

УДК 621.396.671

О ПОГРЕШНОСТЯХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, ВЫЗВАННЫХ ОШИБКАМИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СКАНИРОВАНИИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕНН

B. B. Арабаджи, Ю. И. Белов, А. И. Кнафель

Рассмотрено влияние нестабильностей аппаратуры измерительной установки на угловое распределение погрешности диаграммы направленности антенн при различных способах сканирования ближнего поля. Оценена также максимальная погрешность определения некоторых характеристик диаграммы направленности по критерию, основывающемуся на понятии «пересечение уровня» для стационарных потоков, при неточном задании координат измерительного зонда.

В связи с внедрением в технику антенных измерений амплифазометрического (радиоголографического) метода восстановления диаграммы направленности антенн по результатам измерения их поля в ближней зоне [1, 2] актуальным остается вопрос о погрешностях восстановления диаграммы направленности, которому посвящен ряд работ [1–6]. В них выяснялось влияние ограничения сектора сканирования, дискретности данных, амплитудно-фазовых ошибок в измерениях ближнего поля.

В настоящей работе в первой ее части рассмотрены погрешности определения некоторых характеристик диаграммы направленности (смещение направления главного максимума, уровень боковых лепестков, полуширина диаграммы) по критерию, основывающемуся на понятии «пересечение уровня» для стационарных потоков, при неточном задании координат измерительного зонда: определены максимальные оценки для гауссовой модели ошибок.

Во второй части рассмотрено влияние нестабильностей аппаратуры измерительной установки на угловое распределение погрешности диаграммы при различных способах сканирования ближнего поля.

1. Рассмотрим измерения тангенциальной составляющей ближнего поля E_τ на плоскости x, y , отстоящей от раскрыта антенны на расстоянии z_0 . Как известно, диаграмма направленности в этом случае связана с ближним полем с точностью до несущественных здесь коэффициентов через преобразование Фурье

$$f(\xi, \eta) = \frac{\exp(i k z_0 \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2})}{\lambda^2} \iint E_\tau(x, y) \exp[i k (\xi x + \eta y)] dx dy, \quad (1)$$

$\xi = \sin \theta \cos \varphi$, $\eta = \sin \theta \sin \varphi$, где θ, φ — координаты сферической системы, $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор.

Ошибки ближнего поля, обусловленные механизмом перемещения зонда по позиционеру, можно представить в следующем виде:

$$E(x, y) - E_0(x, y) = \frac{\partial E_0(x, y)}{\partial x} S_x(x, y) + \frac{\partial E_0(x, y)}{\partial y} S_y(x, y), \quad (2)$$

где x, y — координаты точки, в которой требуется измерить поле, а $x + S_x, y + S_y$ — фактические координаты точки измерения. Будем считать, что S_x, S_y — случайные нормально распределенные стационарные взаимонезависимые функции координат с нулевым средним. Рассмотрим сначала ошибки только по координате x , т. е. положим $S_y(x, y) = 0$, затем аналогично ошибки по координате y . Корреляционную функцию ошибок задаем в гауссовом виде:

$$K_x(x - x_1, y - y_1) = \Delta_x^2 \exp \left[-\frac{(x - x_1)^2}{a_x^2} - \frac{(y - y_1)^2}{a_y^2} \right],$$

где Δ_x^2 — дисперсия ошибки позиционера по координате x , a_x, a_y — радиусы корреляции по осям x, y этой ошибки. Тогда при сделанных предположениях относительно случайной функции S_x дисперсия диаграммы направленности σ_f^2 запишется в следующем виде:

$$\sigma_f^2 = \langle |f(\xi, \eta) - \langle f(\xi, \eta) \rangle|^2 \rangle = \frac{1}{\lambda^4} \int \int \int \int \frac{\partial E_0(x, y)}{\partial x} \frac{\partial E_0^*(x_1, y_1)}{\partial x_1} \times \\ \times K(x - x_1, y - y_1) \exp \{ik[\xi(x - x_1) + \eta(y - y_1)]\} dx dx_1 dy dy_1, \quad (3)$$

где $*$ — знак комплексного сопряжения, $\langle \rangle$ — знак усреднения, а $\langle f(\xi, \eta) \rangle$ полагаем равной $f_0(\xi, \eta)$ — диаграмме без ошибок.

Из соотношения (1) можно найти $\partial E_0 / \partial x$, используя обратное преобразование Фурье. Подставляя $\partial E_0 / \partial x$ в (3), получим

$$\sigma_f^2 = \frac{4\pi^2 \Delta_x^2 a_x a_y}{\lambda^4} \int \int |f_0(u, v)|^2 u^2 \exp(ikz_0 \sqrt{1 - u^2 - v^2}) \times \\ \times \exp \left[-\frac{ka_x^2}{4} (\xi - u)^2 - \frac{ka_y^2}{4} (\eta - v)^2 \right] du dv. \quad (4)$$

Оценка значения интеграла вне единичного квадрата по u и v дает величину $\leqslant 2\pi/(2kz)^2$, которая в условиях измерения обычно много меньше единицы. Таким образом, для дальнейшего изложения можно ограничиться интегрированием по единичному квадрату, кроме того, введем нормировку диаграммы направленности на ее максимальное значение $|f_{0 \max}|$. Будем считать, что $f_0(u, v) = f_1(u)f_2(v)$ — функция разделяющихся переменных, и условно представим дисперсию σ_f^2 в виде произведения двух функций $\sigma_f^2 = (\Delta_x^2/L_x^2) K_1^2(\xi) K_2^2(\eta)$, где

$$K_1^2(\xi) = \frac{2\pi^{3/2} a_x L_x^2}{\lambda^3} \int_{-1}^1 |f_1(u)|^2 u^2 \exp \left[-\frac{k^2 a_x^2}{4} (\xi - u)^2 \right] du; \quad (5)$$

$$K_2^2(\eta) = \frac{2\pi^{3/2} a_y}{\lambda} \int_{-1}^1 |f_2(v)|^2 \exp \left[-\frac{k^2 a_y^2}{4} (\eta - v)^2 \right] dv. \quad (6)$$

Рассмотрим равномерно и синфазно возбужденный прямоугольный раскрыв с размерами L_x и L_y , тогда

$$f_1(\xi) = \frac{\sin \pi L_x \xi / \lambda}{\pi L_x \xi / \lambda}, \quad f_2(\eta) = \frac{\sin \pi L_y \eta / \lambda}{\pi L_y \eta / \lambda}. \quad (7)$$

Подставим выражение для диаграммы (7) в формулы для дисперсий (5) и (6) и получим следующие выражения для предельных случаев:

$$\pi a_x \ll \lambda, K_1^2(\xi) \approx 2a_x/V\pi\lambda, \lambda \ll a_x \ll L_x, K_1^2(\xi) \approx 1/\pi, \quad (8)$$

$$a_x \gg L_x, K_1^2(\xi) \approx (2/\pi) \sin^2(\pi L_x / \lambda \xi);$$

$$\pi a_y \ll \lambda, K_2^2(\eta) \approx \frac{2\pi^{3/2} a_y}{L_y}, a_y \gg L_y, K_2^2(\eta) \approx \frac{2\pi \sin^2(\pi L_y \eta / \lambda)}{(\pi L_y \eta / \lambda)^2}. \quad (9)$$

Отметим, что из (4) для диаграммы вида (7), очевидно, следует

$$\max_{(a_x, a_y, \xi, \eta)} \sigma_f^2 \leq 4 (\Delta_x^2 / L_x^2).$$

На рис. 1 приведена зависимость σ_f^2 от радиусов корреляции a_x/λ , a_y/λ , размеров апертуры L_x, y при $\xi, \eta = 0$, полученная численным интегрированием (5) и (6) при условии (7). Отсюда видно, что $\sigma_f(\xi, \eta = 0) \leq 1,4 \Delta_x / L_x$.

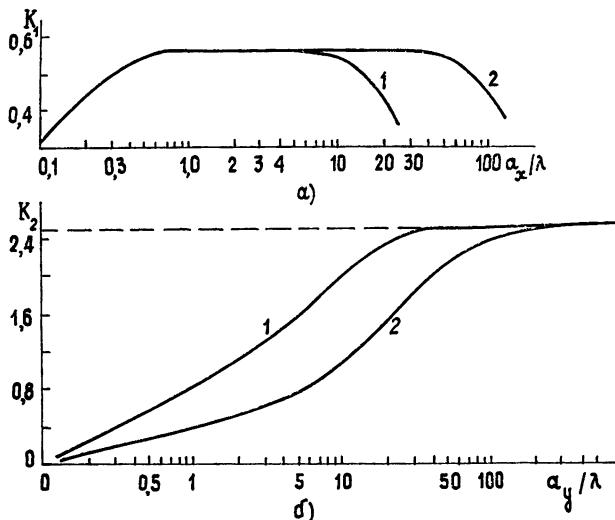


Рис. 1. Численный расчет зависимости K_1 и K_2 от соответствующих радиусов корреляции для разных значений L_x и L_y :
а) 1 — $L_x = 20$, 2 — $L_x = 100$; б) 1 — $L_y = 20$, 2 — $L_y = 100$.

Теперь рассмотрим общую методику определения погрешности некоторых характеристик диаграммы направленности. Будем считать, что сечение восстановленной диаграммы направленности $f(u)$ (где u — либо ξ , либо η) лежит в области $f_0(u) - n\sigma(u) < f(u) < f_0(u) + n\sigma$ для любых u с вероятностью P (n — некоторое число, $n \sim 2 \div 5$). Предположим также, что

1) ошибки восстановления сечения действительной диаграммы направленности вида (7) действительны, стационарны и распределены нормально;

2) функция корреляции их гауссова, с радиусом корреляции τ_u ;

3) вероятности выхода $|\delta f(u)|$ за уровень $n\sigma$ и $-n\sigma$ равны между собой и независимы (этому условию обязан квадрат правой части выражения (10), см. ниже);

4) можно воспользоваться следующей оценкой для τ_u по минимуму: $\tau_u = \min \{\lambda/L; \lambda/\pi a_x\}$. Кроме того, считая, что $\max a_x \sim L$, получаем оценку вида $\min \tau_u = \lambda/\pi L$.

При всех вышеозначенных условиях вероятность $P(|\delta f(u)| < n\sigma_f)$ можно оценить, используя работы [6, 7]:

$$P\left\{\left|\frac{\delta f(u)}{\sigma_f}\right| < \frac{2 \ln(2\pi L/\lambda) - \ln \sqrt{2} \pi + z}{[2 \ln(2\pi L/\lambda)]^{1/2}}\right\} \approx [\exp(-e^{-z})]^2, \quad (10)$$

где z определяет значение вероятности. Например, для $P = 0,9$ получим значения n в зависимости от L/λ , приведенные в табл. 1.

Таким образом, ошибки восстановления отдельного сечения диаграммы направленности с вероятностью 0,9 лежат в области $[-n\sigma_f; +n\sigma_f]$ (n см. в табл. 1).

Основываясь на (10), найдем максимальные ошибки в определении некоторых параметров диаграммы направленности, считая, что восстановленная диаграмма лежит в интервале $\pm n\sigma_f$, а идеальная диаграмма имеет вид (7).

1) Ошибка в определении направления главного максимума θ_{\max}^0 . Рассмотрим одно из главных сечений диаграммы направленности $\eta = 0$. Тогда нетрудно показать (см. рис. 2), что

$$\theta_{\max}^0 / \theta_{0,7} \approx 1,3 \sqrt{n\sigma_f(0)}, \quad (11)$$

где $\theta_{0,7}$ — ширина главного лепестка по уровню 0,7, т. е. максимальное смещение не превышает значения абсциссы точки пересечения ординаты $f_0 - n\sigma_f$ в точке $(0, 0)$ с функцией $f_0 + n\sigma_f$. Если $\sigma_f(0) = 1,4 \Delta x / L_x$ (см. выше), то

$$\theta_{\max}^0 / \theta_{0,7} = 1,5 \sqrt{n(\Delta_x / L_x)}. \quad (12)$$

2) Ошибка в определении ширины главного лепестка $\Delta\theta_{0,7}^{\max}$ по уровню 0,7:

$$\frac{\Delta\theta_{0,7}^{\max}}{\theta_{0,7}} = 2,8 n\sigma_f(0) = 4n \frac{\Delta_x}{L_x}. \quad (13)$$

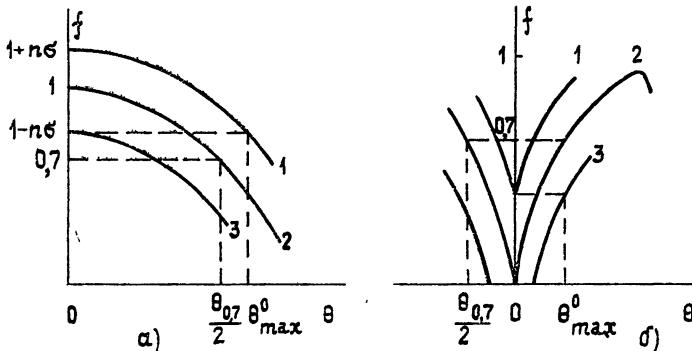


Рис 2 К определению максимальных ошибок для суммарной и разностной диаграмм направленности:

a) 1 — $f_0 + n\sigma_f$, 2 — f_0 , 3 — $f_0 - n\sigma_f$; б) 1 — $f_0^0 + n\sigma$, 2 — f_0^0 , 3 — $f_0^0 - n\sigma$.

3) Ошибка в определении уровня k -го бокового лепестка Δf_k : $\Delta f_k / f_k = n\sigma_f / f_k$. Подставляя $\sigma_f = 2\Delta_x / L_x$ (см. выше), получим

$$\frac{\Delta f_k}{f_k} = 2n \frac{\Delta_x}{L_x} \frac{1}{f_k}. \quad (14)$$

Так же рассмотрим ошибки восстановлений для разностной диаграммы, т. е. при следующем виде возбуждения раскрыва $G(x, y)$, с размерами $L_x \times L_y$:

$$G(x, y) = \begin{cases} -1, & -(L_x/2) \leq x \leq 0 \\ 1, & 0 < x \leq L_x/2 \end{cases}. \quad (15)$$

В этом случае нормированная диаграмма имеет вид

$$f_0^p(\xi, \eta) = A \frac{\sin^2 \pi L_x \xi / 2\lambda}{\pi L_x \xi / 2\lambda} \frac{\sin \pi L_y \eta / 2\lambda}{\pi L_y \eta / 2\lambda} \quad (16)$$

(A — нормировочный множитель $\approx 1,38$).

Подставив (16) в выражение для дисперсии (5) и (6), можно показать, что

$$\sigma_{f^p}(\xi, \eta) \leq 5,5 (\Delta_x / L_x), \quad (17)$$

а численное интегрирование уточняет оценку (17) в точке $\xi = \eta = 0$:

$$\sigma_{f^p}(0) \leq 3,4 (\Delta_x / L_x). \quad (18)$$

Как и для возбуждения в виде (8), найдем максимальные ошибки определения характеристик диаграммы направленности, считая, что

$$f_0^p - n\sigma_{f^p} < f^p < f_0^p + n\sigma_{f^p}.$$

1) Ошибка в определении направления минимума диаграммы направленности θ_{\max}^0 :

$$\theta_{\max}^0 / \theta_{0,7} \approx 1,5 n\sigma_{f^p}(0). \quad (19)$$

Для оценок, сделанных выше, $\theta_{\max}^0 / \theta_{0,7} \approx 5,2 n (\Delta_x / L_x)$, где $\theta_{0,7}$ — ширина диаграммы по уровню 0,7.

2) Ошибка в определении ширины по уровню 0,7 — $\Delta\theta_{0,7}$ —

$$\Delta\theta_{0,7} / \theta_{0,7} \approx 2,4 n\sigma_{f^p}(0) \quad (20)$$

или для оценок, сделанных выше,

$$\Delta\theta_{0,7} / \theta_{0,7} \approx 8,4 n (\Delta_x / L_x).$$

Для ошибок позиционера по координате y с дисперсией Δ_y^2 вместо σ_f предлагается иметь в виде $\tilde{\sigma}_f = \sqrt{\sigma_{fx}^2 + \sigma_{fy}^2}$, а в выражениях (12) — (14) и (17) — (20) Δ_x / L_x заменить на $\sqrt{\Delta_x^2 / L_x^2 + \Delta_y^2 / L_y^2}$, где Δ_y — дисперсия ошибок позиционера по координате y , а L_y — размер раскрыва по этой же координате.

Следует отметить, что при представлении ближнего поля в виде (2) предполагалось, что ошибки позиционера S_x и S_y малы. Учет вторых членов в разложении ближнего поля в ряд дает следующее выражение для дисперсии диаграммы направленности $\tilde{\sigma}_f^2$: $\tilde{\sigma}_f^2 \sim \sigma_f^2 \left[1 + c \left(\frac{\Delta_x^2}{\lambda^2} \right) \right]$, где $c \sim 1$. Таким образом, разложение (2) и последующие выкладки справедливы при $\Delta_x, \Delta_y \ll \lambda$.

2. Ниже рассмотрим влияние нестабильностей аппаратуры измерительной установки на распределение погрешности восстановленной по измеренному ближнему полю диаграммы направленности (ДН) при

различных способах его сканирования. Точность восстановления будем характеризовать несколько иным образом, чем в п. 1:

δ^2 — относительная погрешность ДН,

s — относительное смещение статистической оценки ДН,

$$\delta^2 = \frac{\langle |f|^2 \rangle}{\langle f \rangle^2} - 1, \quad s = \left| 1 - \frac{f_0}{\langle f \rangle} \right| \quad (21)$$

(скобки $\langle \rangle$ означают статистическое усреднение).

В измерительной установке временными изменениям подвержены многие параметры: геометрические размеры установки, амплитудно-фазовые свойства усилителей, электрическая длина кабелей. В конечном же счете эти флуктуации можно свести к нестабильности одного параметра — комплексного коэффициента передачи установки $\Phi(t)$. Таким образом, когда мы сканируем ближнее поле по линии $x = x(t)$, $y = y(t)$, на выходе амплифазометра получаем сигнал вида $U(x(t), y(t))\Phi(t)$, где $U(x, y)$ — истинное значение ближнего поля, t — время, а $\Phi(t)$ оказывается развернутым на плоскости x, y способом, зависящим от вида сканирования, и входит в выражение для диаграммы направленности (1) как мультиплексивная помеха.

Для решения задач, в которых требуется определить диаграмму направленности, создаваемую кусочно-линейным источником со случайнym распределением амплитуд и фаз токов, представляется удобной следующая методика. Случайный процесс $\Phi(t)$ на отрезке, равном времени измерений

$$\bar{\Phi}(t) = \begin{cases} \Phi(t), & t \in [0, T] \\ 0, & t \text{ не принадлежит } [0, T] \end{cases}, \quad (22)$$

разлагаем в интеграл Фурье. Определив ДН раскрыва в дальней зоне для каждой синусоиды спектра $\Phi(t)$, развернутой по поверхности сканирования, и учитя спектрально-корреляционные свойства процесса $\Phi(t)$, мы можем получить интересующие нас статистические характеристики полной ДН. При этом линию сканирования считаем бесконечной. Описанная методика позволяет вычислить выражения для величин s и δ при конкретных видах сканирования по прямоугольному раству и квадратной спирали.

В более простом для вычислений случае сканирования ближнего поля вида $U(x, y) = X(x)Y(y)$ по прямоугольному раству получаем

$$\delta^2(\eta) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} K_{\bar{\Phi}}(t, t') Y(v_y t) Y(v_y t') \exp[ikv_y(t-t')\eta] dt dt'}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \bar{\Phi}(t) \rangle Y(v_y t) \exp(ikv_y t \eta) dt \right|^2}; \quad (23)$$

$$s(\eta) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (\langle \bar{\Phi}(t) \rangle - 1) \exp(ikv_y t \eta) Y(v_y t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \langle \bar{\Phi}(t) \rangle Y(v_y t) \exp(ikv_y t \eta) dt} \right|, \quad (24)$$

v_y — средняя скорость зонда по оси y .

Качественным результатом для прямоугольного растра является тот факт, что относительные характеристики ДН s и δ^2 изменяются только в направлении, перпендикулярном строкам растра.

В эксперименте процесс $\Phi(t)$, как правило, представляет собой быстрые осцилляции на фоне медленного дрейфа параметров. Поэтому в качестве модели $\Phi(t)$ возьмем следующее выражение:

$$\Phi(t) = \xi(t) + \zeta(t), \quad (25)$$

где $\xi(t)$ соответствует быстрым флуктуациям, вызванным вибрацией аппаратуры, а $\zeta(t)$ описывает медленный дрейф параметров, например, под действием температурных изменений. Предположим, что $\langle\xi\xi\rangle = \langle\xi\rangle\langle\xi\rangle$; $\xi(t)$ — стационарный случайный процесс с $\langle\xi\rangle = 0$ и радиусом корреляции, много меньшим длительности строки; $\zeta(t) = \exp[(a + ib)t]$ — нестационарный случайный процесс, причем a, b — нормальные действительные случайные величины (a описывает амплитудный дрейф, а b — фазовый) с дисперсиями σ_a^2, σ_b^2 и средними значениями $\langle a \rangle = \langle b \rangle = 0$. Приняв, кроме того, что $(\sigma_a^2 + \sigma_b^2) T^2 \ll 1$ и $\langle ab \rangle = \langle a \rangle \langle b \rangle$, получим следующие статистические характеристики процесса:

$$\begin{aligned} K_\Phi(t, t') &\approx K_\xi(t - t') + (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) tt', \\ \langle\Phi(t)\rangle &\approx 1 + \frac{1}{2}(\sigma_a^2 - \sigma_b^2)t^2, \quad t, t' \in [0, T]. \end{aligned} \quad (26)$$

Для случая $\Phi(t) = \xi(t)$ выражения (23) и (24) в спектральном представлении упрощаются:

$$\delta^2(\eta) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S_\Phi(\omega) |f_\eta[(\omega/kv_y) - \eta]|^2 d\omega}{|f_\eta(\eta)|^2}, \quad s^2(\eta) = 0 \quad (27)$$

($S_\Phi(\omega)$ — спектральная плотность мощности процесса $\Phi(t)$, $f_\eta(\eta)$ — множитель ДН, зависящий от η). Из (27) видно, что стационарная компонента $\xi(t)$ дает постоянный вклад в дисперсию ДН и нулевой вклад в смещение статистической оценки ДН. Поэтому в дальнейшем ее рассматривать не будем и положим $\Phi(t) = \zeta(t)$.

Для выбранной нами модели флуктуаций в виде линейных уходов сканирование следует проводить по такой методике:

- 1) калибровка установки в момент, когда $y = 0$,
- 2) прохождение верхней половины области сканирования,
- 3) быстрое возвращение в $y = 0$ и калибровка,
- 4) прохождение нижней половины области сканирования.

Если бы мы проходили всю область сканирования снизу доверху, то, очевидно, мы имели бы систематическую ошибку в измерениях ближнего поля.

Для процесса $\Phi(t)$ в виде (25) и ближнего поля вида $U(x, y) = (1 - \alpha^2 x^2)(1 - \beta^2 y^2)$ получаем

$$\begin{aligned} \delta^2(\eta) &= \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{16} T^2 \times \\ &\times \left\{ \left[\left(\frac{\beta T}{4} \right)^2 \text{sinc}^{(III)}(p) + \left(1 - 3 \left(\frac{\beta T}{4} \right)^2 \right) \text{sinc}^{(I)}(p) \right]^2 + \left[3 \left(\frac{\beta T}{4} \right)^2 \text{sinc}^{(II)}(p) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(1 - \left(\frac{\beta T}{4} \right)^2 \right) \text{sinc}(p) \right]^2 \right\} \left\{ \left[\text{sinc}(2p) + \left(\frac{\beta T}{2} \right)^2 \text{sinc}^{(IV)}(2p) \right]^2 \right\}^{-1}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$s(p) = \left| \frac{\sigma_a^2 - \sigma_b^2}{8} \right| \frac{\text{sinc}^{(II)}(2p) + (\beta T/2)^2 \text{sinc}^{(IV)}(2p)}{\text{sinc}(2p) + (\beta T/2)^2 \text{sinc}^{(II)}(2p)}, \quad p = \frac{kB_y \eta}{2}. \quad (29)$$

Если размеры области сканирования B_x и B_y существенно различны, то следует направлять строку вдоль большего из них. При таком выборе направления строки плавный спад поля эквивалентен уменьшению числа строк и времени сканирования.

Графики величин s и δ при $\beta = 0$ приведены на рис. 3, 4. Особенности на графиках определяются нулями невозмущенной ДН, а в центре ДН величины s и δ^2 принимают следующие значения:

$$s(0) = 0,33 \left| \frac{\sigma_a^2 - \sigma_b^2}{8} \right| T^2, \quad \delta^2(0) = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{16} T^2.$$

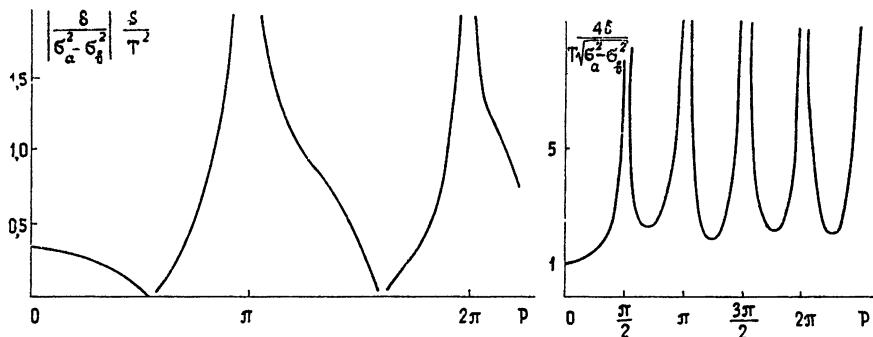


Рис. 3.

Рис. 3. Относительное смещение статистической оценки диаграмм направленности при $\beta = 0$.

Рис. 4.

Рис. 4. Относительная погрешность диаграмм направленности при $\beta = 0$.

Периодические калибровки в ходе эксперимента преобразуют коэффициент передачи $\Phi(t)$ к виду $\Phi(t)/\Phi(\tau\lambda(t))$, где $\lambda(t)$ — целая часть числа t/τ , τ — период калибровки. При числе калибровок $N \gg 1$ их влияние сводится к уменьшению времени эксперимента в N раз, что и следовало ожидать при выбранной модели дрейфов.

Наряду с прямоугольным растром рассмотренным выше методом был исследован и случай сканирования по спирали. Минимальную и постоянную погрешность в двух взаимно перпендикулярных сечениях ДН можно получить, сканируя ближнее поле по квадратной спирали, причем стороны квадрата должны быть параллельны этим сечениям. Оказывается, что оба способа сканирования дают в среднем по точности одинаковые результаты, но экспериментально прямоугольный растр реализовать гораздо проще. Оптимальным был бы такой способ сканирования, который переводил бы основной вклад флуктуаций в область высших пространственных частот или дальних боковых лепестков ДН. Но непрерывные развертки не дают такой возможности. Сканирование же по случайным точкам весьма сложно осуществить на практике. Так как различные способы разверток дают в среднем одинаковые результаты, то следует выбирать наиболее простой для технической реализации способ, а именно — сканирование по прямоугольному растру. Тогда минимальной погрешностью ДН будет в сечении, параллельном строкам. Учитывая, что фазовые уходы играют главную роль среди нестабильной установки, из (28) и (29) можно оценить необходимую стабильность установки, например, по заданной погрешности $\Pi(\%)$ коэффициента усиления антенны, а именно:

$$\sigma_a^2 + \sigma_b^2 \leq 2\Pi N/T,$$

N — число калибровок.

В работе на основании введенного критерия — вероятности выхода диаграммы направленности за интервал, определенный дисперсией диаграммы, получены максимальные оценки ошибок, вызванных неточным знанием координат зонда (что может сознательно допускаться в эксперименте для упрощения схемы пересчета ближнего поля антенн в их диаграмму). Также установлено, что способы сканирования, легко реализуемые на практике, дают в среднем одинаковые результаты по точности, хотя погрешности определения диаграммы направленности, вызванные нестабильностью аппаратуры, распределены неравномерно в области дальнего поля. Результаты работы можно использовать при проектировании позиционеров.

Авторы благодарны В. И. Турчину за обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчин В. И., Цейтлин Н. М. — Препринт НИРФИ, № 123, Горький, 1978.
2. Бахрах Л. Д., Курочкин А. П Голография в микроволновой технике. — М.: Сов. радио, 1979
3. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. — М: Сов. радио, 1970.
4. Newell A. C., Yaghjian A. D. — International IEEE/AP-S Symp., Urbana, 1975, p. 470.
5. Геруни П. М., Арутюнян Дж. С. — В кн. Радио и акустическая голография — Л.: Наука, 1976
6. Каплан И. В., Курочкин А. П — Радиотехника и электроника, 1975, 20, № 10, с. 2038
7. Крамер Г., Лидбеттер М Стационарные случайные процессы. — М.: Мир, 1969.
8. Беляев Ю. К. ДАН СССР, 1967, 173, № 4, с. 739.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
11 сентября 1979 г.

RESTORATION ERRORS OF THE DIRECTIVITY PATTERN DUE TO MEASUREMENT ERRORS IN SCANNING OF THE NEAR ANTENNA FIELD

V. V. Arabadzhi, Yu. I. Belov, A. I. Knafel'

An effect is considered of a measuring system equipment on the angular distribution of the antenna directivity pattern errors in different methods of the near field scanning. The authors estimate the maximum error for the definition of some characteristics of the directivity pattern over the criterion based on the concept of «level intersection» for stationary fluxes in inaccurate coordinate setting of the measuring probe.