

09

© 1991

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Б.Е. К и н б е р, А.Г. Э й д у с

1. Методы расчета параболических антенн обычно излагаются на примере симметричных зеркал [1-3] и, естественно, что их диаграмма обладает той же степенью симметрии. Симметрия диаграммы нарушается в случае несимметричных антенн (перископических, параболических со смещенным зеркалом и т.п.) [4-6].

Цель работы - на примере двумерной задачи проанализировать качественные особенности диаграммы таких антенн.

Расчет диаграммы проводился токовым методом, что позволило учесть влияние глубины зеркала, а результат представить в форме, где основное слагаемое можно трактовать как диаграмму в апертурном приближении, но под плоскостью апертуры надо понимать не плоскость фронта плоской волны, а плоскость, проходящую через кромки зеркала (фаза поля, в которой меняется линейно). Эта специфика метода позволила оценить несимметрию диаграммы, а также в случае Н-поляризации - отклонение максимума главного лепестка относительно направления плоской волны.

2. В приближении Кирхгофа ток \vec{j} на поверхности зеркала связан с вектором \vec{H}_0 падающей волны соотношением $\vec{j} = 2[\vec{n} H_0]$, а диаграмма антенны записывается в форме интеграла по поверхности зеркала Σ (рис. 1) [1]

$$\mathcal{F}(\theta) = \int_{\Sigma} A_0(\sigma) g[\psi(\sigma), \theta] e^{-ik[s_0(\sigma) + s_1(\sigma, \theta)]} d\sigma, \quad (1)$$

где $A_0(\sigma)$ - распределение амплитуды по фронту падающей отраженной волны, $g[\psi(\sigma), \theta]$ - произведение диаграммы элемента тока на коэффициент пропорциональности между амплитудой тока и амплитудой падающей волны, $S_0(\sigma)$ - эйканал тока в точке σ на поверхности зеркала, $S_1(\sigma, \theta)$ - эйканал поля этого тока в направлении точки наблюдения θ , θ - угол между направлением наблюдения и ортом отраженного луча (осью параболы), ψ - угол падения, \vec{n} - орт нормали к поверхности зеркала.

В случае Е-поляризации

$$g = g_{\perp} = \cos \psi / 2, \quad (2a)$$

а в случае Н-поляризации

$$g = g_{ii} = \cos(\psi/2 + \theta). \quad (26)$$

Для параболического зеркала (рис. 1) и Е-поляризации (1) имеет вид

$$\tilde{\mathcal{F}}_{\perp}(\theta) = \int_{-1}^{+1} A_0(t) e^{-i(vt + wt^2)} dt = \tilde{\mathcal{F}}_0(v) + i \tilde{\mathcal{F}}_0^{(II)}(v)W - \frac{1}{2} \tilde{\mathcal{F}}_0^{(IV)}(v)W^2 + \dots, \quad (3a)$$

а для Н-поляризации -

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{F}}_{\parallel}(\theta) &= (\cos \theta - h/2f \sin \theta) \tilde{\mathcal{F}}_{\perp}(\theta) - a/2f \sin \theta \int_{-1}^{+1} A_0(t) e^{-i(vt + wt^2)} t dt = \\ &= (\cos \theta - h/2f \sin \theta) [\tilde{\mathcal{F}}_0(v) + i \tilde{\mathcal{F}}_0^{(II)}(v)W - \frac{1}{2} \tilde{\mathcal{F}}_0^{(IV)}(v)W^2 + \dots] - a/2f \sin \theta [i \tilde{\mathcal{F}}_0^{(I)}(v) + \frac{1}{2} \tilde{\mathcal{F}}_0^{(III)}(v)W + \dots] \end{aligned} \quad (36)$$

где

$$\tilde{\mathcal{F}}_0^{(n)}(v) = \int_{-1}^{+1} A_0(t) e^{-iVt} dt, \quad (4)$$

$$\tilde{\mathcal{F}}_0^{(n)}(v) = d^n/dV^n [\tilde{\mathcal{F}}_0(V)], \quad (5)$$

$$V = k\alpha [\sin \theta + \operatorname{tg} \phi (1 - \cos \theta)] = kb [\sin \phi + \sin(\theta - \phi)] = ka [\theta + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \phi \theta^2 - \frac{1}{6} \theta^3 + \dots], \quad (6)$$

$$W = k\alpha^2/f (1 - \cos \theta) = k\alpha^2/f [\frac{1}{2} \theta^2 - \frac{1}{24} \theta^4 + \dots], \quad (7)$$

2а - размер проекции зеркала на фронт плоской волны, 2б - длина хорды, соединяющей кромки зеркала, f - фокусное расстояние параболы, h - расстояние от середины хорды до оси параболы, ϕ - угол между нормалью к поверхности в середине зеркала и осью параболы ($\operatorname{tg} \phi = h/2f$).

3. Как следует из (3)-(7), несимметричная антенна характеризуется тремя, а не двумя (как в случае симметричной антенны) параметрами: размером зеркала $k\alpha$, параметром $k\alpha^2/f$, характеризующим его глубину, и параметром $h/2f$ (или $\operatorname{tg} \phi$), характеризующим несимметрию (или наклон) зеркала, его смещение с оси параболы.

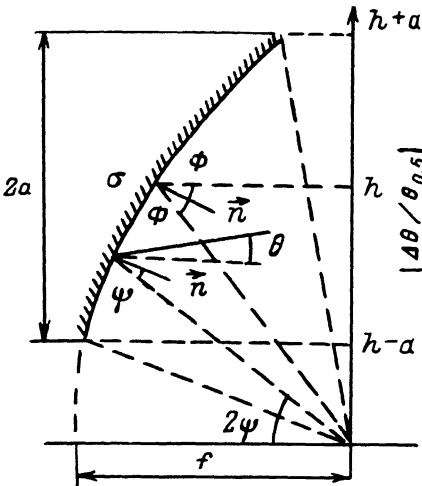


Рис. 1.

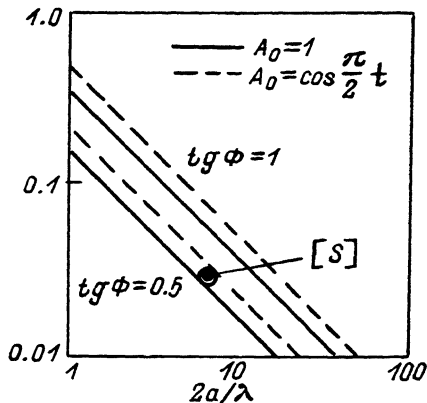


Рис. 2.

Слагаемые (3а), (3б), пропорциональные $\mathcal{F}_0(V)$, можно трактовать как диаграмму в апертурном приближении (распределение поля по хорде, т.е. $A_0(t)e^{-ikb\sin\phi t}$, связано с $\mathcal{F}_0(V)$ преобразованием Фурье (см. (4)). Остальные слагаемые (3а), (3б) – поправки, учитывающие кривизну зеркала. Отметим, что диаграмма $\mathcal{F}_0(V)$, в которой под апертурой понимается хорда, соединяющая кромки зеркала, отличается аргументом от обычной диаграммы $\mathcal{F}(u)$

$$\mathcal{F}(u) = \int_{-1}^{+1} A_0(t) e^{-iut} dt, \quad u = ka \sin \theta, \quad (8)$$

в которой под апертурой понимается плоскость, перпендикулярная оси параболы. Различие диаграмм (4) и (8) (при одном и том же распределении амплитуды $A_0(t)$) обусловлено различием их аргументов, т.е. V и u от угла θ .

4. Покажем, что из (3) следует несимметрия диаграмм по θ , а для случая Н-поляризации, кроме того, и смещение максимума главного лепестка относительно направления плоской волны. Начнем с несимметрии диаграмм. Сопоставим (4) и (8). Аргумент (8), т.е. $u(\theta)$ – нечетная функция θ . Поэтому если $|\mathcal{F}(u)|$ – четная функция u , то $|\mathcal{F}[u(\theta)]| = |\mathcal{F}[u(-\theta)]|$, т.е. диаграмма $\mathcal{F}(\theta)$ симметрична по θ . Напротив, $V(\theta)$ – аргумент (4), не является нечетной функцией θ , поэтому $|\mathcal{F}_0[V(\theta)]| \neq |\mathcal{F}_0[V(-\theta)]|$, т.е. диаграмма несимметричного зеркала несимметрична относительно направления плоской волны.

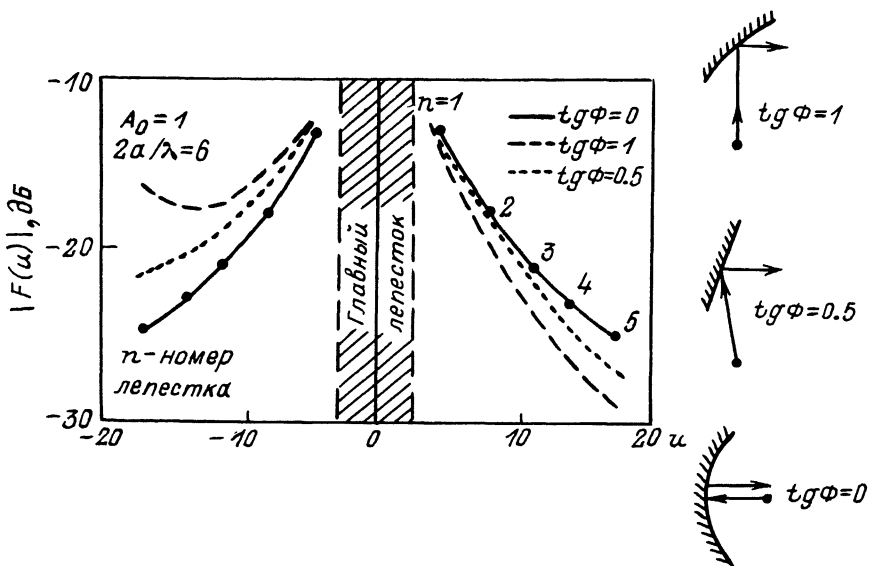


Рис. 3.

Несимметрия проявляется, например, в смещении на $\delta\theta$ нулей главного лепестка диаграммы

$$ka\delta\theta = -\operatorname{tg}\phi \mathcal{F}_0'(0) / (ka \mathcal{F}_0''(0)) \quad (9)$$

(знак минус указывает направление смещения), и в несимметрии огибающей диаграммы. При четном распределении амплитуды $A_0(t)$ огибающая

$$|F_0(\theta)| = A_0(t) \left| ka [\sin\theta + \operatorname{tg}\phi(1 - \cos\theta)] \right| \quad (10)$$

несимметрична, т.е. $|F_0(\theta)| \neq |F_0(-\theta)|$. Например, для антенны размером 6λ , при $A_0=1$, $\operatorname{tg}\phi=1$ различие уровней левого и правого первых боковых лепестков составляет ~ 2 дБ, а вторых ~ 5 дБ (рис. 2).

Рассмотрим теперь смещение $\Delta\theta$ максимума диаграммы (в случае Н-поляризации¹) относительно оси параболы, т.е. направления плоской волны. Как следует из (3а)

$$ka\Delta\theta = -\operatorname{tg}\phi / (ka \mathcal{F}_0''(0)). \quad (11)$$

¹ В случае Е-поляризации максимум диаграммы не смещается, поскольку $V(0)=0$, $\mathcal{F}_0'(0)=0$, а все последующие слагаемые (3а) имеют экстремум в направлении $\theta=0$.

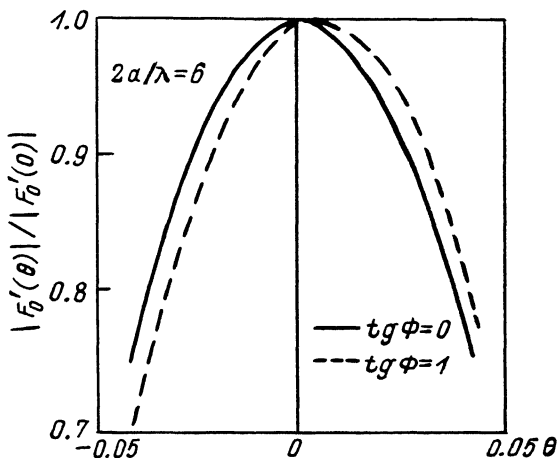


Рис. 4.

Поскольку зависимость от параметра $k\alpha^2/f$ входит лишь в квадратичное по θ слагаемое и при $\theta \sim 1/k\alpha$ $k\alpha^2/f\theta^2 \ll 1$, то несимметрия диаграмм, т.е. смещение нулей главного лепестка $\delta\theta$, несимметрия огибающей, а также смещение максимума $\Delta\theta$ в первом приближении зависят только от двух других параметров: размера зеркала $k\alpha$ и его наклона $\text{tg}\phi$ (9)–(11). Заметим, что для симметричных зеркал $h=0$, $\text{tg}\phi=0$ и, как следует из (9)–(11), $\delta\theta=0$, $\Delta\theta=0$, т.е. диаграмма симметрична.

Нарушение симметрии диаграммы проявляется, в первую очередь, у антенн относительно малых размеров $2a=(5-10)\lambda$ с углами наклона хорды зеркала $\phi \sim 45^\circ$ (перископические антенны). Так, эффект смещения максимума в этих случаях достигает (5–10) % от ширины главного лепестка, а несимметрия огибающей проявляется уже во втором–третьем боковых лепестках. Кроме того, несимметрия проявляется в большей степени для антенн со спадающим законом возбуждения $A_0(t)$, что можно трактовать как результат уменьшения эффективного размера антенны.

На рис. 2, 3 приведены графики верхней огибающей $|F_0(u)|$ и величины смещения максимума $\Delta\theta$, нормированного к ширине главного лепестка $\theta_{0.5}$, для двух значений параметра $h/2f = \text{tg}\phi=0.5$ и 1. Значению $\text{tg}\phi=1$ соответствует антенна перископического типа, значению $\text{tg}\phi=0.5$ – обычная несимметричная антенна со смещенным зеркалом. Там же приведены графики для симметричного зеркала $\text{tg}\phi=0$. Результат эксперимента [5] – точка на рис. 3 (несимметричная антенна $2a/\lambda=6$ и $h/2f=0.5$) хорошо согласуется с расчетом по (11).

Отметим, что несимметрия диаграммы существенна и для пеленгационных антенн, т.к. искажает пеленгационную характеристику. Диаграмме $\mathcal{F}_0(\theta)$ пеленгационного типа соответствует случай нечетного $A_0(t)$. На рис. 4 приведены графики ее производной $|\mathcal{F}'_0(\theta)|$ для несимметричного $\text{tg } \phi = 1$ и симметричного $\text{tg } \phi = 0$ зеркал размером $2a = 6\lambda$. Как видно из рис. 4, несимметрия зеркала привела к несимметрии крутизны, т.е. производной пеленгационной диаграммы, которая достигает 0.06 по уровню 0.7, что существенно [7].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Антенны сантиметровых волн / Под ред. Фельда Я.Н. М.: Советское радио, 1950.
- [2] Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Тершин О.Н. Антенны УКВ, ч. 1 и 2. М.: Связь, 1977.
- [3] The Handbook of Antenna Design. Peter Peregrinus Ltd. London VK, 1982.
- [4] Радж А.У., Адейтия Н.А. // ТИИЭР. Т. 66. № 12. 1978.
- [5] Boswell A.G.P., Ashton R.W. // Electronics Lett. 1976. V. 12. N 22.
- [6] Rahmat-Samii Y. // IEEE Transaction Antennas and Propagation. 1984. V. 32. N 3.
- [7] Покрас А.М., Цирлин В.М., Кудеяров Т.Н. Системы наведения антенн земных станций спутниковой связи. М.: Связь, 1978.

Поступило в Редакцию
16 июня 1991 г.