

**ПОСТРОЕНИЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПОЛУВОЛНОВОЙ И ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОЙ
КВАДРИФИЛЯРНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С
МНОГОПРОВОДНЫМИ СПИРАЛЬНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ
ДЛЯ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК КОМПЛЕКСОВ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

М.А. Кудряшов¹

О.А. Белоусов¹

К.В. Скоморохов¹

А.Ю. Дмитриевцев¹

¹*Тамбовский государственный технический университет
392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Email: maximkudryashov969@gmail.com*

Аннотация : проведен анализ возможности применения метода построения феноменологической модели для проектирования антенных систем метеорологических станций. Описаны этапы построения феноменологической модели полуволновой и четвертьволновой квадрифилярной спиральной антенны, где каждый спиральный излучатель образован из нескольких проводников. Выведена результирующая диаграмма направленности квадрифилярного излучателя в аналитическом виде. На основе полученного выражения результирующей диаграммы направленности проведено компьютерное моделирование двух моделей излучателей.

В настоящее время обеспечение радиолокационных метеорологических комплексов требует своевременного обновления и улучшения антенных систем, входящих в данные комплексы. Для этого необходимо применять различные подходы и методы синтеза антенных систем. Существует достаточно много методов и подходов, направленных на синтез различных антенных структур, однако большинство этих методов используют в своей основе методы конечных элементов, натурального моделирования, методы связанные со строгим решением электродинамических задач, а также методы которые используют в своей основе построение физической модели. Не всегда такие методы можно применить при разработке новых излучателей, так как они – в первом случае достаточно громоздки в вычислениях, а во втором необходимо построение непосредственно физической модели. Предлагаемый подход в данной работе направлен на построение феноменологической модели излучателя.

Используя предлагаемые модели можно достаточно легко и оперативно синтезировать различные антенные структуры без сложных математических расчётов. Этот метод существенно сокращает время разработки новых антенных структур и позволяет портативно произвести оценку основных электродинамических характеристик излучателей, а в ряде случаев получить и геометрические параметры [1].

В качестве примера реализации данного подхода рассмотрим создание феноменологической модели спиральной антенны с многопроводными спиральными излучателями, базируясь на основе квадрифилярного излучателя. В результате работы будут смоделированы излучатели двух видов: четвертьволновой и полуволновой. Оба излучателя будут работать в резонансном режиме.

Для соблюдения условий резонанса на центральной частоте на концах спиральных излучателей имеются разные электрические режимы. Сами излучатели замкнуты с двух сторон, так как антенна функционирует как отрезок линии передачи, которая закорочена с двух сторон: роль одного короткозамыкателя выполняет основание антенны, а второго – перемычка сверху.[5]

Квадрифилярные спиральные антенны (КСА) широко известны как антенны, имеющие круговую поляризацию, хорошую направленность излучения, а так же малые габаритные показатели. КСА представляет из себя антенную систему, состоящую из 4-х спиральных излучателей, сдвинутых относительно друг друга на 90 градусов[1]. Роль возбуждителя спиральных излучателей на себя берут элементы питания, которые расположены на основании антенны. Напряжение на них формируются специальной схемой питания. В дальнейшем будут рассматриваться феноменологические модели КСА на основе многопроводных спиральных излучателей.

Для выполнения поставленной задачи необходимо получить результирующую диаграмму направленности квадрифилярного спирального излучателя в аналитическом виде. Это необходимо для того, чтобы во время компьютерного моделирования получить результаты максимально приближенные к реальной физической модели.

Под понятием феноменологической модели квадрифилярной спиральной антенны будем понимать модель, которая верно показывает основные явления, происходящие в моделируемой антенне, однако из-за того, что при моделировании учитываются не все параметры антенны, результат моделирования нельзя считать исключительно достоверным.

В данной вариации КСА спиральные излучатели состоят из нескольких проводников, намотанных по спирали, что должно позволить осуществить независимую настройку входного сопротивления антенны и облегчить её согласование со схемой питания.

Чтобы облегчить процесс расчета диаграммы направленности примем наш излучатель за плоскую прямолинейную эквидистантную равноамплитудную антенную решетку, так как используются 4 идентичных спиральных излучателя на одинаковом расстоянии друг от друга. В таком случае для получения результирующей диаграммы направленности воспользуемся теоремой перемножения диаграмм направленности. Тогда результирующая ДН примет вид [3,4]

$$F(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где $f_1(\theta, \varphi)$ – результирующая диаграмма направленности одного излучателя; $f_c(\theta, \varphi)$ – множитель антенной решетки.

Векторная ДН излучателя имеет вид

$$f_1(\theta, \varphi) = J_0(ka \cdot \sin\theta) \cdot \cos\theta, \quad (9)$$

где J_0 - функция Бесселя нулевого порядка; k - волновое число свободного пространства; a - радиус спирали.

Для определения множителя антенной решетки примем N_x и N_y за число излучателей в столбцах и рядах соответственно. Так же примем D_x и D_y за расстояние между соседними излучателями по осям OX и OY . θ_x и θ_y являются углами, отсчитываемыми от точки наблюдения от осей OX и OY . Затем примем каждый столбец излучателей за линейную антенную решетку. Тогда множитель такой антенной решетки можно записать как

$$F_{Cx}(\theta_x) = \sin \dots \quad (10)$$

В таком случае произведя эквивалентную замену каждого столбца плоской антенной решетки на излучатель с собственной ДН, которая совпадает с (3), мы получим линейную антенную решетку, которая будет ориентирована вдоль оси OY . Затем воспользовавшись теоремой о перемножении диаграмм направленности мы получим

$$F_C(\theta_x, \theta_y) = F_O(\theta_x) F_{Cy}(\theta_y), \quad (11)$$

где $F_O(\theta_x)$ - ДН излучателя; $F_{Cy}(\theta_y)$ - множитель антенной решетки, состоящей из излучателей. В таком случае $F_{Cy}(\theta_y)$ имеет вид

$$F_{Cy}(\theta_y) = \sin \dots, \quad (12)$$

Далее введем обозначение обобщенных угловых координат

$$U_x = k d_x \cos\theta_x - \alpha_x; \quad U_y = k d_y \cos\theta_y - \alpha_y. \quad (13)$$

Подставив (19) в (16) и (18) определим множитель плоской антенной решетки

$$F_C(U_x, U_y) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} U_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2} U_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2} U_x\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2} U_y\right)}, \quad (14)$$

Однако необходимо учитывать то, множитель антенной решетки в сферической системе координат не является функцией углов θ_x и θ_y . [1] В таком случае необходимо определить связь между углами θ_x и θ_y и углами θ и φ . Если учесть, что $\cos\theta_x$ и $\cos\theta_y$ являются

проекциями единичного вектора \vec{e}_0 [2], который ориентирован в направлении осей OX и OY , то получим

$$e_x^0 = \sin \theta_x; \quad e_y^0 = \sin \theta_y. \quad (15)$$

Тогда, учитывая взаимосвязь между сферической и прямоугольной системами координат, можно выразить проекции единичного вектора \vec{e}_0 через углы θ и φ :

$$e_x^0 = \sin \theta \cos \varphi; \quad e_y^0 = \sin \theta \sin \varphi. \quad (16)$$

Тогда, учитывая все вышесказанное, получаем выражение для множителя антенной решетки в сферической системе координат

$$F_c(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin \theta \cos \varphi - \alpha_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin \theta \sin \varphi - \alpha_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin \theta \cos \varphi - \alpha_x)\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin \theta \sin \varphi - \alpha_y)\right)}, \quad (17)$$

Теперь, определив множитель антенной решетки, и подставив выражения (16) и (17) в выражение (8), получаем результирующую диаграмму направленности квадрифилярного спирального излучателя [1]

$$F(\theta, \varphi) = (J_{i,i} 0(k a \cdot \sin \theta) \cdot \cos \theta) \times \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin \theta \cos \varphi - \alpha_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin \theta \sin \varphi - \alpha_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin \theta \cos \varphi - \alpha_x)\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin \theta \sin \varphi - \alpha_y)\right)}, \quad (18)$$

Для анализа электродинамических характеристик данных излучателей в программном комплексе Matlab были смоделированы две квадрифилярные спиральные антенны: полуволновая и четвертьволновая КСА. Их внешний вид показан на рисунке 1а и 1б соответственно.

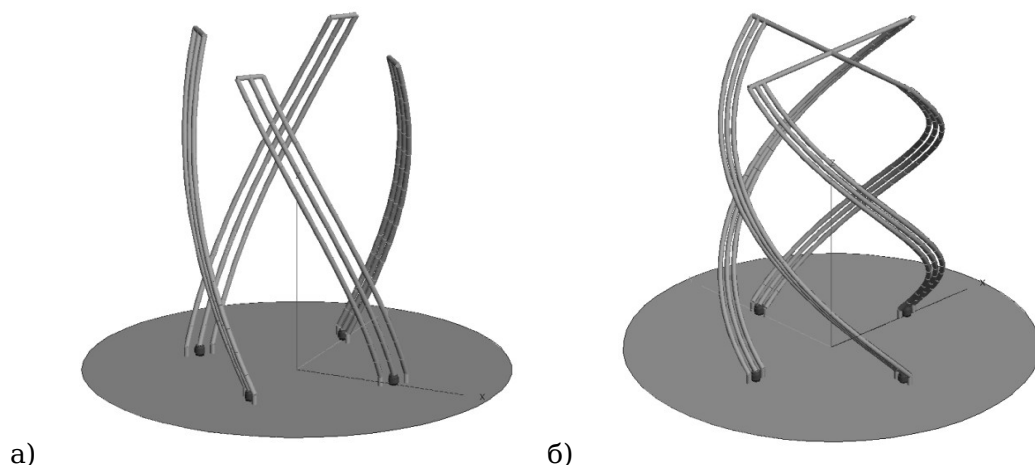


Рисунок 1 – Внешний вид КСА

Обе модели КСА работают в резонансном режиме. В случае с четвертьволновой КСА антенна выступает резонатором в отрезке линии передачи, он закорочен с одной стороны и разомкнут с другой. Роль короткозамыкателя в данном случае выполняет основание антенны. Полуволновая КСА работает аналогичным способом, действуя как отрезок линии передачи, который замкнут с обеих сторон[4].

В результате моедирования были получены следующие результаты.

Модель четвертьволновой квадрифилярной спиральной антенны обладает коэффициентом усиления 2.5 дБи, её диаграмму направленности (ДН) можно увидеть на рисунке 2.

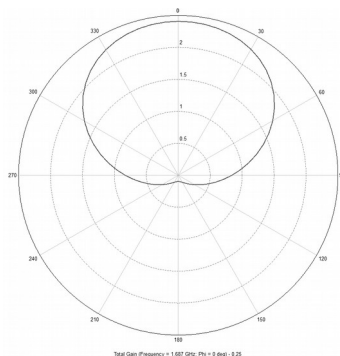


Рисунок 2 – ДН четвертьволновой КСА

Геометрические размеры данной антенны: высота спирали – 61 мм, радиус спирали – 19 мм.

Согласно результатам моделирования данная антенна имеет коэффициент усиления 2.5 дБи, коэффициент стоячей волны (КСВ) не более 2.5 на всем диапазоне частот, а коэффициент отражения равен -4 дБ на центральной частоте.

Полуволновая КСА имеет коэффициент усиления 3.5 дБи, её ДН можно увидеть на рисунке 3.

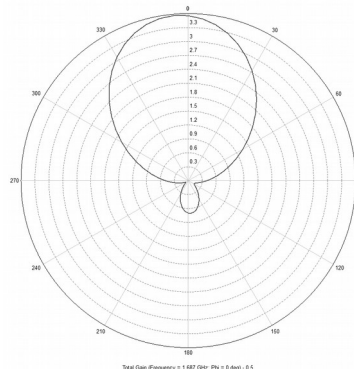


Рисунок 3 – ДН полуволновой КСА

Геометрические размеры полуволновой квадрифилярной спиральной антенны аналогичны четвертьволновой модели.

Электродинамические характеристики данной антенны – КСВ не более 3.5 на всем диапазоне частот и не более 1 на центральной частоте, коэффициент отражения равен -10 дБ на центральной частоте.

Так как оба излучателя интенсивнее излучают в верхнее полупространство, можно сказать, что обе антенны имеют хорошую направленность. Так же обе антенны обладают симметрией поворота. Оба излучателя являются взаимными, так как они не имеют невзаимных сред. Эти факторы позволяют уменьшить число элементов матрицы рассеяния, что в свою очередь облегчает процесс моделирования данных излучателей[3].

Использование такого метода построения феноменологических моделей позволит синтезировать сложные антенные системы и комплексы без использования методов натурального моделирования и без построения физических моделей, так как это подход показывает максимально приближенные к реальной физической модели результаты, в которых расхождение с физической моделью составляет менее пяти процентов. В свою очередь благодаря использованию предлагаемого метода, можно оперативно синтезировать антенные структуры которые будут иметь хорошую повторяемость и линейность электродинамических характеристик при трансформации феноменологических моделей в физические. На основе выше изложенного подхода была синтезирована антенная решетка для комплекса метеорологического обеспечения которая показала свои высокие электродинамические характеристики и позволила существенно расширить функциональные возможности данной РЛС в целом

Список литературы

1. Антенны : учебное пособие / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов [и др.]. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 412 с.
2. О.А. Белоусов Применение алгоритмов нечеткой логики в системе управления диаграммообразующим устройством гибридной зеркальной антенны/О.А. Белоусов, Е.В. Рязанов, А.С. Колмыкова, А.И. Дякин // Программные продукты и системы № 4 Т. 31. 2018. стр.757-762 DOI: 10.15827/0236-235X.031
3. M. Caillet, M. Clnet, A. Sharaiha, Y. M. M. Antar, "A broadband folded printed quadrifilar helical antenna employing a novel compact planar feeding circuit", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 7, pp. 2203-2209, Jul. 2010.
4. F. Shi-qiang, F. Shao-jun, L. Kai, W. Zhong-bao, "Printed quadrifilar helix antenna with integrated feed network", Proc. 3rd IEEE Int. Symp. Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, pp. 67-69, 2009.
5. Y. Letestu, A. Sharaiha, "Multiband printed quadrifilar helical antenna", Electron. Lett., vol. 46, pp. 885-886, 2010.