

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ БОЛЬШИХ АНТЕНН В СУЩЕСТВЕННО БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Измерение усиления больших антенн всегда представляет определенные трудности в связи с большим расстоянием дальней зоны $R_0 = \frac{2D^2}{\lambda}$ (D – размер антенны), которые в сантиметровом и, особенно, в миллиметровом диапазонах радиоволн часто превышают единицы километров, в связи с чем широко используются различные методы измерений в ближней зоне, основанные, в частности, на фокусировке раскрыва [1, 2]. Однако это далеко не всегда возможно для достаточно больших антенн по конструктивным соображениям, поэтому значительный интерес представляет подход, основанный на измерении коэффициента передачи между исследуемой и вспомогательной антеннами в ближней зоне с учетом сферической абберации [3 – 5]. Однако опубликованные результаты численного моделирования получены в рамках апертурной теории и, как правило, ограничены значением расстояния между антеннами $R \geq 0,1R_0$, что иногда существенно превышает возможности измерительного полигона. Поэтому настоящая работа посвящена численному и экспериментальному моделированию измерения КУ антенны в существенно ближней зоне, чтобы ответить на вопрос, в какой мере использование апертурной теории позволяет использовать расчетные соотношения для коэффициента передачи между антеннами на максимально близких расстояниях?

Для этого рассмотрим две соосные апертуры, расположенные на расстоянии R_0 (рис. 1), одна из которых – S_x (большого размера) является исследуемой, а другая – S_0 (меньшего размера) – вспомогательной.

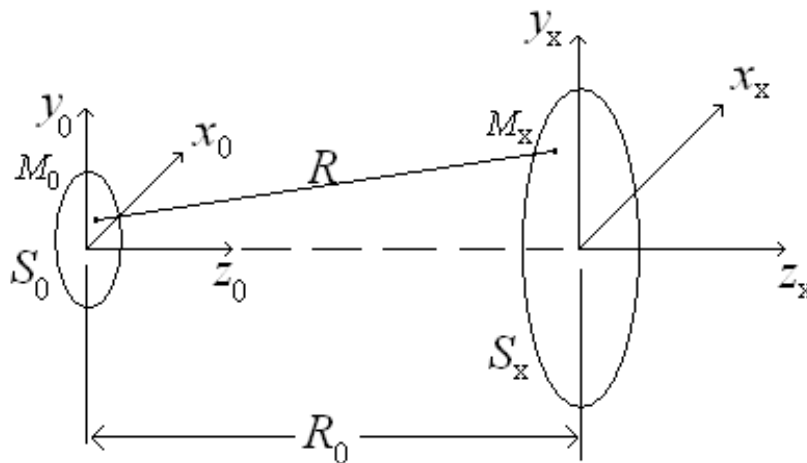


Рис. 1. Передача мощности между двумя антеннами

В рамках апертурной теории коэффициент передачи по мощности между двумя апертурами можно записать в виде [4]

$$\eta = \frac{P_x}{P_0} = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{\left| \int_{S_x} ds_x A_x(s_x) \cdot \int_{S_0} ds_0 A_0(s_0) \frac{e^{jkR}}{R} \right|^2}{\int_{S_x} ds_x |A_x(s_x)|^2 \cdot \int_{S_0} ds_0 |A_0(s_0)|^2} \quad (1)$$

где P_x – принятая мощность на выходе исследуемой антенны, P_0 – мощность, передаваемая вспомогательной антенной, A_x и A_0 – амплитудно-фазовое распределение в раскрыве исследуемой и вспомогательной антенн, R – расстояние между точками $M_x(s_x)$ и $M_0(s_0)$ в раскрыве исследуемой и вспомогательной антенн соответственно.

Учитывая выражение для КУ отдельных антенн [4, 5]

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{\left| \int_{S_A} ds A(s) \right|^2}{\int_{S_A} ds |A(s)|^2} \quad (2)$$

и выражение для коэффициента передачи в дальней зоне между двумя антеннами (формула Фрииса[4]) соотношение (1) можно представить в виде

$$\eta = \eta_0 \gamma = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_0} \right)^2 G_x G_0 \gamma \quad (2)$$

где γ – коэффициент дефокусировки

$$\gamma = R_0 \cdot \frac{\left| \int_{S_x} ds_x A_x(s_x) \cdot \int_{S_0} ds_0 A_0(s_0) \frac{e^{jkR}}{R} \right|^2}{\left| \int_{S_x} ds_x A_x(s_x) \right|^2 \left| \int_{S_0} ds_0 A_0(s_0) \right|^2}, \quad (3)$$

$$R = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{x - x_0}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{R_0} \right)^2}.$$

Рассмотрим исследуемую антенну в виде круглой апертуры радиуса r , в которой формируется стандартное распределение вида $A(\rho) = A_0 + B(1 - \rho^2)$, где ослабление -10 дБ на краю раскрыва соответствует значениям $A_0 = 0,33$; $B = 0,67$. В качестве вспомогательной антенны пусть используется прямоугольный рупор, раскрыв которого существенно меньше исследуемой антенны $a, b \ll r$, а распределение поля совпадает с полем волны

$H_{10} - \frac{a}{2} \leq x_0 \leq \frac{a}{2}$; $-\frac{b}{2} \leq y_0 \leq \frac{b}{2}$. Вводя безразмерные координаты в раскрыве антенн $0 \leq \rho = \frac{2r}{D} \leq 1$; $-1 \leq \bar{x}_0 = \frac{x_0}{a} \leq 1$; $-1 \leq \bar{y}_0 = \frac{y_0}{b} \leq 1$ и разлагая показатель экспоненты jkR (3)

в ряд по малому параметру $\frac{D}{R_0} \ll 1$ ограничимся квадратичными слагаемыми, как это принято в апертурной теории [5, 6]. Тогда показатель экспоненты в (1) примет вид $jkR = jkR_0 + j\Delta\Phi$, где $\Delta\Phi = j\frac{\pi}{8} \cdot \frac{\rho^2}{\Delta} - j\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho}{\Delta} \left(\frac{a}{D} \bar{x}_0 \cos\varphi + b\bar{y}_0 \sin\varphi \right)$, а параметр $\Delta = \frac{R}{R_0}$ характеризует степень близости антенн по сравнению с дальней зоной.

В то же время, для существенно малых расстояний приходится также сохранять квадратичные слагаемые множителя в знаменателе функции Грина свободного пространства (1)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0(1 + \Delta R)}, \quad (4)$$

где

$$\Delta R = \frac{D^2}{8R_0^2} \rho^2 - \frac{D^2}{2R_0^2} \rho \left(\frac{a}{D} \bar{x}_0 \cos \varphi + b \bar{y}_0 \sin \varphi \right). \quad (5)$$

В результате выражение для коэффициента дефокусировки (3) можно записать в виде

$$\gamma = \frac{\left| \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \rho d\rho A_x(\rho) \int_{-1}^1 d\bar{x}_0 \int_{-1}^1 d\bar{y}_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \bar{x}_0\right) \frac{e^{j\Delta\Phi}}{1 + \Delta R} \right|^2}{\left| \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \rho d\rho A_x(\rho) \right|^2 \left| \int_{-1}^1 d\bar{x}_0 \int_{-1}^1 d\bar{y}_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \bar{x}_0\right) \right|^2} \quad (6)$$

На рис. 2 приведен пример зависимости коэффициента дефокусировки в зависимости от расстояния между параболической антенной диаметром 1000 мм и открытого конца волновода сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ на длине волны $\lambda = 3,2 \text{ см}$.

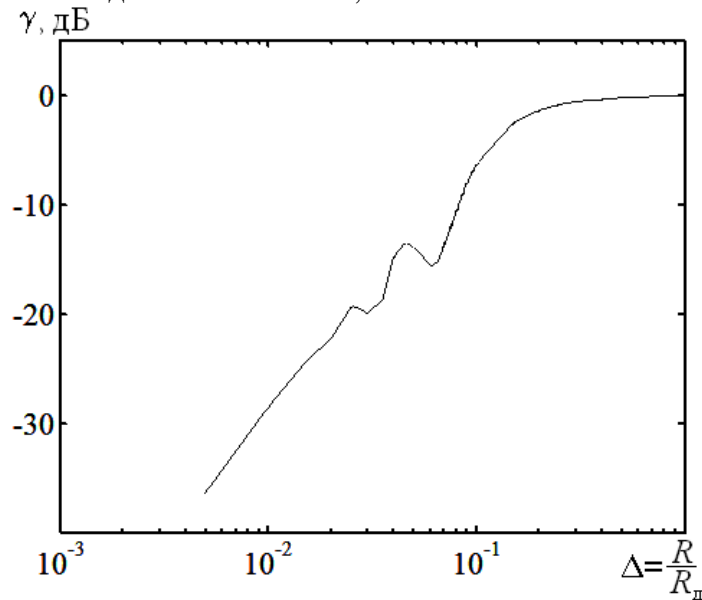


Рис. 2. Коэффициент дефокусировки параболической антенны

Как видно, коэффициент дефокусировки быстро уменьшается при сближении антенн, а на расстояниях $\Delta < 0,1$ скорость спадания заметно снижается и наблюдаются небольшие осцилляции, что обусловлено вкладом зон Френеля высших порядков. Действительно, фазовая ошибка поля вспомогательной антенны на краю раскрыва исследуемой антенны

определяется выражением $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R$, где ΔR – разность хода между центральным и пери-

ферийным лучами $\Delta R = R - R_0 \cong \frac{D^2}{8R_0}$. Значение параметра Δ , который соответствует m -й

зоне Френеля, можно представить как $\Delta = (8m)^{-1}$, а минимумы на рис. 2 соответствуют расстоянию, когда в раскрыве исследуемой антенны появляются противофазные участки падающего поля, максимальный вклад которых соответствует четному количеству зон Френеля. Наличие подобных участков в некоторой степени компенсирует влияние сферической аберрации, что объясняет уменьшение скорости спадания коэффициента дефокусировки.

В то же время, приведенные результаты получены в рамках апертурной теории, в связи с чем, представляет интерес выяснить в какой мере, проведенное рассмотрение может быть распространено на расстояния порядка $\Delta \leq 0,01$. Для этого в работе проводились экспериментальные исследования в диапазоне $\lambda = 3,2$ см с использованием параболической антенны диаметром $D = 1000$ мм (рис. 3, а), а в качестве вспомогательной антенны – открытый конец волновода сечением 23×10 мм² (рис. 3, б).



Рис. 3. Исследуемая параболическая антенна (а) и вспомогательная антенна (б)

При измерениях расстояние между антеннами изменялась в диапазоне $0,005 \leq \Delta \leq 1$, а методика юстировки положения антенн с помощью лазерного прицела обеспечивала строгое совпадение оптических осей антенн на всей протяженности трассы, результаты приведены на рис. 4. Как видно, экспериментальные данные (пунктир) в значительной мере согласуются с результатами расчета (гладкая кривая) вплоть до самых малых расстояний $R_0 = 0,005R_0$, что говорит о достаточно высокой надежности апертурного метода расчета при столь малых расстояниях между антеннами, когда в раскрыве антенны укладывается несколько зон Френеля $m \geq 2$ с противофазными участками.

Однако следует отметить, что проведенные измерения не подтвердили наличие осцилляций коэффициента дефокусировки (рис. 1), что может быть вызвано влиянием сложной геометрией антенного устройства (рис. 3, а) на близких расстояниях. Действительно, при значении параметра $\Delta \cong 0,01$ вспомогательная антенна находилась на расстоянии всего 20 см от кронштейна для крепления облучателя (рис. 3, а) и самого облучателя. Поэтому нетрудно предположить, что ближние поля, образованные за счет дифракции излучения вспомогательной антенны на элементах конструкции исследуемой антенны, могут существенно исказить данные, полученные в рамках апертурной теории, которая не позволяет описывать дифракционные явления.

Описанная методика была использована для измерения КУ параболической антенны диаметром $D = 3$ м (РЛС типа МРЛ-1) в диапазонах $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см (расстояние дальней зоны соответственно 2,2 и 0,56 км) на расстоянии $R_0 = 62$ м.

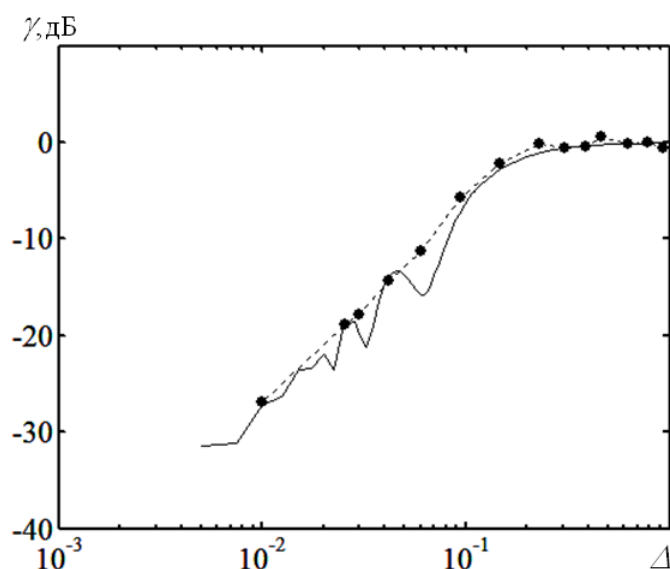


Рис. 4. Сравнение расчетной и измеренной зависимости коэффициента дефокусировки

Измерения проводились в два этапа путем сравнения коэффициентов передачи “исследуемая антенна – вспомогательная антенна” η_x и “эталонная антенна – вспомогательная антенна” η_3 , где в качестве вспомогательной и эталонной антенн использовались рупорные антенны с калиброванным коэффициентом усиления G_3 , для которых условие дальней зоны выполнялось с запасом. Тогда используя выражение (2) для коэффициента передачи между двумя антеннами в двух случаях, можно получить простое соотношение для коэффициента усиления исследуемой антенны в дальней зоне

$$G_x = G_3 \frac{\eta_x}{\eta_3} \frac{1}{\gamma} \quad (7)$$

Коэффициент усиления эталонных рупорных излучателей равнялся $G_3 = 24,9 \text{ дБ}$ и $G_3 = 5,5 \text{ дБ}$ в диапазонах $\lambda_1 = 8 \text{ мм}$ и $\lambda_2 = 3,2 \text{ см}$ соответственно, а коэффициент дефокусировки, рассчитанный с учетом расстояния между антеннами согласно (6) составлял $\gamma = -18,6 \text{ дБ}$ в диапазоне $\lambda = 0,816 \text{ см}$ и $\gamma = -5,3 \text{ дБ}$ в диапазоне $\lambda = 3,2 \text{ см}$ (параметр Δ равен 0,028 и 0,11 соответственно). В результате КУ исследуемой антенны для дальней зоны составляет 45 дБ в диапазоне $3,2 \text{ см}$ (паспортное значение 46 дБ), а в диапазоне $0,816 \text{ см}$ равен $59,1 \text{ дБ}$ (паспортное значение – не менее $57,8 \text{ дБ}$). Как видно, отличие измеренного усиления антенны в дальней зоне с помощью описанной методики от паспортных данных не превышает 1 дБ , что также может быть связано с точностью проведения паспортизации антенны в заводских условиях.

В результате проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Получены выражения для потерь коэффициента усиления апертурных антенн (коэффициента дефокусировки) при измерениях в существенно ближней зоне $\Delta = \frac{R_0}{R_0} \leq 0,01$.

2. Показано, что при малых расстояниях между вспомогательной и исследуемой антеннами $\Delta \leq 0,1$, характер убывания коэффициента передачи несколько меняется в связи с формированием в раскрыве зон Френеля.

3. Проведены экспериментальные исследования коэффициента дефокусировки параболической антенны $D = 31\lambda$ в широком диапазоне изменения расстояния между исследуемой и вспомогательной антеннами $0,01R_0 \leq R_0 \leq R_0$, которые находятся в хорошем соответствии с расчетными данными.

4. Показано, что использование апертурной теории для расчета коэффициента передачи (1), (2), (6) обеспечивает достаточно высокую точность измерений коэффициента усиления больших апертурных антенн, несмотря на формирование в раскрыве исследуемой антенны противофазных участков (четных зон Френеля).

Список литературы: 1. *Jull E.V.* The estimation of aerial radiation pattern from limited near-field measurements // Proc. Inst. Elec. Engrs (London). – 1963. – V. 110. P.501-506. 2. *Bickmore R.W.* Fraunhofer pattern measurement in the Fresnel zone // Can. J. Phys. 1957. V. 35. P.1299-1308. 3. *Hu M.K.* Fresnel Region Field Distribution of Circular Aperture Antennas // IRE Trans. Antennas and Propagation. – 1960. – V. 8. – P. 344-346. 4. *Kay A.F.* Near-Field gain of Aperture Antennas // IRE Trans. Antennas and Propagation. – 1960. – V. 8. – P. 586-593. 5. *Hu M.K.* Fresnel Region Fields of Circular Aperture Antennas // Journal of Research of the national Bureau of Standards. D. Radio Propagation. – 1961. – V. 65D. No. 2. – P. 137-147. 6. *Кюн Р.* Микроволновые антенны. – Л. : Судостроение, 1967. – 520 с.

*Институт радиофизики и электроники
им. А.Я. Усикова НАН Украины*

Поступила в редколлегию 15.12.2012