

УДК 621.396

М.Б. Проценко, доцент, канд. техн. наук;

А.В. Троицкий; С.В. Нестерук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В АПЕРТУРЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты исследований направленных свойств осесимметричной параболической антенны с учетом дефокусирующих факторов: отличия волнового фронта облучателя от сферического; смещения фазового центра облучателя вдоль фокальной оси относительно фокуса параболоида. Анализ характеристик излучения проведен на основе апертурного метода. Показана возможность взаимной компенсации фазовых ошибок.

Зеркальные антенны, в том числе с параболической формой зеркала, находят широкое применение в различных системах спутниковой радиосвязи, благодаря возможности получения на их основе высокой направленности излучения, сохранения направленных свойств в широкой полосе частот и т.д. При всем этом проблема повышения эффективности таких антенн, решение которой основано на новейших результатах исследований их потенциальных свойств, оптимизации характеристик излучения и конструктивных параметров, остается актуальной [1].

Для анализа характеристик излучения зеркальных антенн на этапе предварительного проектирования часто используется апертурный метод, который позволяет существенно упростить процедуру численного моделирования и определить характер изменения направленных свойств антенны [2-4].

Исходя из принципа работы параболической антенны, необходимо, чтобы фазовый фронт волны облучателя имел сферическую форму и фазовый центр облучателя совпадал с фокусом параболоида.

В противном случае коэффициент направленного действия (КНД) антенны уменьшается, увеличивается уровень боковых лепестков (УБЛ).

Рассмотрим параболическую антенну, состоящую из осесимметричного параболического зеркала, и облучателя, схема которой изображена на рисунке 1,а. Параболическое зеркало описывается следующими геометрическими параметрами: R – радиусом апертуры зеркала; f – фокусным расстоянием. На рисунке 1,а также схематически изображены сферический и анализируемый фронт волны облучателя, траектория лучей для сфокусированной и расфокусированной параболической антенны.

Для описания направленных свойств осесимметричной параболической антенны, в частности, амплитудной диаграммы направленности (ДН), с использованием апертурного метода можно воспользоваться выражением [4]

$$f(\theta, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^R f_a(\rho, \varphi') \exp[jk\rho \sin \theta \cos(\varphi - \varphi')] \rho \, d\rho \, d\varphi', \quad (1)$$

где $f_a(\rho, \varphi')$ – амплитудно-фазовое распределение поля в апертуре параболической антенны, описываемое в полярных координатах ρ, φ' ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; λ – длина волны в свободном пространстве.

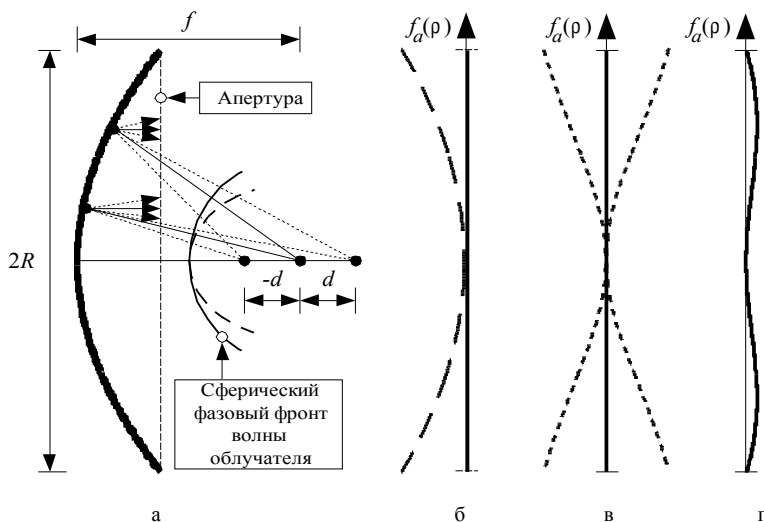


Рисунок 1 – Схема параболической антенны и фазовые распределения поля в ее апертуре: а – дефокусирующие факторы; б – влияние несферического фазового фронта волны облучателя на фазовое распределение в апертуре; в – влияние сдвига облучателя на фазовое распределение в апертуре; г – совместное влияние двух дефокусирующих факторов (компенсация фазовой неравномерности)

При осевой симметрии амплитудно-фазового распределения поля в апертуре параболической антенны (1) можно упростить и представить в виде

$$f(\theta) = \int_0^R f_a(\rho) J_0(k\rho \sin \theta) \rho \, d\rho, \quad (2)$$

где $J_0(u)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка от аргумента u .

Представленное выражение (2) позволяет также вычислить КНД антенны, который с учетом осесимметричности ДН определяется на основе выражения [2]

$$D = \frac{2f^2(\theta = 0)}{\int_0^\pi f^2(\theta) \sin \theta \, d\theta}. \quad (3)$$

Будем считать, что амплитуда поля в апертуре параболической антенны не изменяется (равноамплитудное распределение), а фазовое распределение зависит только от вышеперечисленных дефокусирующих факторов.

Тогда для случая совмещения фазового центра облучателя с фокусом параболоида фазовые отклонения в распределении поля в апертуре антенны определяются только отличиями фазового фронта волны облучателя от сферического (см. рисунок 1,а). Будем также считать, что эти отклонения (фазовые ошибки) носят квадратичный характер и достигают максимального значения $\Psi_{\max}$ на краю апертуры. Тогда функцию $f_a(\rho)$ можно записать в виде:

$$f_a(\rho) = \exp\left(-j \frac{\Psi_{\max}}{R^2} \rho^2\right). \quad (4)$$

Соответствующее для данного случая фазовое распределение поля в апертуре антенны схематически изображено на рисунке 1,б.

Для случая смещения фазового центра облучателя на расстояние $\pm d$ вдоль фокальной оси относительно фокуса параболоида и сферическом фазовом фронте волны облучателя фазовое распределение в апертуре параболической антенны может быть описано выражением [4]:

$$f_a(\rho) = \exp\left(-j \frac{kd \left(1 - \left(\frac{\rho}{2f}\right)^2\right) - \frac{kd^2}{4f}}{1 + \left(\frac{\rho}{2f}\right)^2}\right). \quad (5)$$

На рисунке 1, в схематически изображено фазовое распределение поля в апертуре антенны при смещении фазового центра облучателя на расстояние d и $-d$ вдоль фокальной оси.

С использованием (2)–(5) проведено исследование характеристик излучения параболической антенны, у которой радиус апертуры и фокусное расстояние равны, т.е. $R=f=9\lambda$. Интегралы в (2) и (3) решены численным методом в пакете MathCAD.

В ходе исследований анализировались вид и параметры ДН (ширина ДН по уровню половинной мощности $2\Delta\theta_{-3\text{ дБ}}$, УБЛ), их отличия от ДН сфокусированной антенны (см. рисунок 2), изменения КНД антенны. На рисунках 3,а – 3,в изображены зависимости $2\Delta\theta_{-3\text{ дБ}}$, УБЛ и КНД, соответственно, от фазовых ошибок ψ_{max} , определяемых отклонением фазового фронта волны облучателя от сферического, от относительного смещения фазового центра облучателя из фокуса параболоида вдоль фокальной оси d/λ и от одновременного влияния фазовых ошибок как за счет неидеальности фазового фронта волны облучателя, так и за счет расфокусировки антенны.

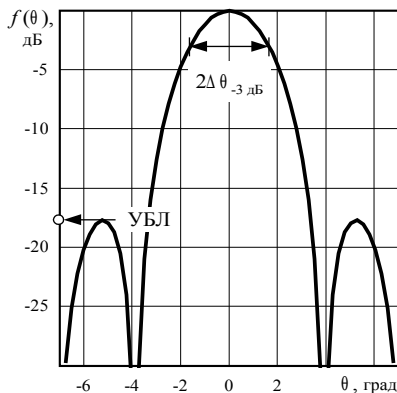


Рисунок 2 – ДН параболической антенны в сфокусированном режиме

Согласно приведенным зависимостям можно сформулировать следующие выводы.

1. В рассмотренном диапазоне изменения фазовых распределений поля в апертуре параболической антенны вид ДН и ее ширина $2\Delta\theta_{-3\text{ дБ}}$ остаются практически постоянными, а основное влияние проявляется на УБЛ и КНД антенны.

2. Отличие фазового фронта волны облучателя от сферического, описываемое квадратичными фазовыми ошибками в распределении поля в апертуре, приводит к уменьшению КНД и увеличению УБЛ. В частности, для анализируемого параболического зеркала при $\psi_{\text{max}} = \pi$ КНД антенны уменьшается на 9 дБ, а УБЛ увеличивается на 9,5 дБ.

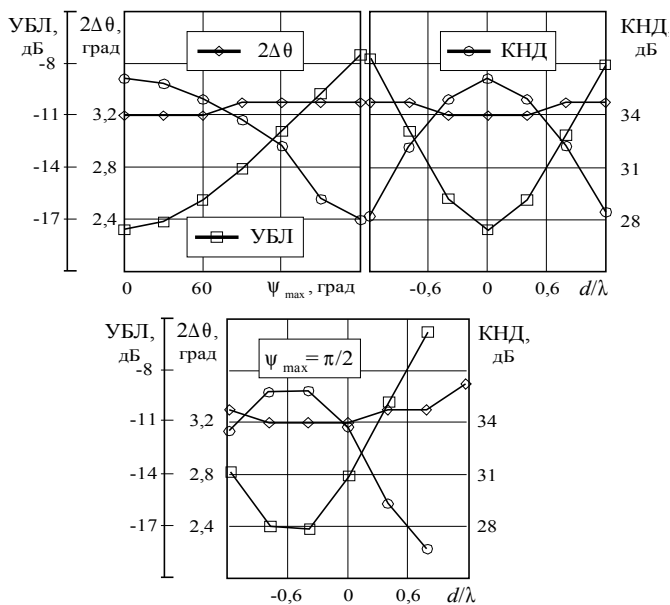


Рисунок 3 – Параметры ДН ($2\Delta\theta_{-3\text{ дБ}}$, УБЛ) и КНД параболической антенны

3. Смещение фазового центра облучателя из фокуса вдоль фокальной оси и сферическом фазовом фронте волны облучателя также приводит к уменьшению КНД антенны и увеличению УБЛ в независимости от направления смещения. Так, для $d/\lambda = \pm 1,2$ КНД антенны уменьшается на 9 дБ и УБЛ увеличивается на 9 дБ.

4. При одновременном влиянии фазовых ошибок как за счет неидеальности фазового фронта волны облучателя, так и за счет расфокусировки антенны возможна взаимная компенсация ошибок (см. рисунок 1,г) и, соответственно, восстановление направленных свойств как у сфокусированной антенны.

Представленные результаты могут быть использованы при разработке конструкций параболической антенны, включая выбор облучателя, а также в качестве исходных для численного моделирования характеристик излучения зеркальных антенн на основе токового метода и обоснования экспериментальных зависимостей.

Библиографический список

1. Проблемы антенной техники / Д.И. Воскресенский, А.С. Братчиков, Д.И. Воскресенский; Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. — М.: Радио и связь, 1989. — 368 с.
2. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства: Учебник для вузов / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. — М.: Радио и связь, 1989. — 352 с.

3. Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн / С. Корнблит; Под ред. О.П. Фролова. — М.: Связь, 1980. — 360 с.

4. Бахрах Л.Д. Сканирующие зеркальные антенны / Л.Д. Бахрах, Г.К. Галимов. — М.: Наука, 1981. — 304 с.

Поступила в редакцию 20.02.2004 г.