2,\max}(1, \alpha)} = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{\alpha_{2,0}}{36} \right), \quad \frac{\overline{F^2}_{3,\max}(0, \alpha)}{F^2_{3,\max}(1, \alpha)} = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{3\alpha_{3,0}}{64} \right). \quad (20)$$

Видно, что и при наличии квазидетерминированных фазовых ошибок уменьшение  $\Delta$  приводит к снижению уровня главного максимума средней ДН по мощности. Однако, присутствие ошибок ослабляет указанное влияние  $\Delta$  и, чем больше  $\alpha$ , тем это ослабление больше. Максимальное уменьшение  $\overline{F^2}_{m,\max}$  за счет  $\Delta$  будет при  $\alpha = 0$ , то есть в отсутствие ошибок.

### Ширина средней диаграммы направленности

В отсутствие ошибок полуширина средней ДН по мощности на уровне 0,5 с учетом (14) может быть найдена из уравнения

$$\left( 2 \frac{J_1(\psi)}{\psi} \right)^2 \left[ 1 - \frac{1-\Delta}{2} \cdot \left( 1 - \frac{J_3(\psi)}{J_1(\psi)} \right) \right]^2 = 0,5. \quad (21)$$

Корень этого уравнения  $\psi_{0,5}^{(0)}$  есть функция  $\Delta$ . Величины  $\psi_{0,5}^{(0)}$  для ряда значений  $\Delta$  приведены в табл. 1, из которой следует, что с уменьшением пьедестала ширина ДН монотонно увеличивается.

Таблица 1

$\Delta$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\psi_{0,5}^{(0)}$	1,994	1,908	1,843	1,793	1,753	1,720	1,692	1,668	1,648	1,631	1,616

При малых  $\alpha$  с учетом (13) выражение для нормированной средней ДН приводится к виду:

$$\overline{F_{m,nor}^2}(\psi) = \frac{F^2(\psi) + \alpha_{m,0} \cdot f_m(\psi)}{F^2(0) + \alpha_{m,0} \cdot f_m(0)} \approx \frac{F^2(\psi)}{F^2(0)} + \alpha_{m,0} \left[ \frac{f_m(\psi)}{F^2(0)} - \frac{F^2(\psi) \cdot f_m(0)}{F^2(0)^2} \right]. \quad (22)$$

Полагая, что появление ошибок с  $\alpha \ll 1$  приводит к незначительному по сравнению с  $\psi_{0.5}^{(0)}$  увеличению полуширины ДН  $\Delta\psi$ , а также принимая во внимание симметрию ДН, для относительной ширины средней ДН на уровне 0,5 по мощности с точностью до величин первого порядка малости по  $\alpha$  можно получить следующее соотношение:

$$\frac{\psi_{0.5}^{(m)}}{\psi_{0.5}^{(0)}} = 1 + \alpha_{m,0} \frac{\psi_{0.5}^{(0)}}{16 J_2(\psi_{0.5}^{(0)}) J_1(\psi_{0.5}^{(0)})} \times \left[ \frac{2 f_m(\psi_{0.5}^{(0)}) - f_m(0)}{B(\psi_{0.5}^{(0)}) - \frac{F_0^2(\psi_{0.5}^{(0)}) \psi_{0.5}^{(0)} A(\psi_{0.5}^{(0)})}{8 J_2(\psi_{0.5}^{(0)}) J_1(\psi_{0.5}^{(0)})} \left[ \frac{(\Delta-1)^2}{2} \left( \frac{J_3(\psi_{0.5}^{(0)})}{J_1(\psi_{0.5}^{(0)})} - 1 \right) - (\Delta-1) \right]} \right], \quad (23)$$

где

$$A(\psi_{0.5}^{(0)}) = \frac{1}{J_1^2(\psi_{0.5}^{(0)})} \left\{ J_1(\psi_{0.5}^{(0)}) J_2(\psi_{0.5}^{(0)}) + J_2(\psi_{0.5}^{(0)}) J_3(\psi_{0.5}^{(0)}) - \frac{4}{\Psi_{0.5}^{(0)}} \cdot J_1(\psi_{0.5}^{(0)}) J_3(\psi_{0.5}^{(0)}) \right\};$$

$$B(\psi) = \frac{4 + (\Delta-1)^2}{4} + \frac{(\Delta-1)^2}{4} \cdot \left( \frac{J_3^2(\psi)}{J_1^2(\psi)} - \frac{2 \cdot J_3(\psi)}{J_1(\psi)} \right) + (\Delta-1) \cdot \left( 1 - \frac{J_3(\psi)}{J_1(\psi)} \right).$$

Формула (23) пригодна для расчета относительной ширины средней ДН по уровню 0,5 при дисперсиях  $\alpha_{m,0} \leq 2,0$ . Ошибка при этом не превышает 5 %. В случае больших  $\alpha$

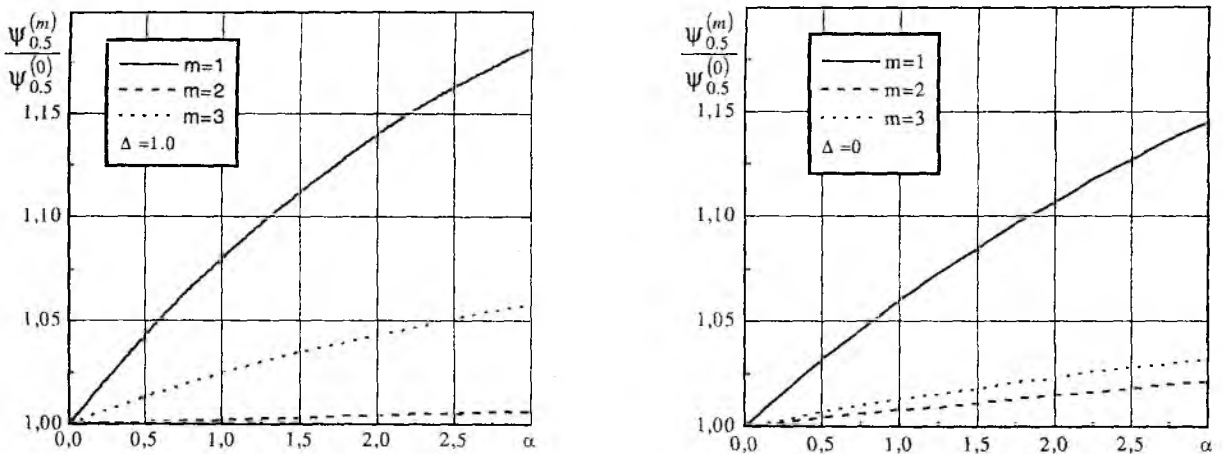


Рис. 4

расчеты нужно проводить на основании точных выражений для средней ДН (6) – (12). Результаты расчетов показаны на рис. 4а для  $\Delta = 1,0$  и рис. 4б для  $\Delta = 0$ . Из (28) и рис. 4 следует, что увеличение дисперсии квазидетерминированных ошибок приводит к расширению главного лепестка средней ДН по мощности при любой высоте пьедестала. Для линейных и кубических ошибок это расширение монотонно уменьшается с уменьшением поля на краю антенны. В случае квадратичных ошибок с уменьшением высоты пьедестала расширение увеличивается. Последнее означает, что при квадратичных ошибках их воздействие на ширину ДН увеличивается с уменьшением поля возбуждения на краю антенны.

### Экстремумы средней диаграммы направленности

Провести аналитическое исследование влияния неравномерности АР на экстремумы средней ДН при наличии фазовых ошибок затруднительно из-за сложности выражений для средней ДН. Поэтому исследования были проведены численно. Основное внимание при этом уделялось уровню боковых лепестков, ближайших к главному.

Для линейных и кубических квазидетерминированных ошибок степень влияния высоты пьедестала на уровень боковых лепестков практически не зависит от значения дисперсии  $\alpha$  и снижение УБЛ в количественном отношении почти такое же, как и в отсутствие ошибок (рис. 1, 3). При этом от значения  $\alpha_{1,0}$  не зависит также и сам уровень боковых лепестков, до тех пор пока они еще явно выражены.

В случае квадратичных ошибок влияние уменьшения  $\Delta$  на снижение УБЛ ослабевает с ростом дисперсии  $\alpha_{2,0}$ . Это хорошо видно из рис. 5, на котором приведены зависимости уровня первого бокового лепестка от высоты пьедестала при линейных квазидетерминированных ошибках. Так, если при  $\alpha_{2,0} = 0$  максимальное уменьшение уровня первого бокового лепестка равно  $-7$  дБ, то при  $\alpha_{2,0} = 2,0$  уже  $-4,7$  дБ.

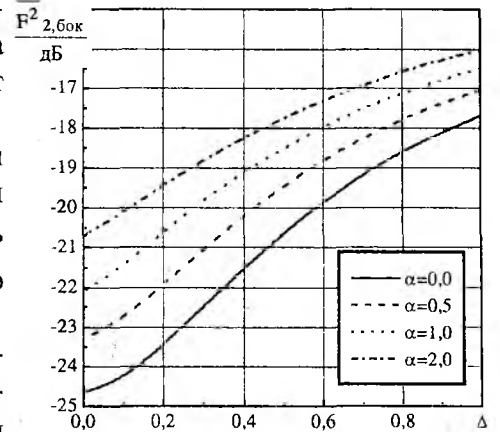


Рис. 5

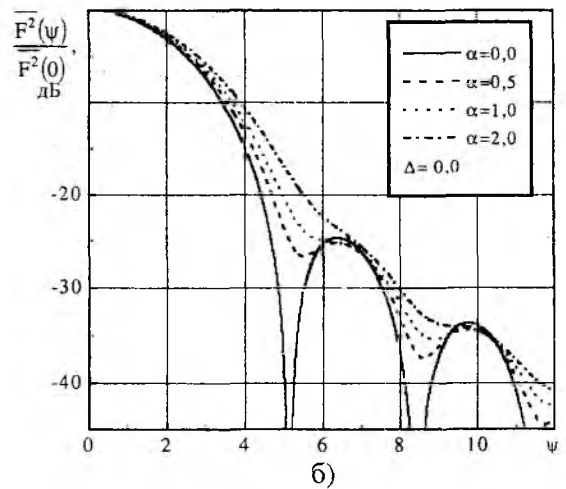
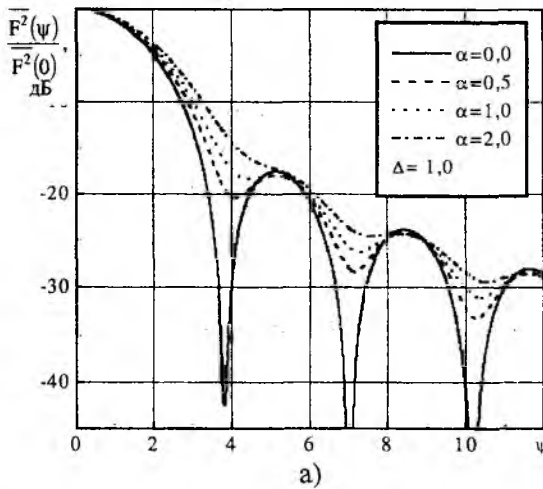


Рис. 6

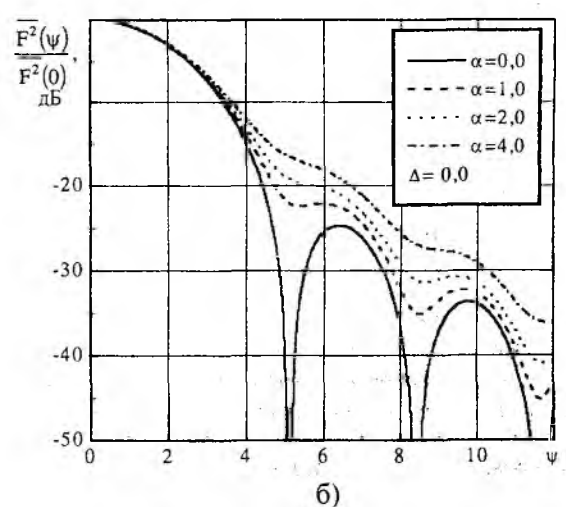
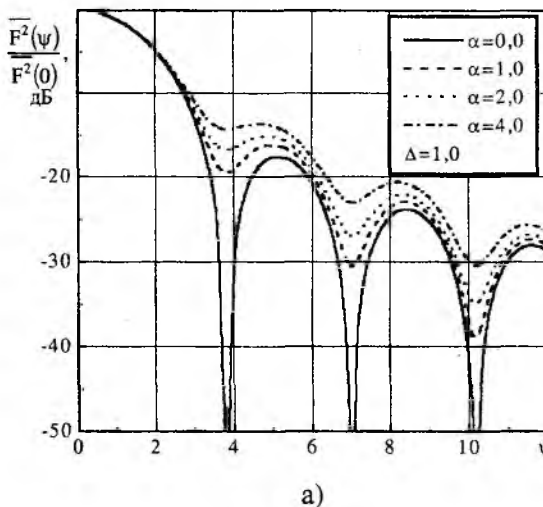


Рис. 7

При изучении изменений средней ДН в области боковых лепестков с ростом  $\alpha_{m,0}$  при фиксированном  $\Delta$  оказалось, что для ошибок различных типов эти изменения будут различными.

При линейных ошибках рост  $\alpha_{1,0}$  вначале ведёт к заполнению нулей ДН при практически неизменном уровне боковых лепестков, а затем к их исчезновению вообще, начиная последовательно с первого (рис. 6). Так при  $\alpha_{1,0} \approx 2,2$  исчезает первый, при  $\alpha_{1,0} \approx 2,5$  – второй и при  $\alpha_{1,0} \approx 2,75$  – третий боковой лепесток.

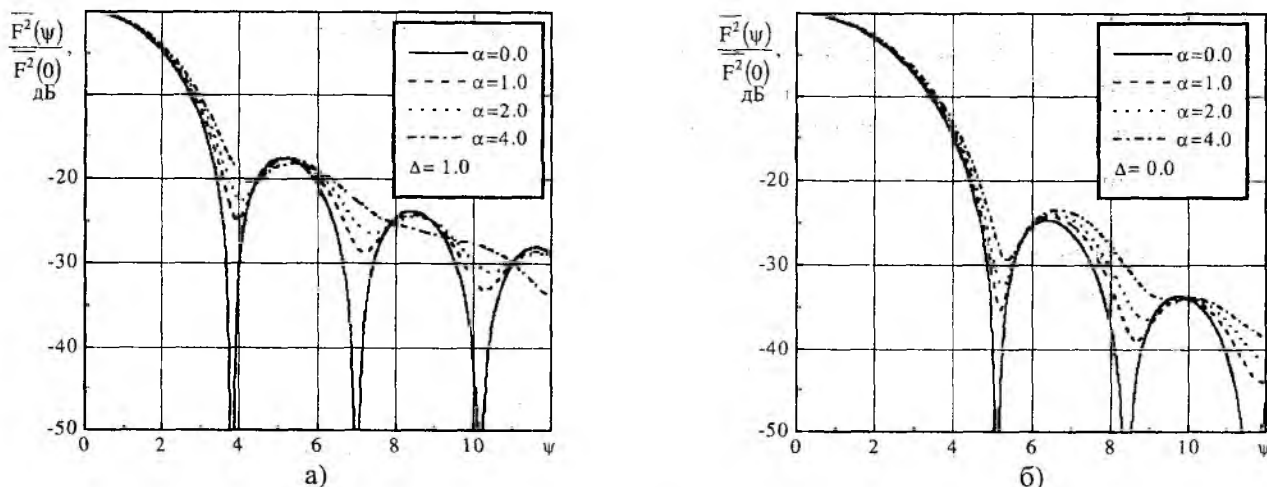


Рис. 8

В случае квадратичных ошибок увеличение  $\alpha_{2,0}$  одновременно с заполнением нулей приводит к росту уровня боковых лепестков и их почти одновременное исчезновение происходит при существенно больших (примерно в 2-3 раза) значениях дисперсии (рис. 7), чем при линейных ошибках. С уменьшением  $\Delta$  это «критическое» значение  $\alpha_{2,0}$  уменьшается, то есть для меньших  $\Delta$  боковые лепестки поглощаются при меньших значениях дисперсии. Так для  $\Delta = 1$  (рис. 7а) лепестковая структура ДН еще сохраняется даже при  $\alpha_{2,0} = 4,0$ , а для  $\Delta = 0,0$  (рис. 7б) она слабо выражена уже при  $\alpha_{2,0} = 2,0$  и полностью отсутствует при  $\alpha_{2,0} = 4,0$ . Следовательно, при спадающем распределении влияние квадратичных ошибок на уровень боковых лепестков сильнее, чем при равномерном.

При кубических ошибках с ростом  $\alpha_{3,0}$  одновременно с заполнением нулей наблюдается некоторый рост первого бокового лепестка, который становится более заметным с уменьшением  $\Delta$ , и затем происходит поглощение им второго и т.д. лепестков (рис. 8).

Таким образом при наличии квазидетерминированных фазовых ошибок использование спадающего АР остается эффективным средством снижения УБЛ средней ДН по мощности. Это касается в первую очередь случаев, когда имеются линейные или кубические ошибки и когда УБЛ снижается практически до той же величины, как и в их отсутствие. При квадратичных ошибках также имеет место снижение УБЛ по сравнению с равномерным АР, однако за счет ошибок это снижение на 2-3 дБ меньше по сравнению со случаем, когда они отсутствуют.

**Список литературы:** 1. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 383 с. 2. Silver S. Microwave Antenna Theory and Design. New-York.: McGraw-Hill Book Company, 1949. 312 с. 3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1966. 728 с. 4. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: / Пер.с англ. М.: Мир, 1989. 376 с.