

**ПЛОСКИЙ ЭЛЕМЕНТ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ**

**FLAT ELEMENT OF MULTIFUNCTIONAL ANTENNA ARRAY
WITH CONTROLLED RADIATION POLARIZATION**

Аннотация. В статье исследован оригинальный антенный элемент для использования в составе многофункциональной антенной решетки. Приведена математическая модель модифицированного спирального элемента и произведено его электродинамическое моделирование. Показано, что разработанный антенный элемент удовлетворяет требованиям, предъявляемым к элементам антенной решетки, а также позволяет производить управление поляризацией излучаемого поля.

Summary. An original antenna element for a multifunctional antenna array is proposed in the paper. The mathematical model of a modified spiral flat antenna element is presented as well and electromagnetic modeling of the element is done. It is shown that the element satisfies the requirements to be used as an element of antenna array and also realizes the control of radiated field polarization.

Одной из наиболее актуальных задач современных систем радиосвязи является необходимость передачи больших объемов информации с наибольшей эффективностью использования радиочастотного ресурса, а также энергетического потенциала радиоканала. Среди возможных решений, предлагаемых в настоящее время, особо следует отметить технологии пространственно-поляризационной обработки сигналов [1], реализации которой предполагают использование многофункциональных антенных решеток, в том числе формирующих поле излучения с произвольной поляризационной структурой. Создание таких антенн представляет собой определенную проблему, как в теоретическом, так и конструктивном отношении. Отдельного упоминания заслуживает тот факт, что возможность управления поляризацией поля излучения антенн, хотя и является эффективным средством повышения функциональных свойств современных радиотехнических систем, но не есть единственной. Гораздо большей функциональностью сможет обладать антенная система, состоящая из элементов, осуществляющих управление поляризацией, в виде антенной решетки. В данном случае совмещение возможностей формирования требуемых лучей и управления ими (с изменением поляризационной структуры поля) в этих лучах предоставляет обширные области применения предлагаемых антенных систем.

В настоящее время широко распространен метод управления поляризацией излучения антенны с использованием переключателей на *pin*-диодах, которые производят коммутацию соответствующих частей излучающих структур (см., например, [2]). К недостаткам данного подхода можно отнести большую дискретность в значениях коэффициента эллиптичности (КЭ) поля излучения, что в ряде случаев ограничивает возможности радиотехнического устройства. Таким образом, существует необходимость создания антенного элемента, способного осуществлять управление поляризацией излучаемого поля с необходимой точностью.

Целью данной работы является разработка такого элемента антенной решетки, который наряду со способностью управления поляризацией поля отвечал бы требованиям, предъявляемым к элементам антенной решетки, таким как необходимая парциальная диаграмма направленности (ДН), достаточная ширина полосы рабочих частот, малые массо-габаритные параметры, высокая технологичность изготовления и другим.

Прототипом предлагаемой структуры служит спиральный антенный элемент [3] в виде архимедовой спирали (см. рис. 1, а), математическое описание которой может быть представлено в виде:

$$\rho(\varphi) = r_0 + b\varphi, \quad (1)$$

где r_0 – начальный радиус намотки спирали; b – масштабный коэффициент.

В случае логарифмической спирали (см. рис. 1, б), ее уравнение может быть представлено в виде [3]:

$$\rho(\varphi) = r_0 \exp(b\varphi), \quad (2)$$

где r_0 и b имеют тот же смысл.

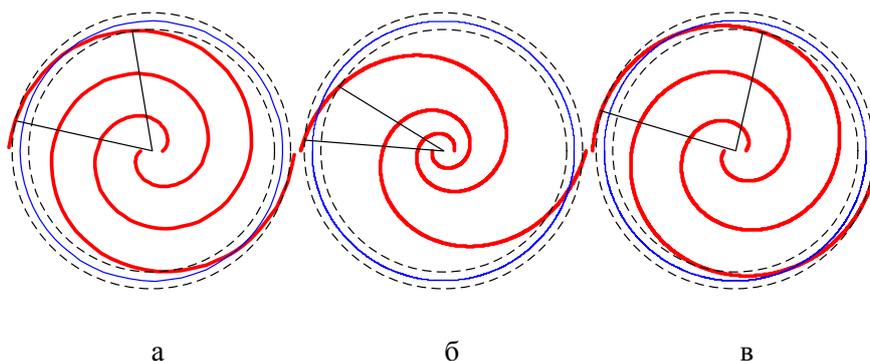


Рисунок 1 – Различные формы спиральной намотки

Для пояснения процесса излучения спиральной структурой воспользуемся моделью активной зоны [3], согласно которой наибольший вклад в излучение спирального антенного элемента вносит участок проводника, длина окружности которого сравнима с длиной волны. При этом условимся, что каждый из спиральных элементов должен иметь одинаковый диаметр, одинаковое количество витков и одинаковый начальный радиус намотки. На рис. 1 сплошной окружностью вблизи края спирального полотна обозначено положение активной зоны, соответствующей нижней частоте рабочего диапазона. Пунктирные линии с внутренней и внешней стороны ограничивают область, в которой длина окружности отклоняется от рассматриваемой длины волны на нижней частоте λ на величину $\pm\lambda/16$. При этом, как видно из рис. 1, а и, тем более, 1, б, область проводника в рассматриваемой зоне не формирует ярко выраженной круговой активной зоны, которая необходима для формирования поля круговой поляризации. Это происходит за счет значительной скорости прироста длины радиус-вектора $\rho(\varphi)$, описывающего спиральную кривую. Анализируя данные зависимости, можно предположить, что если реализовать закон намотки спирали, позволяющий замедлить приращение $\rho(\varphi)$ к краю намотки, то активная зона окажется более выраженной, а, следовательно, повысится эффективность спирального антенного элемента.

Для реализации данного подхода предлагается оригинальный закон намотки спирального элемента в виде:

$$\rho(\varphi) = r_0 \exp(b(1 - \exp(-s\varphi))), \quad (3)$$

где r_0 – начальный радиус намотки спирали; $s > 0$ – параметр сжатия; $b = \ln(R_\Gamma / r_0) / (1 - \exp(-s2\pi n))$ – масштабный коэффициент, при этом n – количество витков спирали; R_Γ – радиус внешней габаритной окружности, ограничивающей размер спиральной намотки.

Двухзаходный спиральный элемент, выполненный на основе (3), изображен на рис. 1, в. В данном случае активная зона становится более выраженной. При этом очевидна возможность формирования еще более однородной активной области на нижних частотах рабочего диапазона за счет введения двух дополнительных спиральных заходов. Это также необходимо для обеспечения возможности управления поляризацией. Направление вращения соответствует направлению намотки спирали. На рис. 2, а изображена спиральная антенна, выполненная согласно вышеупомянутым принципам. В центре элемента схематически показан источник возбуждения, который в действительности представляет две пары входных зажимов, возбуждаемых противофазно или в квадратуре. Для формирования однонаправленного излучения спиральный элемент размещается над экраном (на рис. 2, а экран не показан).

Квадратурное возбуждение витков спирали необходимо для формирования требуемого вида поляризационной структуры излучаемого поля. На рис. 2, б показаны четыре основные схемы распределения фаз возбуждающих ЭДС на входных зажимах.

Каждая из представленных на рис. 2, б схем соответствует определенному виду поляризации поля. Так, две верхние схемы при одинаковых амплитудах возбуждающих ЭДС на зажимах намоток соответствуют формированию поля ортогональных линейных поляризаций. Две нижние схемы соответствуют круговым поляризациям противоположного направления вращения.

При этом следует отметить, что короткое замыкание зажимов одной из намоток позволяет, возбуждая лишь одну пару зажимов, формировать поле линейной поляризации. Наклон плоскости линейной поляризации в данном случае относительно плоскости линейной поляризации, созданной с помощью верхних схем составляет 45° . Изменение поляризации на ортогональную в данном случае может быть реализовано путем переключения возбуждения ко второй намотке и закорачиванию зажимов первой. Управление КЭ поля вращающейся поляризации осуществляется за счет регулирования соотношения амплитуд возбуждающих ЭДС при сохранении требуемой схемы возбуждения.

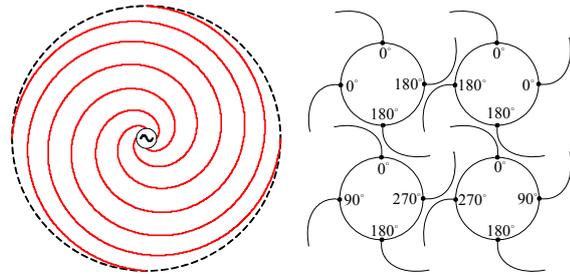


Рисунок 2 — Внешний вид четырехзаходного спирального антенного элемента и схемы возбуждения

Таким образом, при практической реализации антенных систем на основе предлагаемого антенного элемента возможны, например, управление поляризацией за счет коммутации возбуждающих воздействий. При этом может быть сформировано поле линейной поляризации с углом наклона плоскости поляризации кратным 45° . Плавное изменение наклона плоскости линейной поляризации требует изменения амплитудного соотношения возбуждающих ЭДС. Кроме того, возможен вариант возбуждения для плавного изменения КЭ поля вращающейся поляризации за счет управления амплитудным соотношением.

Следует заметить, что управление КЭ поля вращающейся поляризации не изменяет ориентации поляризационного эллипса. Его положение можно изменить на ортогональное лишь, изменив амплитудное соотношение между ЭДС возбуждения ортогональных намоток на противоположное. Плавное изменение наклона поляризационного эллипса реализуется за счет управления фазовыми соотношениями возбуждающих ЭДС.

На этапе выбора и оптимизации параметров антенного элемента использовался метод моментов [4].

Исследуемый спиральный антенный излучатель был смоделирован, после чего путем целенаправленного поиска оптимальных параметров были подобраны такие размеры элемента, которые удовлетворяли заданным требованиям. Так, антенный элемент предполагается использовать в антенной решетке базовой станции стандарта GSM 900, в частности, полоса частот антенного элемента должна быть шире чем полоса 890-960 МГц.

Частотные зависимости составляющих входного сопротивления оптимизированного элемента изображены на рис. 3,а, где активная часть входного сопротивления в широкой полосе частот остается близкой к значению 300 Ом, в то время как мнимая часть входного сопротивления на этом участке близка к 0. КСВ в линии, соответствующий элементу с подобранными параметрами показан на рис. 3,б. Как видно из рис. 3,б, КСВ сохраняется достаточно низким в полосе частот около 30%, что позволяет говорить о достаточной широкополосности предлагаемого элемента по входным характеристикам. Следует отметить, что широкополосность элемента может быть расширена при смещении полосы рабочих частот в верхнюю область при сохранении его максимальных габаритных размеров.

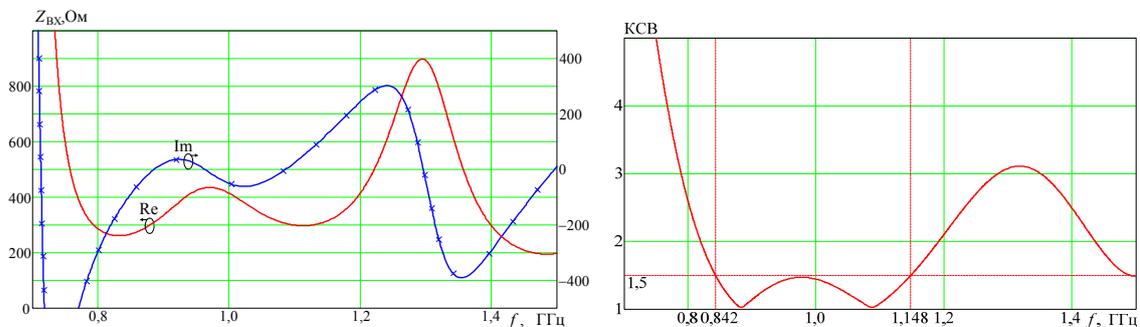


Рисунок 3 – Частотная зависимость входного сопротивления спирального антенного элемента и КСВ

На рис. 4 изображены ДН предлагаемого антенного элемента. Характеристика направленности сохраняется практически неизменной во всей полосе рабочих частот, ограниченной входным сопротивлением. Таким образом, свойства спирального элемента, заключающиеся в смещении активной области при изменении частоты возбуждения, сохраняются для данного антенного элемента.

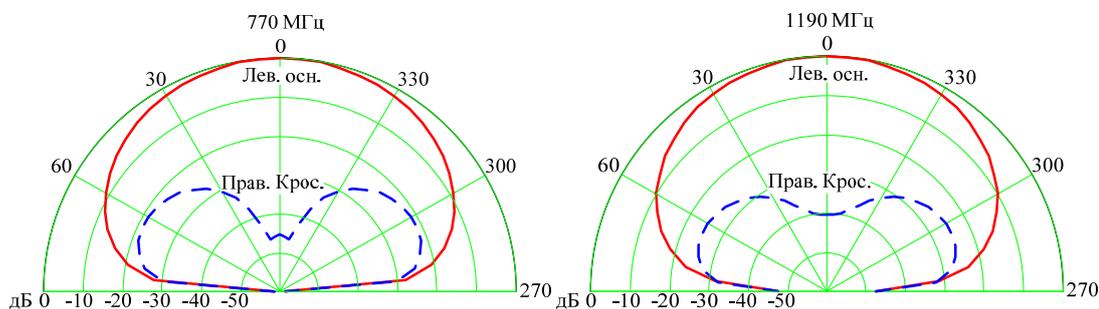


Рисунок 4 – ДН спирального элемента на крайних частотах рабочего диапазона

Также установлено, что предлагаемый антенный элемент позволяет управлять параметрами поляризационной структуры излучаемого поля и при этом отвечать всем остальным требованиям, предъявляемым к элементам антенной решетки. Так, данный антенный элемент формирует ДН с шириной главного лепестка по уровню -10 дБ, равной 120° , что соответствует ширине ДН используемых в настоящее время антенн базовых станций. Кроме того, ширина рабочей полосы частот элемента равна 30%. Максимальный размер антенного элемента на нижней частоте рабочего диапазона составляет около $0,37\lambda$ (без учета экрана). В дополнение можно отметить, что технологически данный антенный элемент может быть изготовлен в виде печатного проводника на диэлектрической подложке. Данный способ является недорогим, а изготовленные элементы обладают высокой механической прочностью и долговечностью.

В заключение отметим, что в дальнейшем планируется исследование свойств малоэлементной антенной решетки, составленной из предложенных антенных элементов. Для расширения функциональности антенной решетки, а также для упрощения реализации схемы возбуждения ее элементов разрабатывается метод цифрового диаграммообразования. Управление амплитудой возбуждающих воздействий на зажимах ортогональных намоток в цифровом виде происходит гораздо быстрее и точнее, а затраты на реализацию такой схемы меньше. То же касается управления фазовым соотношением возбуждающих воздействий при реализации управления положением поляризационного эллипса.

Литература

1. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория систем связи / Коростелев А.А. – М.: Радио и связь, 1987. – 254с.
2. Колесников В.Л. Антенный элемент фазированной антенной решетки бортовой радиолокационной станции с переключаемой поляризацией / Колесников В.Л. // Антенны. – 2006. – №6(109). – С. 17 – 19.
3. Юрцев О.А. Спиральные антенны / Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
4. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике / Митра Р. – М.: Мир, 1977. – 488 с.