

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
УДК 621.362
DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-16-26

Оригинальная статья / Original Paper

Оптимизация тепловых режимов резонаторов сверхвысокочастотных цифровых активных фазированных антенных решеток
Х.М. Гаджиев, А.А. Акимов, Э.А. Абдурафиков, Р.Ш. Асалиев, А.М. Магомедов
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование резонаторов для сверхвысокочастотных цифровых активных фазированных антенных решеток (ЦАФАР) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, что позволит оптимизировать параметры антенной системы для более достоверной пеленгации с высокой надежностью любых летательных аппаратов. **Метод.** Использование в качестве резонаторов односторонних поверхностей в форме Мебиуса позволяют реализовать новый тип резонаторов СВЧ диапазона в виде интегрированной ёмкости и двухвитковой индуктивности. Параметры такого резонатора позволяют реализовать бегущую или стоячую волну в зависимости от геометрических размеров. **Результат.** Применение инновационных резонаторов для сверхвысокочастотных цифровых активных фазированных антенных решеток СВЧ диапазона с р-і-п диодами для изменения площади конденсатора позволяет реализовать двухчастотный метод кодово-импульсной модуляции. На основе таких резонаторов можно при одном положении р-і-п диодов реализовать стоячую волну, а при другом, бегущую волну. Такие электромагнитные волны, передаваясь ЦАФАР, могут запеленговать объекты в режиме невидимости. **Вывод.** К применению традиционных резонаторов для ЦАФАР СВЧ диапазона позволяет дискретно регулировать параметры этих резонаторов за счёт включения - выключения р-і-п диодов положительным и отрицательным напряжением для управления частотными свойствами резонаторов и задания режимов бегущей или стоячей волны.

Ключевые слова: резонатор, радиолокация, цифровая активная фазированная антенная решетка, тепловой режим, электромагнитное излучение, линия задержки

Для цитирования: Х.М. Гаджиев, А.А. Акимов, Э.А. Абдурафиков, Р.Ш. Асалиев, А.М. Магомедов. Оптимизация тепловых режимов резонаторов сверхвысокочастотных цифровых активных фазированных антенных решеток. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 16-26. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-16-26

**Optimization of thermal regimes of microwave resonators
digital active phased array antenna**
Kh.M. Gadzhiev, A.A. Akimov, E.A. Abdurafikov, R. Sh. Asaliev, A.M. Magomedov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to simulate resonators for microwave digital active phased antenna arrays (DFAAR) in the microwave range, which will optimize the parameters of the antenna system for more reliable direction finding with high reliability of any aircraft. **Method.** The use of one-sided surfaces in the Mobius shape as resonators makes it possible to implement a new type of microwave resonators in the form of an integrated capacitance and a two-turn inductance. The parameters of such a resonator make it possible to realize a traveling or standing wave, depending on the geometric dimensions. **Result.** The use of innovative resonators for microwave DFAAR with p-i-

n diodes to change the area of the capacitor makes it possible to implement a two-frequency method of pulse-code modulation. On the basis of such resonators, it is possible to realize a standing wave at one position of the p-i-n diodes, and a traveling wave at the other. Such electromagnetic waves, transmitted by the DFAAR, can track objects in the stealth mode. **Conclusion.** The use of traditional resonators for DFAAR of the microwave range allows you to discretely adjust the parameters of these resonators by turning on / off p-i-n diodes with positive and negative voltages to control the frequency properties of the resonators and set the traveling or standing wave modes.

Keywords: resonator, radar, digital active phased antenna array (DFAAR), thermal conditions, electromagnetic radiation, delay line

For citation: Kh.M. Gadzhiev, A.A. Akimov, E.A. Abdurafikov, R.Sh. Asaliev, A.M. Magomedov. Optimization of thermal regimes of microwave resonators digital active phased array antenna. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (4): 16-26. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-16-26

Введение. В современном мире огромную роль играют транспортные средства, перемещающиеся как по земле, так по воде и воздуху, а также в космическом пространстве. Одним из важных факторов перемещения в пространстве является определение точных координат и согласование своих траекторий движения с окружающими транспортными средствами. Для этого существуют различные способы по определению координат на местности для распределения транспортных потоков. Наиболее часто применяется способ радиолокации [1-6].

Современный радиолокатор представляет очень сложное устройство с широкими функциональными возможностями [7,15-21]. Вершиной в этой области является цифровая активная фазированная антенная решетка (ЦАФАР) [8,9], позволяющая за счет электронного сканирования охватить заданный участок небосклона и определить одновременно несколько целей, распределив их по отдельным зонам своей поверхности.

Функционирует ЦАФАР следующим образом: приёмо-передающие модули расположены на плоскости в заданных точках таким образом, что принимает и передает сигнал при помощи электронных задержек [10].

Диаграмма направленности может быть наклонена в любом направлении. Это осуществляется за счет интерференции излучаемых или принимаемых волн [11]. Такой способ имеет определенные недостатки и преимущества. В качестве достоинств можно сказать, что осуществляется быстрая перестройка с пеленгуемых целей в любом направлении [9].

Электронное управление линией задержки позволяет процессору осуществлять сканирование небесного свода в заданном секторе для определения различных целей. Таким образом, основные составные элементы ЦАФАР - это приёмо-передающие устройства с входными цепями вибраторами, расположенными в плоскости; это модуляторы для цифровых решеток, кодово-импульсные модуляторы по частоте, амплитуде или фазе, или фазо-манипулированному сигналу и это линии задержки, позволяющие осуществить в электронном виде более поздний или более ранний прием или передачу радиосигнала с вибраторов [10]. Такой подход является традиционным развитием обычных параболических локаторов или локаторов другой формы (рупорный, спиральный и т.д.) [8].

Постановка задачи. Современные технологии позволяют реализовать инновационные электронные структуры за счет применения 3D принтеров и новых принципов модуляции [14]. Так, например, большой интерес представляют односторонние поверхности в форме листа Мебиуса [13]. Если изготовить входную цепь ЦАФАР в форме такой односторонней поверхности, то можно таким образом подобрать распределенные параметры емкости и индуктивности, что резонансная частота сможет уложиться целое четное или не четное количество полуволн для того, чтобы создать режим бегущей волны или стоячей волны [12]. Также с помощью применения p-i-n-диодов можно таким образом изменять параметры резонатора, что емкость может быть увеличена или уменьшена дискретно, тем самым, можно реализовать два режима работы колебательного контура с большей частотой и меньшей частотой, т.е. осуществить кодо-

во-импульсную частотную модуляцию. Причем частота контура может быть изменена таким образом, что на одной частоте в контуре будет создаваться стоячая волна, а на другой частоте - бегущая волна [7].

Эти режимы будут отличаться тем, что излучаемая электромагнитная волна из этого контура будет иметь либо стационарный характер, либо плоскость поляризации этой волны будет совершать круговое вращение, которое не позволит обычным приемным структурам осуществить пеленгацию этого сигнала, а для этого потребуются только аналогичные структуры, позволяющие принять вращающийся поляризационный сигнал, т.е. такой локатор на основе таких резонаторов способен передавать и принимать сигналы незаметно для локаторов других систем и конструкций [7].

Методы исследования. Резонатор представляет собой замкнутую поверхность Мебиуса, образованную микрополосковой структурой в виде металл-диэлектрик-металл, представленную на рис. 1. Такой конструкцией решается техническая задача повышения резонансных характеристик колебательного контура в режимах бегущей и стоячей волны с изменением плоскости поляризации электромагнитного колебания.

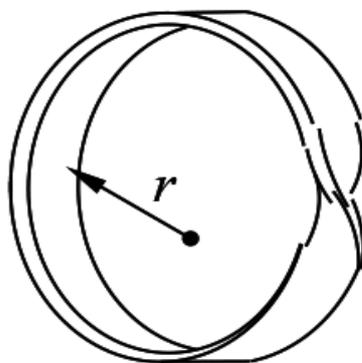


Рис. 1. Резонатор в виде замкнутой поверхности Мебиуса, образованной микрополосковой структурой в виде металл-диэлектрик-металл

Fig. 1. A resonator in the form of a closed Möbius surface formed by a microstrip structure in the form of a metal-dielectric-metal

В резонаторе используется поверхность Мебиуса структуры металл-диэлектрик-металл, причем в каждом поперечном сечении такой поверхности имеется емкостная составляющая, образованная прямоугольным диэлектриком, покрытого с двух противоположных сторон металлическими обкладками. Замыкание в виде односторонней поверхности Мебиуса из этих двух металлических обкладок формирует одну металлическую обкладку в виде двух витков короткозамкнутой индуктивности.

Резонатор сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде поверхности Мебиуса структуры металл-диэлектрик-металл представляет собой замкнутую микрополосковую структуру с перекрученными обкладками на один поворот 180 градусов.

На рис. 2 изображен разрез кольца Мебиуса, на котором показаны геометрические размеры в виде радиуса поперечного сечения r и обозначена половина длины витка индуктивности в виде $l/2$. Также показано, как металлические обкладки 1 вокруг диэлектрического слоя 2 формируют емкостную составляющую контура, и таким образом внешняя обкладка переходит во внутреннюю, а внутренняя во внешнюю. При этом две металлические обкладки превращаются в одну, которая имеет форму индуктивности, состоящей из двух витков, замкнутых друг на друга. Кроме того, показано каким образом р-і-п-диоды позволяют подключать или отключать дополнительную обкладку. Лента Мебиуса может быть уже (диоды закрыты) или шире (диоды открыты) в зависимости от полярности поданного постоянного напряжения на диоды между внутренней основной и внешней дополнительной обкладками.

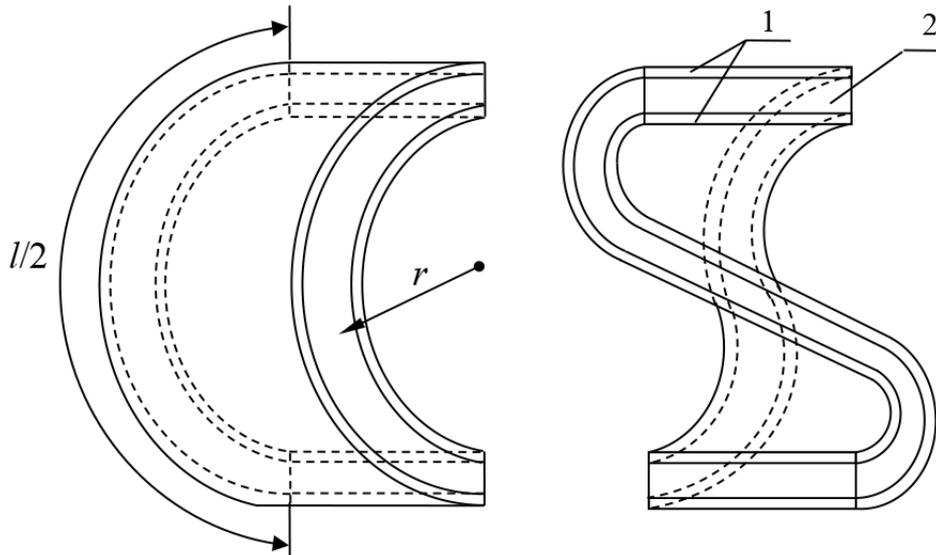


Рис. 2. Разрез кольца Мебиуса с геометрическими размерами в виде радиуса поперечного сечения r и половины длины витка индуктивности в виде $l/2$

Fig. 2. Section of the Moebius ring with geometric dimensions in the form of the cross-sectional radius r and half the length of the inductance loop in the form of $l/2$

На рис. 3 поясняется формирование колебательного контура из емкости и двухвитковой индуктивности и приведены толщина h и ширина d емкости с указанием металлической обкладки 1 и диэлектрического слоя 2.

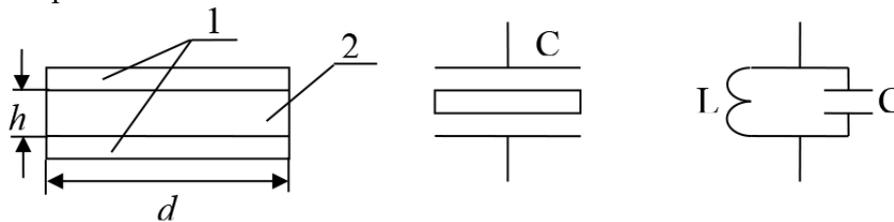


Рис. 3. Формирование колебательного контура из емкости C и двухвитковой индуктивности L , где толщина h и ширина d емкости с указанием металлической обкладки 1 и диэлектрического слоя 2

Fig. 3. Formation of an oscillatory circuit from a capacitance C and a two-turn inductance L , where the thickness h and width d of the capacitance, indicating the metal plate 1 and dielectric layer 2

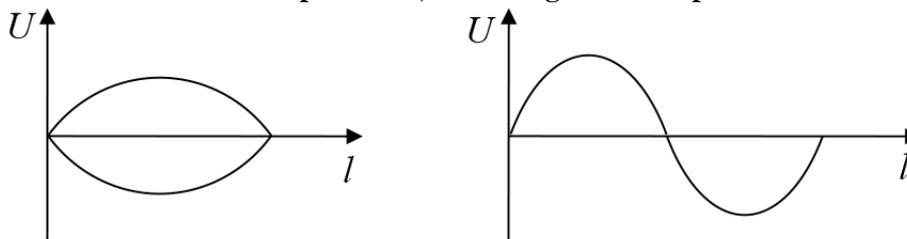


Рис. 4. Виды колебаний: стоячая и бегущая волны

Fig. 4. Vibration modes: standing and traveling waves

На рис. 4 изображены оба вида колебаний: стоячая и бегущая волны. По оси абсцисс откладывается длина двухвитковой индуктивности, а по оси ординат откладывается уровень генерируемого колебания. Изменение индуктивности будет сопровождаться изменениями и емкости контура, т.к. все параметры индуктивности одновременно являются и параметрами емкости. Некоторые параметры емкости могут быть изменены без влияния на величину индуктивности, так, при изменении ширины или толщины диэлектрика и обкладок, параметры индуктивности будут сохраняться, а у емкости будут изменяться.

Таким образом, имеется возможность независимого подбора частоты электромагнитных колебаний в резонаторе за счет изменения отдельно параметров емкости. Расчет электрофизических параметров резонатора (индуктивности, емкости и частоты) можно провести по следующим формулам [7]:

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 \cdot S}{l}, \quad (1)$$

где L – индуктивность, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость, N – число витков, S – площадь сечения контура, l – длина катушки.

Если
$$S = \pi \cdot r^2, \quad (2)$$

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r \Rightarrow r = \frac{l}{2\pi}, \quad (3)$$

тогда, после подстановки получим:

$$S = \frac{\pi \cdot l^2}{4\pi^2} = \frac{l^2}{4\pi}. \quad (4)$$

Подставив данное значение в формулу (1) индуктивности для $N=2$ виткам, получим:

$$L = \mu_0 \mu \frac{2^2 \cdot \frac{l^2}{4\pi}}{l} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot l}{\pi}. \quad (5)$$

Емкость колебательного контура резонатора равна:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot d}{h}, \quad (6)$$

где C – емкость, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, h – толщина диэлектрика, l – длина обкладки, d – ширина обкладки емкости.

Подставляя эти значения в формулу по вычислению частоты колебательного контура

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (7)$$

получим:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l^2 \cdot d}{\pi \cdot h}}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{h}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot d}}. \quad (8)$$

С учетом формулы скорости электромагнитных колебаний

$$c = \lambda \cdot f \quad (9)$$

можно найти длину волны:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{\frac{1}{2l} \sqrt{\frac{h}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot d}}} = 2c \cdot l \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot d}{h}}. \quad (10)$$

Таким образом, можно определить длину волны колебания и сравнить ее с размерами резонатора для подбора либо режима бегущей волны, либо режима стоячей волны. После расчета требуемых параметров резонатора СВЧ, его можно изготовить при помощи аддитивных технологий на 3D принтере.

Обсуждение результатов. Резонатор сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде поверхности Мебиуса структуры металл-диэлектрик-металл может быть применен в системах связи и радиолокации [9]. Целесообразно использовать резонатор во входных цепях ЦАФАР. При этом важным преимуществом является то, что электромагнитные колебания такого

контура могут быть восприняты аналогичным контуром, а не традиционными резонаторами СВЧ диапазона, что позволит защитить передаваемую и принимаемую информацию от помех и несанкционированного доступа.

Рассмотрим ещё один частный случай применения односторонних поверхностей Мебиуса, предназначенных для генерации, преобразования, приема и передачи электромагнитных колебаний с кодово-импульсной модуляцией частоты.

Данный контур представляет полноценный колебательный контур, состоящий из емкости и индуктивности с возможностью изменения величины емкости для дискретного изменения частоты колебаний. Особенностью представленного модулятора является его способность генерировать стоячую или бегущую волну при кодово-импульсной модуляции за счет изменения емкостных характеристик колебательного контура в виде двух структур металл-диэлектрик-металл с возможностью их объединения или разъединения при помощи $p-i-n$ -диодов.

Модулятор представляет собой замкнутую поверхность Мебиуса, образованную многослойной структурой в виде металл-диэлектрик-металл- $p-i-n$ -диоды-металл-диэлектрик-металл, представленную на рис. 2 (геометрические размеры обозначены как радиус поперечного сечения r и половина длины витка индуктивности в виде $l/2$). Изменение резонансных характеристик в режимах бегущей и стоячей волны происходит за счет подключения или отключения дополнительных обкладок к емкости в модуляторе при помощи $p-i-n$ -диодов.

В модуляторе используется поверхность Мебиуса многослойной структуры металл-диэлектрик-металл- $p-i-n$ -диоды-металл-диэлектрик-металл, причем в каждом сечении такой поверхности имеется емкостная составляющая, образованная прямоугольным диэлектриком, с двух противоположных сторон покрытых металлическими обкладками.

Через $p-i-n$ -диоды имеется возможность подключения или отключения дополнительной обкладки таким образом, что емкость будет дискретно увеличиваться или уменьшаться (индуктивность при этом будет оставаться неизменной). Замыкание в виде односторонней поверхности Мебиуса из этих двух металлических обкладок формирует одну металлическую обкладку в виде двух витков короткозамкнутой индуктивности.

На рис. 5 поясняется формирование колебательного контура из емкости и двухвитковой индуктивности с применением $p-i-n$ -диодов для осуществления технического результата в виде изменения резонансных характеристик в режимах бегущей и стоячей волны за счет подключения или отключения дополнительных обкладок к емкости в модуляторе при помощи $p-i-n$ -диодов.

Работает модулятор следующим образом: в любом сечении модулятора присутствует емкостная компонента в виде двух металлических обкладок 1 по противоположным сторонам диэлектрической поверхности 2. Величина емкости зависит от диэлектрической проницаемости изолятора его толщины h (расстояние между металлическими обкладками), ширины обкладок d и длины l , причем длина обкладки соответствует длине одного витка контура. При открытых $p-i-n$ -диодах обкладка будет шире на величину Δd , а емкость больше.

Индуктивность представляет собой двухвитковую короткозамкнутую конструкцию соленоида, индуцирующего магнитное поле в зависимости от магнитной проницаемости диэлектрика, величины поперечного сечения контура и длины металлической обкладки. Индуктивность и емкость формируют совместно колебательный контур.

В зависимости от геометрических размеров контура в нем генерируются либо бегущая волна (если по длине обкладки помещается целая волна колебания), либо стоячая волна (если по длине обкладки помещается половина волны колебания).

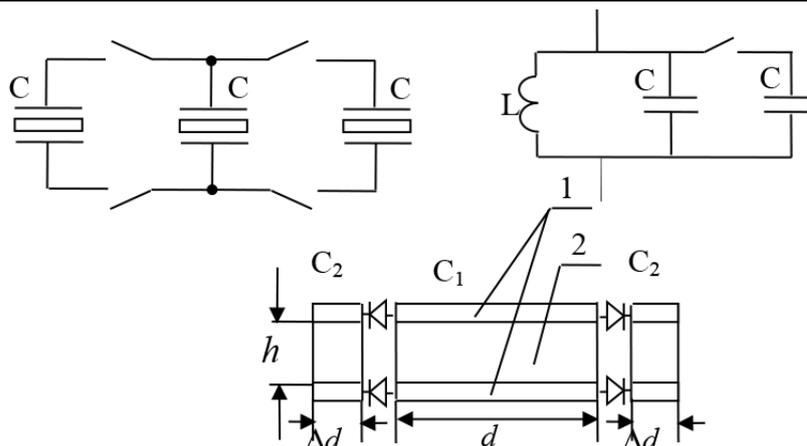


Рис. 5. Формирование колебательного контура из емкости и двухвитковой индуктивности с применением *p-i-n*-диодов
Fig. 5. Formation of an oscillatory circuit from a capacitance and a two-turn inductance using *p-i-n*-diodes

Так как ширина обкладки не влияет на индуктивность, то открыты или закрыты *p-i-n*-диоды, также не влияет на величину индуктивности. Индуктивность и емкость формируют совместно колебательный контур. При изменении ширины или толщины диэлектрика и обкладок параметры индуктивности будут сохраняться, а у емкости будут изменяться.

Таким образом, имеется возможность независимого подбора частоты электромагнитных колебаний в модуляторе. За счет подключения дополнительной обкладки при помощи *p-i-n*-диодов, емкость может быть дискретно изменена, что, в свою очередь, приведет к изменению резонансной частоты контура и позволит реализовать кодово-импульсную частотную модуляцию.

Модулятор сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде поверхности Мебиуса многослойной структуры металл-диэлектрик-металл-*p-i-n*-диоды-металл-диэлектрик-металл с дискретным изменением частоты колебаний может быть применен в системах связи и радиолокации [2]. Целесообразно использовать модулятор во входных цепях ЦАФАР.

Также применение односторонних поверхностей Мебиуса возможно в линиях задержки электромагнитных колебаний в составе ЦАФАР в виде связанных колебательных контуров с индукционной и емкостной связью в форме многослойной односторонней поверхности Мебиуса [12].

Особенностью заявленных связанных колебательных контуров сверхвысокочастотного диапазона в виде многослойной поверхности Мебиуса является высокая степень индукционной и емкостной связи, позволяющей повысить резонансные характеристики связанных контуров при использовании в линиях задержки в составе ЦАФАР.

Техническим результатом является увеличение добротности резонансной системы из двух связанных колебательных контура за счет более высокой степени индуктивной и емкостной связи.

Указанный технический результат достигается тем, что связанные колебательные контура в виде поверхности Мебиуса имеют структуру металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл. Причем в каждом сечении такой поверхности имеется емкостная составляющая, образованная прямоугольным диэлектриком с двух противоположных сторон, покрытых металлическими обкладками для каждого из двух контуров. Замыкание в виде односторонней поверхности Мебиуса из этих двух металлических обкладок формирует одну металлическую обкладку в виде двух витков короткозамкнутой индуктивности для каждого из двух контуров.

Связанные колебательные контура представляют собой замкнутую многослойную поверхность Мебиуса, образованную микрополосковой структурой в виде металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл, представленную на рис. 6, а в виде первой по-

ловины кольца Мебиуса с завитком (на 180 градусов) и на рис. 6, б в виде второй половины – без завитка.

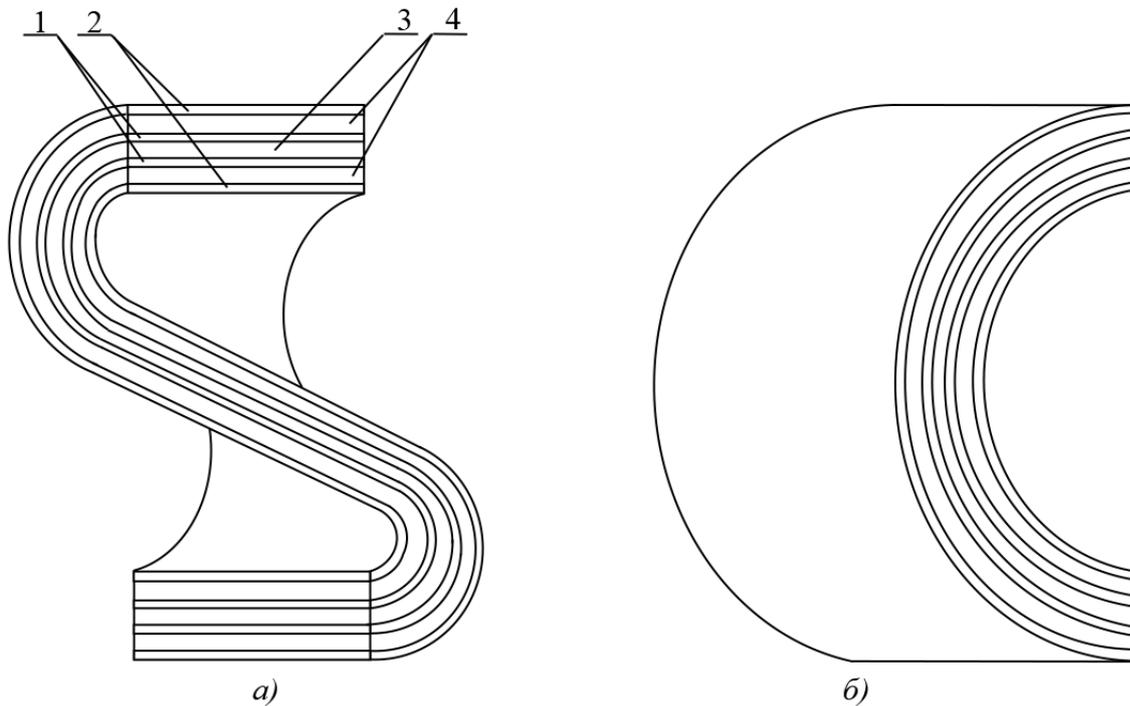


Рис. 6. Связанные колебательные контура в виде замкнутой многослойной поверхности Мебиуса, образованной микрополосковой структурой в виде металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл:

a - в виде первой половины кольца Мебиуса с завитком (на 180 градусов);

б - в виде второй половины кольца Мебиуса без завитка

Fig. 6. Coupled oscillatory circuits in the form of a closed multilayer Möbius surface formed by a microstrip structure in the form of metal-dielectric-metal-dielectric-metal-dielectric-metal:

a - in the form of the first half of the Möbius ring with a curl (180 degrees);

b - in the form of the second half of the Möbius ring without curl

Топологически конструкции колебательных контуров представляют собой две многослойные поверхности Мебиуса, вложенные друг в друга, причем один контур расположен внутри другого таким образом, что внутренний контур полностью обхватывается внешним контуром. Связанные колебательные контура реализуют одновременно индуктивную и емкостную связи за счет того, что конструктивно два витка обоих индуктивностей и все обкладки емкостей расположены в пространстве таким образом, что общими являются магнитные поля индуктивностей и электрические поля емкостей.

На рис. 6 показан внутренний контур, сформированный из двух металлических обкладок 1 и диэлектрика между ними 3. В каждом сечении внутреннего контура имеется емкостная составляющая, а изготовление в виде односторонней многослойной поверхности Мебиуса, превращает обкладки конденсатора в два витка индуктивности (замкнутые друг на друга) за счет поворота поверхности на 180 градусов.

Таким образом, первый контур, состоящий из металлических обкладок 1 и диэлектрика 3, имеет свойство параллельного колебательного контура *LC*. На рис. 6 показан внешний контур, сформированный из металлических обкладок 2 и диэлектрических поверхностей между ними 4. Внешний контур также как и внутренний обладает резонансными характеристиками. Двухвитковая индуктивность внешнего контура в точности соответствует двухвитковой индуктивности внутреннего контура, и их магнитные поля копируют друг друга.

Емкостная составляющая внутреннего и внешнего связанных контуров имеет отличия. Величина емкости зависит от площади обкладок, расстояния между обкладками и диэлектриче-

ской проницаемости среды между обкладками. Площадь обкладок у обоих контуров практически одинакова, а вот расстояние между обкладками различно. Емкость внутреннего контура зависит от толщины диэлектрического слоя 3, а емкость внешнего контура зависит и от толщины диэлектрического слоя 3, и от двукратной толщины диэлектрического слоя 4 (влиянием металлических обкладок 1 можно пренебречь). Подбор диэлектрических материалов и толщины диэлектрических поверхностей обоих контуров позволяет изготовить связанные контуры с одинаковыми резонансными частотами или отличающимися друг от друга в зависимости от предъявленных требований. Помимо индуктивной связи между контурами существует многократная емкостная связь между обкладками конденсаторов.

На рис.7 приведена схема замещения, на которой показаны все типы индуктивной и емкостной связей. Связанные колебательные контура сверхвысокочастотного диапазона в виде многослойной поверхности Мебиуса можно изготовить при помощи аддитивных технологий на 3D принтере [14].

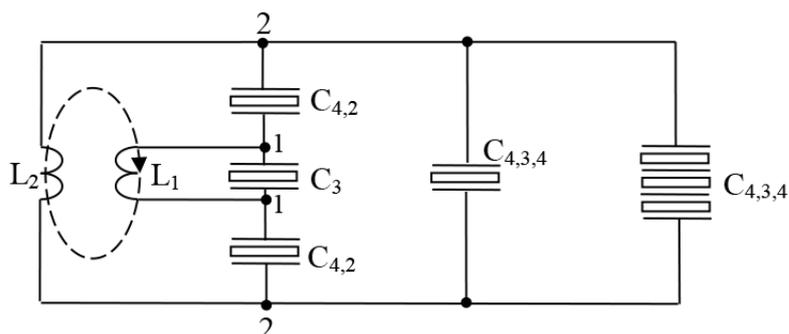


Рис. 7. Схема замещения со всеми типами индуктивной и емкостной связей

Fig. 7. Equivalent circuit with all types of inductive and capacitive coupling

Связанные колебательные контура сверхвысокочастотного диапазона в виде многослойной поверхности Мебиуса структуры металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл могут быть применены в системах связи и радиолокации [2]. Целесообразно использовать связанные колебательные контура в линиях задержки ЦАФАР.

Вывод. Реализация ЦАФАР на базе резонансных структур в виде односторонних поверхностей типа Мебиус позволяет инновационно модернизировать как входную цепь антенной фазированной решетки, так и модулятор на $p-i-n$ -диодах для осуществления цифровой частотной модуляции с реализацией режимов бегущей и стоящей волны, так и усовершенствовать и сделать более компактными линии задержки на базе вложенных контуров с эффектом трансформации. Инновационная ЦАФАР будет способна осуществлять приём-передачу сигналов незаметно для обычных антенных структур, тем самым осуществляя скрытное наблюдение за небесной сферой, что является важным преимуществом при ведении боевых действий.

Библиографический список:

1. Патент RU №2358284. МПК: G01S 13/08. Устройство устранения неоднозначных измерений дальности до целей, находящихся за пределами рабочей зоны радиолокационной станции / Беляков Е.С., Кострова Т.Г., Антуфьев Р.В., Костров В.В.//опубл. 10.06.2009. Бюл. №16.
2. Патент RU №2149421. МПК: G01S 13/04. Способ радиолокационного обнаружения и сопровождения объектов и РЛС для его реализации / Беляев Б.Г., Голубев Г.Н., Жибинов В.А., Щекотов Ю.П.//опубл. 20.05.2000. Бюл. №14.
3. Патент RU №2389039. МПК: G01S 13/58. Способ измерения радиальной скорости воздушной цели в режиме перестройки частоты от импульса к импульсу по случайному закону при пониженном отношении сигнал-шум / Митрофанов Д.Г., Силаев Н.В., Майоров Д.А., Тулузаков В.Г., Немцов А.В.//опубл. 20.05.2010. Бюл. №13.
4. Патент RU №2341813. МПК: G01S 13/04. Подвижная наземная двухкоординатная РЛС кругового обзора метрового диапазона/ Башев В.В., Грачев О.Д., Зачепицкий А.А., Зяблов Н.Е., Кокурошников С.М., Малков М.А.// опубл. 20.12.2008. Бюл. №35.
5. Патент RU №2302077. МПК: H04B 1/04. Способ обработки сигнала / Анташев А.Б., Анташев В.Б., Анташев Д.А., Анташев П.В.//опубл. 27.06.2007. Бюл. №18.
6. Патент RU №2326401. МПК: G01S 13/34, H04D 7/00. Способ обнаружения сигнала / Анташев А.Б., Анташев В.Б., Анташев Д.А., Анташев П.В., Дементьев Р.С.//опубл. 10.06.2008. Бюл. №16.
7. Патент РФ № 2616440, МПК H03C 7/02. Кодово-импульсный модулятор сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде многослойной поверхности Мебиуса с $p-i-n$ -диодами / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Крячко А.Ф., Шкурко А.С., Челушкин Д.А.//опубл. 14.04.2017, Бюл. №11.

8. Патент РФ № 2627983, МПК H01Q 15/18. Антенна в форме уголкового отражателя сверхвысокочастотного диапазона с р-і-п-диодами для передачи дискретной информации / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Крячко А.Ф., Магомедов С.М., Шкурко А.С. //опубл. 22.05.2017, Бюл. №23.
9. Патент РФ № 2642515, МПК H01Q 3/00. Способ формирования эллиптической диаграммы направленности для активной фазированной антенной решетки / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Крячко А.Ф., Саркаров Т.Э., Шкурко А.С. //опубл. 26.01.2018, Бюл. №3.
10. Патент РФ № 2680850, МПК H01Q 3/00, B64G 1/10. Способ формирования эллиптической диаграммы направленности цифровой активной фазированной антенной решетки на базе «стаи» микроспутников с применением сверхрегенеративных приемопередающих устройств / Гаджиев Х.М., Иванченко А.А., Челушкина Т.А., Акимов А.А., Темирханов Р.С. //опубл. 28.02.2019, Бюл. №7.
11. Патент РФ № 2684664, МПК G01S 15/02. Программно-управляемая гидроакустическая ЦАФАР на базе «стаи» морских микродронов / Гаджиев Х.М., Иванченко А.А., Челушкина Т.А., Астахов М.И., Максимов А.Г., Акимов А.А. //опубл. 11.04.2018, Бюл. №11.
12. Патент РФ № 2690693, МПК H01P 1/00. Фрактальные взаимосвязанные резонаторы сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде диэлектрических трехгранных односторонних поверхностей с металлическими обкладками /Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Иванченко Ж.Е., Иванченко М.А. //опубл. 05.06.2019, Бюл. №16.
13. Патент РФ № 2701047, МПК H03C 7/02. Резонатор сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в виде диэлектрической трехгранной односторонней поверхности с металлическими обкладками / Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Иванченко Ж.Е., Иванченко М.А. //опубл. 24.09.2019, Бюл. №27.
14. Патент РФ № 2702019, МПК B41J 2/003. D-принтер для печати изделий, состоящих из различных по электрофизическим свойствам материалов / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Каблов Е.Н., Челушкина Т.А., Шкурко А.С. //опубл. 03.10.2019, Бюл. №28.
15. Вопросы перспективной радиолокации. Под ред. Соколова М. М.: Радиотехника. 2003. 512 с.
16. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. М.: Вузовская книга. 2016. 190 с.
17. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника. 2009. 288 с.
18. Литвинов Н.Н., Лаврентьев А.М. Анализ. Возможности маскировки зондирующих сигналов радиолокационных станций группировки противовоздушной обороны //Вестник воздушно-космической обороны. М.: ПАО «НПО «Алмаз». 2017. № 1 (13). С. 38-43.
19. Sobolev V.S., Feshenko A.A. Accurate Cramer-Rao Bounds for a Laser Doppler anemometer//IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2006. Vol. 55. № 2. pp. 659-665.
20. Parkinson B., Spilker J. Global Positioning System: Theory and Practice. V. I, II. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1996.
21. Rodrigo F. Leandro. Precise point positioning with GPS a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis//Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick. 2009.

References:

1. Patent RU No. 2358284. IPC: G01S 13/08. Device for eliminating ambiguous range measurements to targets outside the working area of the radar station / Belyakov E.S., Kostrova T.G., Antufiev R.V., Kostrov V.V. Publ. 10.06.2009. Bul. No. 16. (In Russ)
2. Patent RU No. 2149421. IPC: G01S 13/04. Method of radar detection and tracking of objects and radar for its implementation / Belyaev B.G., Golubev G.N., Zhibinov V.A., Schekotov Yu.P. Publ. 05/20/2000. Bul. No.14. (In Russ)
3. Patent RU No. 2389039. IPC: G01S 13/58. Method for measuring the radial velocity of an air target in the mode of frequency tuning from pulse to pulse according to a random law with a reduced signal-to-noise ratio / Mitrofanov D.G., Silaev N.V., Mayorov D.A., Tuluzakov V.G., Nemtsov A. V. Publ. 20.05.2010. Bul. No.13. (In Russ)
4. Patent RU No. 2341813. IPC: G01S 13/04. Mobile ground-based two-coordinate radar with a circular view of the meter range / Bashev V.V., Grachev O.D., Zachepitsky A.A., Zyablov N.E., Kokuroshnikov S.M., Malkov M.A. Publ. 12/20/2008. Bul. No. 35. (In Russ)
5. Patent RU No. 2302077. IPC: H04B 1/04. Signal processing method / Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V. Publ. June 27, 2007. Bul. No. 18. (In Russ)
6. Patent RU No. 2326401. IPC: G01S 13/34, H04D 7/00. Signal detection method / Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V., Dementyev R.S. Publ. 10.06.2008. Bul. No. 16. (In Russ)
7. RF patent No. 2616440, IPC H03C 7/02. Pulse-code modulator of microwave electromagnetic oscillations in the form of a multilayer Mobius surface with p-i-n-diodes / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Kryachko A.F., Shkurko A.S., Chelushkin D.A. // publ. 04/14/2017, Bul. N 11. (In Russ)
8. RF patent No. 2627983, IPC H01Q 15/18. Antenna in the form of a corner reflector of the microwave with p-i-n-diodes for transmitting discrete information / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Kryachko A.F., Magomedov S.M., Shkurko A.S. publ. 05/22/2017, Bul. No. 23. (In Russ)
9. RF patent No. 2642515, IPC H01Q 3/00. A method of forming an elliptical radiation pattern for an active phased antenna array / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Kryachko A.F., Sarkarov T.E., Shkurko A.S. publ. 26.01.2018, Bul. No.3. (In Russ)
10. RF patent No. 2680850, IPC H01Q 3/00, B64G 1/10. A method of forming an elliptical radiation pattern of a digital active phased antenna array based on a "flock" of microsatellites using super-regenerative transceiver devices / Gadzhiev Kh.M., Ivanchenko A.A., Chelushkina T.A., Akimov A.A., Temirkhanov R.S. ..publ. 28.02.2019, Bul. No. 7. (In Russ)
11. RF patent No. 2684664, IPC G01S 15/02. Software-controlled hydroacoustic CAFAR based on the "flock" of marine microdrones / Gadzhiev Kh.M., Ivanchenko A.A., Chelushkina T.A., Astakhov M.I., Maksimov A.G., Akimov A.A. // publ. 04/11/2019, Bul. No. 11. (In Russ)

12. RF patent No. 2690693, IPC H01P 1/00. Fractal interconnected resonators of microwave electromagnetic oscillations in the form of dielectric trihedral one-sided surfaces with metal plates / Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Ivanchenko Zh.E., Ivanchenko M.A. // publ. 06/05/2019, Bul. No. 16. (In Russ)
13. RF patent No. 2701047, IPC H03C 7/02. Resonator of microwave electromagnetic oscillations in the form of a dielectric trihedral one-sided surface with metal plates / Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Ivanchenko Zh.E., Ivanchenko M.A. publ. 09.24.2019, Bul. No. 27. (In Russ)
14. RF patent No. 2702019, IPC B41J 2/003. D-printer for printing products consisting of materials of various electrophysical properties / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Kablov E.N., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. publ. 03.10.2019, Bul. No. 28. (In Russ)
15. Ed. Sokolov M. Problems of advanced radar. [Radiotekhnika] *Radio engineering*. 2003; 512. (In Russ)
16. Perunov Yu.M., Kupriyanov A.I. Electronic warfare: electronic intelligence. [Vuzovskaya kniga] *University book*. 2016; 190 (In Russ).
17. Radzievsky V.G., Trifonov P.A. Processing of ultra-wideband signals and interference. [Radiotekhnika] *Radio engineering*. 2009; 288 (In Russ).
18. Litvinov N.N., Lavrent'ev A.M. Analysis. Possibilities of masking the sounding signals of radar stations of the air defense grouping [Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony] *Bulletin of Aerospace Defense*. М.: PJSC NPO Almaz. 2017; 1 (13): 38-43. (In Russ)
19. Sobolev V.S., Feshenko A.A. Accurate Cramer-Rao Bounds for a Laser Doppler anemometer. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2006; 55(2): 659-665.
20. Parkinson B., Spilker J. Global Positioning System: Theory and Practice. V. I, II. Washington, DC: *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. 1996.
21. Rodrigo F. Leandro. Precise point positioning with GPS a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis. *Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick*. 2009.

Сведения об авторах:

Гаджиев Хаджимурат Магомедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, gadjiev.xad@mail.ru

Акимов Альфред Акимович, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, doudagestan@rtrn.ru

Абдурафиков Эльдар Абдугамидович, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, eldar392@rambler.ru

Асалиев Рустам Шамилович, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, aslaliyev96@mail.ru

Магомедов Анвар Мурадович, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, anvar@astral-rd.ru

Information about the authors:

Khadzhimurat M. Gadzhiev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, gadjiev.xad@mail.ru

Alfred A. Akimov, Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, doudagestan@rtrn.ru

Eldar A. Abdurafikov, Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, eldar392@rambler.ru

Rustam Sh. Asaliyev, Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, aslaliyev96@mail.ru

Anvar M. Magomedov, Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, anvar@astral-rd.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 22.10.2021.

Одобрена после рецензирования/Revised 15. 11. 2021.

Принята в печать/Accepted for publication 15. 11. 2021.