

УДК 621.396.677

А.С. Аникин, М.В. Крутиков

Эффективность фокусировки плоских активных фазированных антенных решеток вдоль оптической оси в ближней зоне

Анализ плотности потока мощности электромагнитного поля в ближней зоне для сфокусированного и коллимированного лучей плоской антенной решётки показал, что эффективность её фокусировки возрастает с увеличением апертуры и уменьшением фокусного расстояния. Сравнительный анализ сфокусированных антенных решёток показал, что фокусировка антенной решётки размером 4 м² на расстояния до 50 м позволяет уменьшить от 20 до 45 дБ мощность сигналов, подводимых к элементам антенной решётки.

Ключевые слова: антенная решётка, фокусировка, коллимированный луч, эффективность фокусировки, плотность потока мощности.

Фокусировка электромагнитного поля в заданной области пространства предназначена для увеличения концентрации электромагнитного излучения. Разработаны аналитические соотношения для оценки коэффициента направленного действия антенны, размеров области фокусировки, ширины луча, уровня боковых лепестков и т.д. [1–3]. Основное внимание уделяется оценке плотности потока мощности. В то же время при технической реализации фокусирующего устройства важно знать не только параметры пространственной области фокусировки, но и энергетическую эффективность фокусировки в ближней зоне по отношению к несфокусированному (коллимированному) лучу антенны, т.е. возрастание плотности потока мощности при фокусировке. Высокая энергетическая эффективность позволяет снизить требования к выходной мощности передатчиков и электрической прочности антенных элементов.

Цель работы – путём моделирования определить эффективность фокусировки электромагнитного поля миллиметрового диапазона в ближней зоне для круглых дискретных излучающих антенных решёток с различной площадью апертуры.

Для сфокусированной апертуры характерно наличие выраженного максимума плотности потока мощности в окрестности точки фокусировки, где наблюдается синфазное сложение излучённых волн от различных точек апертуры. Для коллимированной (несфокусированной) апертуры характерно синфазное распределение тока (поля) по апертуре.

Для осесимметричного амплитудно-фазового распределения тока $f(\rho)$ по круглой апертуре поле в точке наблюдения на расстоянии R от апертуры запишется как [3]:

$$E(R, \theta, \phi) = \int_0^{\rho} \int_0^{2\pi} f(\rho) \frac{e^{-jkr}}{r} \rho d\rho d\beta, \quad (1)$$

где k – волновое число; ρ – поперечное расстояние на апертуре антенной решётки; $r = \sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R\rho \sin(\theta) \cos(\phi - \beta)}$.

Плотность потока мощности вычислялась как квадрат модуля выражения (1). Для коллимированной антенной решётки $f(\rho) = 1$.

Рассмотрим круглую антенную решётку диаметром D из N элементов и межэлементным расстоянием, не превышающим длину волны. Общая мощность N сигналов антенной решётки составляет $P_{\text{изл}}$. Антенные элементы излучают узкополосный сигнал на частоте 94 ГГц мощностью $P_{\text{изл1}}$. Рассмотрим три площади излучающей апертуры: 1 м² ($N = 2900$), 2 м² ($N = 5770$) и 4 м² ($N = 11880$) – с одинаковой мощностью $P_{\text{изл1}}$, так что различается подводимая для этих антенн общая мощность. Для указанных условий на рис. 1, 2 приведены дистанционные зависимости плотности потока мощности для различных фокусировок. Пунктирной линией показана зависимость плотности потока мощности для коллимированной антенной решётки, сплошной линией – сфокусированной антенной решётки.

Из представленных материалов видно, что эффект фокусировки очевиден при фокусных расстояниях до 50 м. Расчёты показали, что плотности потока мощности относительно коллимированного луча увеличивается с 20 до 35 дБ для апертуры площадью 1 м², с 25 до 38 дБ для апертуры площадью 2 м² и с 30 до 45 дБ для апертуры площадью 4 м² соответственно.

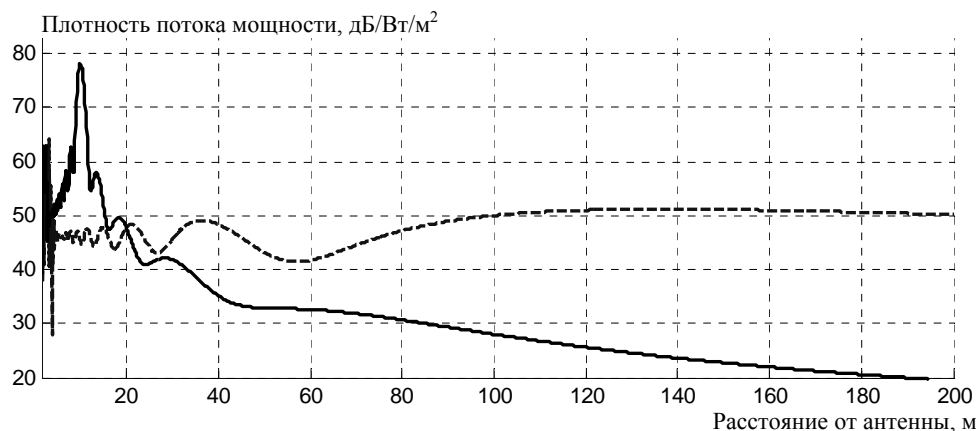


Рис. 1. Дистанционная зависимость плотности потока мощности для апертуры площадью 1 м², фокусное расстояние 10 м, общая мощность подводимых к решётке сигналов $P_{\text{изл}} = 15,6$ кВт

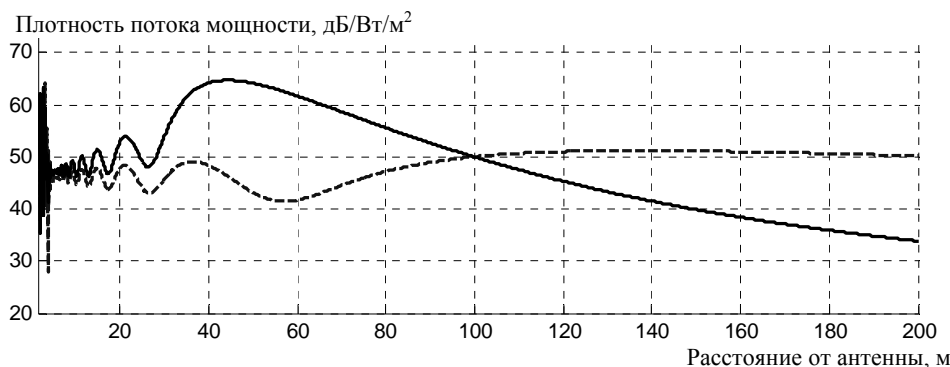


Рис. 2. Дистанционная зависимость плотности потока мощности для апертуры площадью 1 м², фокусное расстояние 50 м, общая мощность подводимых к решётке сигналов $P_{\text{изл}} = 15,6$ кВт

Указанный выигрыш в плотности потока мощности относительно коллимированного луча позволяет уменьшить общую мощность сигналов, подводимых к антенным элементам решётки. Например, для сфокусированной на 50 м антенной решётки подводимая мощность может быть уменьшена до 156 Вт, в то время как для коллимированной антенной решётки необходимо 15,6 кВт для формирования той же плотности потока мощности.

В таблице приведены для сравнения оценки плотности потока мощности по результатам численного моделирования коллимированной и сфокусированной антенной решётки. Эффективность использования сфокусированной антенной решётки выразим отношением плотности потока мощности сфокусированной апертуры и к плотности потока мощности коллимированного луча.

**Результаты оценки плотности потока мощности
и эффективности сфокусированного луча относительно коллимированного луча**

Площадь апертуры антенной решётки, м ²	1	2	4
Эффективность $\mathcal{E} = P_{\text{фокус}} - P_{\text{коллим}}$, дБ	12	18	25
Излучаемая мощность $P_{\text{изл}}$ в коллимированном луче, кВт	15,0	25,0	45,0
Излучаемая мощность в луче сфокусированной апертуры $P_{\text{изл_фокус}} = P_{\text{изл}} / \mathcal{E}$, кВт	1,0	0,4	0,14
Диаметр сгустка поля в поперечной плоскости в точке фокусировки, м	0,28	0,20	0,14
Средняя плотность потока мощности в точке фокусировки, Вт/см ²	1,62	1,29	0,93
Средняя плотность потока мощности на апертуре антенны, мВт/см ²	100	20	3,3

Из таблицы видно, что эффективность сфокусированной апертуры зависит от соотношения размера излучающей апертуры и фокусного расстояния. Кроме того, минимальная эффективность

наблюдается на наибольших дистанциях, где эффект фокусировки в значительной мере уже ослаблен. На небольших дальностях эффективность значительно возрастает.

Таким образом, показатель эффективности сфокусированной апертуры составляет от 12 до 25 дБ для площади апертуры антенной решётки от 1 до 4 м² соответственно. Сфокусированная апертура в пространстве образует узкое в поперечном направлении пятно, вытянутое в продольном направлении (продольная ширина пятна составляет от 1 до 10 м по уровню – 3 дБ).

Литература

1. Должиков В.В. Продольное распределение интенсивности поля в зоне Френеля круглой сфокусированной апертуры // Радиотехника. – 1998. – № 106. – С. 97–108.
2. Веденькин Д.С. Активные сфокусированные антенные решётки для радиотехнических средств малоразмерных летательных аппаратов / Д.С. Веденькин, Ю.Е. Седелников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006. – № 4. – С. 60–66.
3. Фролов О.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 496 с.

Аникин Алексей Сергеевич

Ассистент каф. радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Тел.: 8 (383-2) 41-39-69

Эл. почта: rbk@sibmail.com

Крутиков Михаил Владимирович

Зав. лаб. распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8 (383-2) 41-39-69

Эл. почта: rwplab@sibmail.com

Anikin A.S., Krutikov M.V.

Efficiency of focusing plane active phased arrays along the optical axis in the near field

The estimates of the power density of electromagnetic near-field for planar antenna array with a focused and collimated beam are described. A comparative analysis focused on antenna arrays has proved that focusing antenna array allows to reduce the signal power supplied to the elements of the antenna array from 20 dB to 45 dB.

Keywords: antenna array, focusing, collimated beam focusing efficiency, power density.