

УДК 621.396.67

В.Ю. Смирнов, О.Р. Никитин

ЛИНЕЙНЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ, СФОКУСИРОВАННЫЕ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Представлены результаты компьютерного моделирования линейных фазированных антенных решеток, сфокусированных в ближней зоне. Показана возможность эффективной фокусировки электромагнитного поля в заданной области пространства. Проведено сопоставление геометрических параметров решетки с параметрами фокальной области.

Ключевые слова: антенные решетки, моделирование, фокальная область, электромагнитное поле, ближняя зона.

Введение. Во многих прикладных задачах медицины, геологии, военных и ядерных исследованиях возникает необходимость в дистанционной оценке электродинамических параметров локальных областей. Один из наиболее эффективных способов решения поставленной задачи может быть применён с использованием сфокусированных в заданной области электромагнитных полей. Фокусировка может осуществляться различными способами, однако наиболее перспективным является применение фазированных антенных решеток, которые позволяют электронными средствами осуществить пространственное формирование и перемещение фокальной области, а также менять ее параметры.

Теоретические исследования. В работе представлены результаты исследования фазированных антенных решеток, сфокусированных в ближней зоне, полученные с помощью компьютерного моделирования.

В качестве математической модели рассматривалась эквидистантная линейная антенная решетка изотропных излучателей.

В основу моделирования легло соотношение, описывающее поле антенной решетки в ближней зоне [1]:

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \cdot F_i(\theta, \varphi) \cdot \frac{e^{-j\beta r_i}}{r_i}, \quad (1)$$

где I_i – комплексное значение тока в излучателе,

$F_i(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности одного излучателя,

$\beta = 2\pi / \lambda$ – волновое число,

r_i – расстояние от излучателя до точки фокусировки.

1. Рассмотрим поле n излучателей в точке фокусировки, считая излучатели всенаправленными с длиной l (см. рисунок 1).

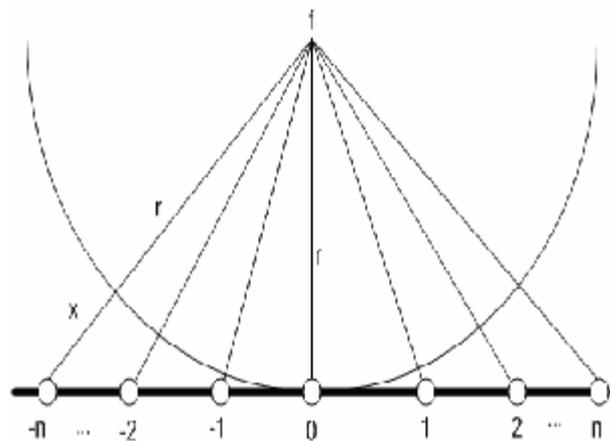


Рисунок 1 - Фокусировка поля линейной АР

Для фокусировки необходимо создать сферический фронт.

Для того чтобы все сигналы пришли в точку фокусировки в фазе, необходимо обеспечить фазовые набеги на соответствующих излучателях. Этого можно добиться, изменяя токи излучателей. Дополнительное расстояние, которое необходимо пройти сигналу n -го излучателя, можно оценить соотношением:

$$x_n = \sqrt{f^2 + n^2 l^2} - f,$$

где f – фокусное расстояние,

n – номер излучателя в соответствии с введенной нумерацией,

l – расстояние между излучателями.

Тогда полное расстояние от n -го излучателя до точки фокусировки равно:

$$r_n = \sqrt{f^2 + n^2 l^2}.$$

Учитывая вышесказанное, рассчитаем фазовый набег в n -м излучателе:

$$\varphi_n = x_n \beta = \frac{2\pi}{\lambda} x_n$$

Таким образом, окончательно можно записать:

$$|\dot{E}| = \sum_{i=-n/2}^{n/2} \frac{|e^{j\beta(x_n - r_n)}|}{r_n}$$

или, учитывая формулу Эйлера:

$$|\dot{E}| = \sum_{i=-n/2}^{n/2} \frac{\sqrt{\cos^2(x_n - r_n) + \sin^2(x_n - r_n)}}{r_n}. \quad (2)$$

2. Рассмотрим распределение электромагнитного поля в плоскости АР (см. рисунок 2).

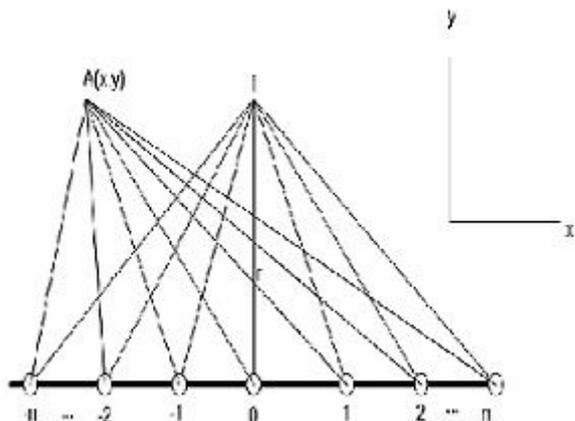


Рисунок 2 - Расчет поля ФАР в заданной точке

Будем считать, что АР расположена в центре (по оси x) и внизу (по оси y) заданной области сканирования. Тогда координату нулевого излучателя можно определить как $(x_m / 2; 0)$.

Имея привязку к нулевому излучателю, определим координаты n-го излучателя:

$$A_n(x; y) = (x_m / 2 + nl; 0).$$

Найдем расстояние от n-го излучателя до произвольной точки A(x; y):

$$r_n = \sqrt{y^2 + (x - (x_m / 2 + nl))^2} \quad (3)$$

Таким образом, подставляя (3) в (2), получаем значения модуля напряженности электрического поля в любой точке плоскости, где расположена антенная решетка.

Для проведения моделирования были разработаны алгоритм и программа на языке Borland Delphi 7.

Программа позволяет производить расчет напряженности электрического поля в ближней зоне, в плоскости расположения решетки.

Возможны различные формы представления результатов моделирования,

такие как: табличное, трехмерное распределение, двумерные распределения в заданных плоскостях.

Были проведены многочисленные исследования, показавшие эффективность программы. На рисунках 3-5 приведены результаты моделирования для следующей задачи: количество излучателей $n = 47$; расстояние между излучателями $l = \lambda / 2$; фокусное расстояние $f = 20\lambda$.

Результаты трехмерного моделирования приведены на рисунке 3.

Зависимости поля в ортогональных плоскостях, проходящих через точку фокусировки, приведены на рисунках 4, 5.

Область фокусировки, определяемая на уровне -3 дБ относительно максимального значения в двух ортогональных плоскостях, представляет собой пространственный веретенообразный объем, вытянутый вдоль фокальной оси. Для заданных параметров максимальный диаметр фокальной области в поперечной плоскости составляет 5λ . Длина фокальной области в продольной плоскости составляет $0,9\lambda$. Из пространственной картины следует, что наряду с фокусировкой поля в заданной области имеет место повышение плотности потока мощности в направлениях, имеющих форму расходящихся относительно фокальной плоскости лучей. Преимущественная концентрация поля наблюдается вблизи фокальной оси.

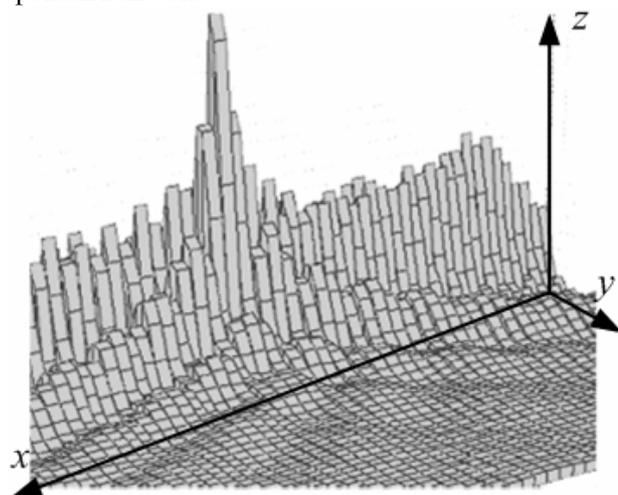


Рисунок 3 - Трехмерное распределение поля (по оси z отложена нормированная амплитуда, а по x и y продольная и поперечная координата в λ)

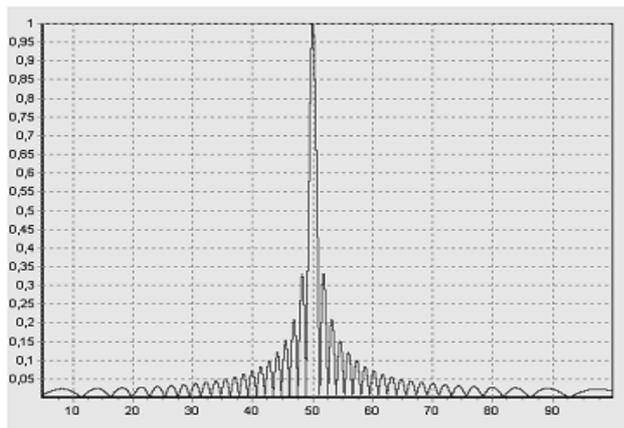


Рисунок 4 – Зависимость нормированной амплитуды напряженности электромагнитного поля от продольной координаты x в λ ($y = \text{const}$)

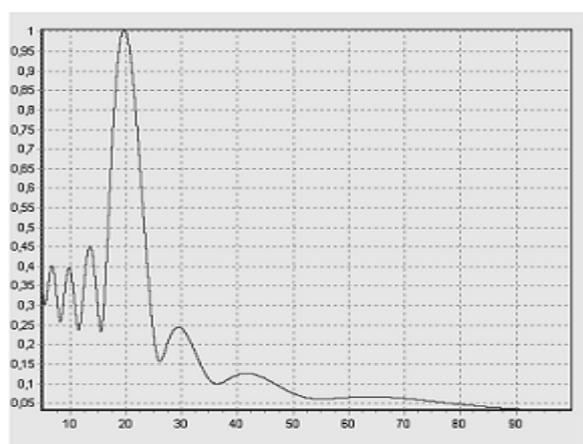


Рисунок 5 – Зависимость нормированной амплитуды напряженности электромагнитного поля от продольной координаты y в λ ($x = \text{const}$)

Если проследить изменения параметров фокальной области от числа излучателей (рис.6,7), то можно увидеть, что параметры фокальной области стремятся к некоторому пределу, что обусловлено асимптотическим приближением системы дискретных излучателей к плоскому раскрытию с непрерывным амплитудно-фазовым распределением.



Рисунок 6 – Зависимость диаметра фокальной области от числа излучателей

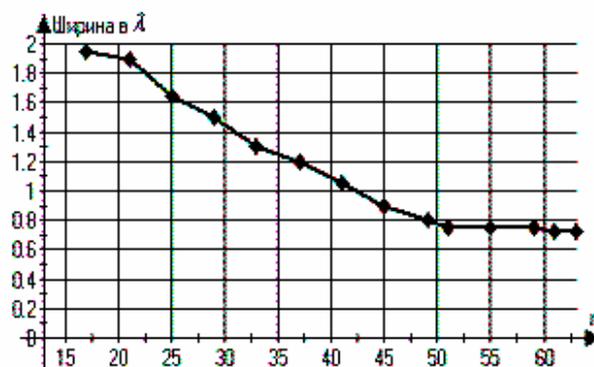


Рисунок 7 – Зависимость ширины фокальной области от числа излучателей

Выводы

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

Фазированные антенны решетки, в т.ч. линейные, могут быть эффективно использованы для фокусировки электромагнитного поля в ближней зоне.

Эффективность фокусировки (повышенная концентрация поля в заданной области), как следует из приведенных результатов, повышается с увеличением расстояния до фокального центра и уменьшением расстояния между излучателями.

Параметры фокальной области стремятся к некоторому пределу, что обусловлено асимптотическим приближением системы дискретных излучателей к плоскому раскрытию с непрерывным амплитудно-фазовым распределением.

ФАР могут быть использованы в медицине для гипертермии [2] в терапевтических целях или диагностики патологий, а также для картографирования местности.

Библиографический список

1. Уолкер К. Антенны бегущей волны / К. Уолкер.– М.: Энергия, 1970.– 448 с.: ил.
2. Гаврилов В.М., Кирюхин А.В., Никитин О.Р., Селиверстов А.А. Применение электромагнитных полей СВЧ в медицине и биологии: учеб. пособие / под ред. проф. О.Р. Никитина.– Владимир.: ВлГУ, 2001.– 140 с.