ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВСЕНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Ю.А. Костычев¹, Е.С. Попов²

¹ОмПО «Радиозавод им. А.С. Попова», Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Предложен метод расширения рабочего диапазона всенаправленной системы антенн круговой поляризации. Рассмотрены эффекты взаимного влияния излучателей системы антенн, а также обоснован выбор их пространственного размещения и количества.

Ключевые слова: антенно-фидерные устройства, антенная решетка, всенаправленность, электрический радиус.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF ALL-DIRECTIONAL ANTENNA SYSTEMS

Yu.A. Kostychov¹, E.S. Popov²

¹OmPO "A.S. Popov Radio Manufacturing Plant", Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

A method for expanding the working range of an all-directional system of circularly polarized antennas is proposed. The effects of the mutual influence of the emitters of the antenna system are considered, and the choice of their spatial location and quantity is justified.

Keywords: antenna feeder devices, antenna array, all-directionality, electric radius.

Применение антенно-фидерных устройств (АФУ) круговой поляризации при построении радиотрасс обеспечивает защищенность последней от интерференционных замираний, возникающих в движении, изменении высоты, работе широкополосными сигналами и т.п. ввиду подавления отраженного сигнала от подстилающей поверхности и прочих близ расположенных к АФУ металлических предметов.

Построение всенаправленного АФУ круговой поляризации возможно на базе [1]:

- наклонных вибраторных антенн (как электрических, так и магнитных);
- комбинации электрического и магнитного излучателей (штыревой и горизонтальной рамочной антенн);
- при квадратурном возбуждении излучающей части (турникетный излучатель и т. п.);
- системы излучателей, круговая поляризация которых обусловлена их геометрией (спиральные антенны).

Все описанные подходы, кроме последнего, отличаются достаточно узким рабочим диапазоном, ввиду либо ограниченной полосы самого излучателя, либо ограничения полосы устройств, обеспечивающих квадратурное сложение (направленный гибридный ответвитель и т. п.)

Спиральные антенны отличаются сверхширокополосным рабочим диапазоном с перекрытием 1:10 и более [2]. Широкополосность всенаправленной системы спиральных излучателей, расположенных в виде кольцевой антенной решетки (АР), обусловлена не столько широкополосностью антенных элементов (АЭ), сколько влиянием эффекта увеличения электрического радиуса решетки с ростом частоты. Влияние на всенаправленные свойства АР показано в [3] на примере всенаправленных систем логопериодических антенн (ЛПА) нескольких диапазонов (см. рис. 1а)

Рис. 1. Системы всенаправленных ЛПА:

(1 – система ЛПА диапазона I, 2 – система ЛПА диапазона II, 3 – стойка) (а) и пример всенаправленной системы ЛПА из двух антенн (б)

Рассматриваемая в настоящей работе всенаправленная антенна круговой поляризации представляет собой синфазную эквидистантную кольцевую антенную решетку АЭ1 с фиксированными фазовыми центрами (см. рис. 2а). Для обеспечения работоспособности антенна также может содержать делитель мощности и фидеры (на рисунке не показаны, фидеры могут быть исключены из конструкции при непосредственном подключении АЭ1 к делителю мощности), либо антенна может содержать отдельные фидерные тракты (по количеству АЭ1), которые подключаются к приемнику/передатчику. АЭ1 запитаны синфазно и каждый АЭ1 электрически соединен своим окончанием с соседним. На рис. 2а также обозначена излучающая щель (2) АЭ1 и микрополосковая линия (3). На рис. 2б показан пример конструкции на основе представленной антенны, в которой дополнительно введен диэлектрический каркас (4), металлическое основание (5), металлическая крышка (6), радиопрозрачный кожух (7), металлический корпус (8) и крепление к антенно-мачтовому устройству (9).

Рис. 2. АР из трёх спиральных щелевых двухзаходных излучателей печатного исполнения (а) и монтажный рисунок АР (б)

В качестве АЭ1 могут быть использованы магнитные (щелевые) или электрические излучатели с фиксированными фазовыми центрами. В качестве конкретного примера реализации рассматривается антенна, включающая АЭ1 в виде двухзаходных спиральных антенн (с круговой поляризацией).

Количество и взаимное расположение АЭ1 определяют широкополосность антенны в смысле сохранения квазивсенаправленной формы ДН в азимутальной плоскости. Причём широкополосность кольцевой антенной решетки ограничена не только широкополосностью АЭ1, а также взаимным удалением фазовых центров АЭ1. Это обусловлено следующим.

Для сохранения круговой поляризации наибольшая длина волны рабочего диапазона связана с максимальным габаритным размером АЭ1 следующим соотношением [2]:

$$\frac{2\pi a}{1,5} \geq \lambda_n, \quad (1)$$

где $2a$ – габаритный размер антенного элемента; λ_n – длина волны, соответствующая нижней рабочей частоте антенны.

Верхнюю рабочую частоту (соответствующую наименьшей длине волны рабочего диапазона) ограничивает то, что с ростом частоты растёт и электрическое расстояние между фазовыми центрами АЭ1, что, в свою очередь, вызывает организацию побочных максимумов/минимумов в азимутальной ДН и, следовательно, ухудшение ее равномерности. Согласно [3], расстояние между фазовыми центрами АЭ1 не должно превышать половины длины волны, т. е. справедливо следующее выражение:

$$\frac{2\pi R}{N} \leq \lambda_v/2, \quad (2)$$

где R – электрический радиус кольцевой антенной решетки; N – количество АЭ1; λ_v – длина волны, соответствующая верхней рабочей частоте антенны.

Из геометрических соображений радиус кольцевой антенной решетки определяется как

$$R = \frac{a}{tg(\frac{\pi}{N})}. \quad (3)$$

Соответственно коэффициент перекрытия рабочего диапазона, равный отношению наибольшей частоты диапазона рабочих частот к наименьшей частоте этого же диапазона, определяется следующим выражением:

$$k = \frac{N \cdot tg \frac{\pi}{N}}{3}, \quad (4)$$

где k – коэффициент перекрытия рабочего диапазона частот.

Согласно рис. 3 (пунктирная линия), наибольший коэффициент перекрытия (соответствующий наиболее широкому диапазону рабочих частот антенны) обеспечен при количестве АЭ1 равном трём. Одновременно при всенаправленной работе эквивалентная излученная в пространство мощность окажется наибольшей при наименьшем количестве АЭ1. Наибольший коэффициент усиления при сохранении квазивсенаправленной ДН кольцевая антенная решетка будет иметь при наименьшем количестве элементов. Как показывают расчет и натурные эксперименты, два АЭ1 не обеспечивают достаточную равномерность ДН и сохранение круговой поляризации всей кольцевой антенной решетки. Таким образом, наибольший коэффициент усиления при сохранении квазивсенаправленной ДН антенны будет обеспечен при выборе количества АЭ1 равном трём.

При достижении минимума АЭ1 их четное или нечетное количество определяет широкополосность по критерию всенаправленности ДН. Форма ДН в азимутальной плоскости может быть определена согласно (5) [4]:

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N e^{i \frac{2\pi}{\lambda} R \cos(\varphi - \frac{2\pi n}{N})}, \quad (4)$$

где $F(\varphi)$ – ненормированная ДН эквидистантной кольцевой антенной решетки по азимутальному углу φ ; $n = 1, \dots, N$ – порядковый номер АЭ; λ – рабочая длина волны.

Вычисленные значения коэффициента перекрытия (нижняя граница рабочего диапазона выбрана согласно (1), верхняя – из условия сохранения равномерности (неравномерность не более 3 дБ) ДН, определенной (5)), приведены на рис. 3 сплошной линией.

Рис. 3. Зависимость коэффициентов перекрытия от количества элементов кольцевой решетки

Анализ рис. 3 (сплошная линия) показывает, что наибольший коэффициент перекрытия соответствует нечетному количеству АЭ (поскольку при четном количестве АЭ и их эквидистантном размещении в кольцевой антенной решетке количество противофазных векторов напряженности поля одинаково и они компенсируют друг друга, для нечетного же количества АЭ остается некомпенсированный вектор напряженности поля).

На основании вышеизложенного количество АЭ должно быть минимальным и нечетным для обеспечения наибольшей широкополосности при сохранении квазивсенаправленной формы ДН антенны, что подтверждается проведенными исследованиями, результаты которых приведены на рис. 5, 6.

Анализ результатов натурных экспериментов и электродинамического моделирования (рис. 4, 5) в среде, реализующей метод конечных элементов (FEM), а также аналитического расчета множителя решетки кольцевой АР показывает:

- 1) форму (равномерность) ДН в азимутальной плоскости в основном определяет множитель решетки (которая образует систему АЭ);
- 2) для обеспечения наибольшей широкополосности антенной системы необходимо минимизировать электрический радиус АР, а также выбрать количество АЭ – нечетным.

Рис. 4. Форма диаграммы направленности АР из четырех АЭ по результатам:

- а) натурного эксперимента (сплошная линия – ДН на частоте 645 МГц, линия точек – на частоте 695 МГц);
- б) моделирования (неравномерность не более 3 дБ, частота 645 МГц);
- в) аналитического вычисления множителя решетки (частота 695 МГц)

Рис. 5. Форма диаграммы направленности АР из трёх АЭ по результатам:
а) натурального эксперимента (неравномерность не более 3 дБ, частота 695 МГц);
б) моделирования (неравномерность не более 1,5 дБ, частота 645 МГц;
в) аналитического вычисления множителя решетки (частота 645 МГц)

Рис. 6. Возможные варианты построения системы АЭ со сближенными фазовыми центрами для большего расширения рабочего диапазона

Неравномерность на частоте 1200 МГц Равномерность на частоте 1100 МГц

Рис. 7. Диаграммы направленности системы трех антенных элементов в зависимости от частоты

Рис. 8. График результата расширения рабочей полосы в область нижних частот при использовании метода «самонагружения» АЭ

Рис. 9. Внешний вид ОО антенны: а) сбоку; б) спереди

Следующая часть доклада посвящена взаимному влиянию АЭ.

Рис. 10. Графики КСВ АЭ и их системы, а также зависимость изоляции между антенными элементами

Парадоксальным является крайне высокий уровень рассогласования с фидерным трактом у АР при высоком уровне согласования АЭ (КСВн на уровне 1,5), самого тракта (КСВн порядка 1,25), присутствия изоляции между АЭ (10–15 дБ). Улучшения уровня КСВ до 2,5 по выходу АР можно добиться, помещая в центр АР рефлектор, изолирующий АЭ друг от друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of antenna technologies. Published by Zhi Ning Chen – Springer reference, 2016.
2. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Сов. радио, 1974.
3. Патент на изобретение RU2587495, МПК H01Q11/10, H01Q21/20, опубл. 20.06.2016.
4. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989.