

Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя

Ю.Г. Пастернак¹, Е.А. Ищенко², В.А. Пендюрин², С.М. Фёдоров¹

¹Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394006, Российская Федерация

²АО НПП «Автоматизированные системы связи»,
Воронеж, 394062, Российская Федерация

*Адрес для переписки: kursk1998@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.01.2021

Принята к публикации 03.03.2021

Ссылка для цитирования: Пастернак Ю.Г., Ищенко Е.А., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 54–62. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62

Аннотация: Применение активных метаматериалов является одним из самых перспективных способов управления характеристиками антенн, волноводов и других СВЧ-устройств. В данной статье предлагается конструкция управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла с коммутаторами, размещенными в узлах кристаллической решетки. Исследуется применение данного метаматериала для изменения фазы основной моды волновода WR-137. Управление характеристиками метаматериала выполняется путем коммутаций pin-диодов в узлах решетки, так данный способ управления позволяет добиться высокой скорости работы системы, а также выполнить коммутацию только определенных pin-диодов. Проведено электродинамическое моделирование, на основе которого были получены характеристики волновода при разных сочетаниях замкнутых узлов метаматериала, осуществляющего изменение фазы электромагнитной волны.

Ключевые слова: метаматериал, волноводный фазовращатель, S-параметры, H_{10} -волна.

Введение

Разработка новых методов управления фазой электромагнитной волны является важной задачей, так как создание сдвига фазы играет важную роль в построении активных фазированных антенных решеток.

В исследовании [1] авторы предложили конструкцию на основе анизотропного метаматериала, который перекрывает часть волновода, что позволяет реализовать задержку распространения электромагнитной волны. Недостаток предложенной конструкции заключается в том, что для изменения значений сдвига фазы требуется изменение геометрических параметров волновода и метаматериала. В данной статье предлагается реализация подобного подхода к управлению фазой электромагнитной волны, однако для изменения фазы используется коммутация узлов электромагнитного кристалла, причем управление осуществляется с использованием электрических устройств, как оптоуправляемые pin-диоды и МЭМС-ключи.

В работе [2] рассматривается волноводный фазовращатель на основе МЭМС-коммутаторов, которые являются одними из самых перспективных устройств для реализации высокоскоростных переключений в структуре метаматериала, так как обладают высокой изоляцией (более 30 дБ) в выключенном состоянии, а в активном режиме – малым электрическим сопротивлением (менее 0,25 Ом на частоте 10 ГГц).

В исследовании [3] было показано, что использование метаматериала позволяет изменять параметр электромагнитной волны. Данное свойство можно использовать при построении антенн с управляемой диаграммой направленности: электромагнитная волна огибает зону коммутации, формируя таким образом динамически смещаемую стенку волновода.

В качестве пассивных метаматериалов [4], используемых для сдвига фазы электромагнитной волны в волноводе, применяются различные геометрические структуры. Однако такой подход не

позволяет осуществлять быстрое изменение фазы волны.

В данной работе предлагается конструкция управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла, в узлах которого находятся коммутирующие устройства. Путем коммутации узлов мы можем сформировать электродинамическую структуру с достаточно произвольной геометрией, формируемой динамически и с высокой скоростью. Сталкиваясь со стенками такой структуры, электромагнитная волна будет претерпевать отражение, приводящее к изменению ее основных характеристик. Предложенный управляемый метаматериал может использоваться для сдвига фазы электромагнитной волны (например, распространяющейся в волноводе) путем изменения расстояния, которое она проходит до выхода, с помощью быстрого переключения рп-диодов или, в перспективе, оптоуправляемых МЭМС-коммутаторов. При этом не требуется изменять геометрические параметры структуры метаматериала, а также осуществлять механические перемещения стенки волновода.

Также, предлагаемый подход к созданию управляемого метаматериала может использоваться для создания отражательных фазированных антенных решеток, функционирующих с электронной перестройкой по частоте в широком диапазоне.

Кроме того, управляемый метаматериал может использоваться в системах и комплексах радиоэлектронной борьбы для пеленгования радиолокационных станций противника в широкой полосе частот, а также для существенного уменьшения эффективной поверхности рассеяния защищаемых объектов в направлениях радиолокационных станций противника путем адаптивного формирования глубоких нулей диаграммы рассеянного излучения объекта.

Разработка конструкции управляемого метаматериала

Для формирования структуры активного метаматериала используются тонкие медные проводники, представляющие собой цилиндры длиной 3 мм с диаметром 0,2 мм, которые образуют ячейку метаматериала. Данные ячейки полностью заполняют волновод по всей ширине и высоте. В качестве опорных точек коммутации применяются малые медные кубические ячейки с длиной ребра 0,1 мм. Конструкция одиночной ячейки, из которой выполняется формирование всего объема структуры метаматериала, приведена на рисунке 1. Длина одного проводника ячейки определяется в соответствии с выражением:

$$l = \frac{c}{16 \cdot f_d} = \frac{3 \cdot 10^8}{16 \cdot 6,25 \cdot 10^9} = 3 \text{ мм}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; f_d – частота из рабочего диапазона.

Таким образом, длина проводника в структуре метаматериала будет равна 1/16 длины волны.

Для коммутации узлов структуры метаматериала были использованы электрические модели рп-диодов, размещенных в углах ячейки. Путем замыкания узла и проводника осуществляется активация ячейки метаматериала. Данная коммутация приводит к изменению диэлектрической проницаемости структуры, а, следовательно, и к изменению параметров распространения электромагнитной волны, на чем и базируется основная функциональная идея предложенной конструкции, как волнового фазовращателя.

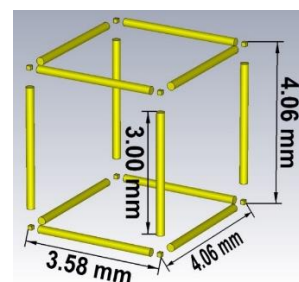


Рис. 1. Элементарная ячейка разработанного метаматериала

Fig. 1. Unit Cell of the Developed Metamaterial

Структура метаматериала может быть сформирована для работы на различных частотах. Основными этапами построения управляемого метаматериала являются:

- 1) выбор длины проводника, которая должна составлять 1/8 или 1/16 от длины волны в рабочем диапазоне частот волновода;
- 2) выбор оптимального устройства коммутации, которое будет обеспечивать наиболее стабильный режим работы;
- 3) размещение разработанной структуры в волноводе с целью управления параметрами электромагнитной волны путем последовательного замыкания узлов в решетчатой структуре метаматериала.

Последний этап может быть заменен на создание других устройств на основе предложенного метаматериала (например, рефлектора или отражательной фазированной решетки). Для переключения слоев метаматериала предпочтительно использовать оптоуправляемые устройства, которые способны изменять свое состояние под воздействием падающего на них светового потока (примерами таких устройств могут выступать рп-диоды или микроэлектромеханические ключи). Поэтому они не нуждаются в металлических проводниках для передачи управляющих сигналов, наличие которых искажает структуру электромагнитной волны.

Исследование влияния метаматериала на характеристики волновода

Для проведения исследований был выбран волновод WR-137 с размерами поперечного сечения $34,85 \times 15,80$ мм, что соответствует рабочему диапазону частот 5,85–8,2 ГГц. Для изменения характеристик электромагнитной волны в волноводе размещался метаматериал, изображенный на рисунке 2.

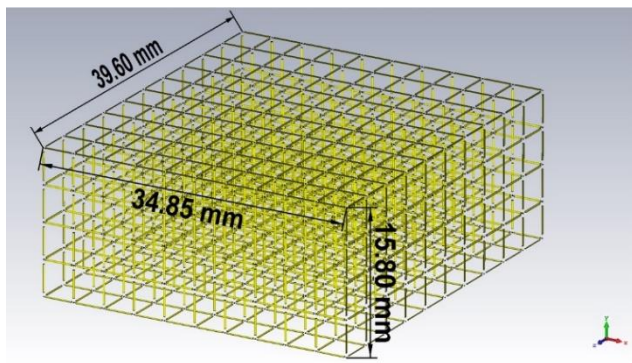


Рис. 2. Исследуемый метаматериал, размещенный в волноводе

Fig. 2. Studied Metamaterial Integrated in the Waveguide

Для определения влияния метаматериала на рабочие характеристики волновода рассмотрим графики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), которые были получены в ходе выполнения электродинамического моделирования (рисунки 3).

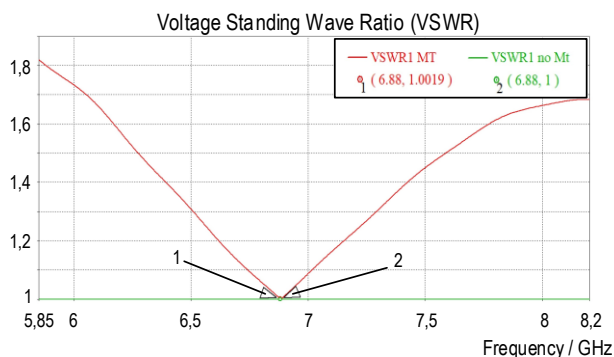


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны по напряжению для случая: волновода без метаматериала (зеленый график); с метаматериалом (красный график)

Fig. 3. Voltage Standing Wave Ratio for the Case of Waveguide: Without the Metamaterial (Green Curve); with the Metamaterial (Red Curve)

Как видно по полученным результатам, интеграция в конструкцию волновода метаматериала приводит к увеличению КСВН, вызванное наличием отражений электромагнитных волн от структуры, однако критическое значение (КСВН = 2) не было превышено в диапазоне рабочих частот.

Полученные результаты показывают, что при отсутствии коммутаций метаматериал вносит малые потери в протекающие в волноводе электромагнитные волны, а следовательно, позволяет сохранить высокий уровень коэффициента полезного действия в диапазоне рабочих частот.

Описание методики вычисления электродинамических параметров структуры

Для расчета электромагнитных характеристик устройства использовался метод конечного интегрирования, разработанный Т. Вейландом [5]. Данный метод основан на уравнениях Максвелла в интегральной форме:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}, \quad \oint_l \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \right) d\vec{s}, \quad (2)$$

$$\iiint_V \vec{D} d\vec{s} = \iiint_V \rho dV, \quad \iiint_V \vec{B} d\vec{s} = 0. \quad (3)$$

В процессе выполнения моделирования определяется область расчетов, которая разбивается на ячейки, использующиеся для формирования двух сеток – первичной и вторичной (ортогональной первичной). Вблизи поверхностей, состоящих из проводниковых материалов, происходит уплотнение сетки, что повышает точность расчетов. После этого производится дискретизация уравнений Максвелла на этих ортогональных сетках, а затем записываются уравнения для каждой грани ячейки:

$$\oint_{\partial A} \vec{E}(\vec{r}, t) d\vec{s} = - \iint_A \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) d\vec{A} \quad \forall A \in R^3. \quad (4)$$

На рисунке 4 изображена ячейка, которая используется для расчетов в процессе реализации метода конечного интегрирования.

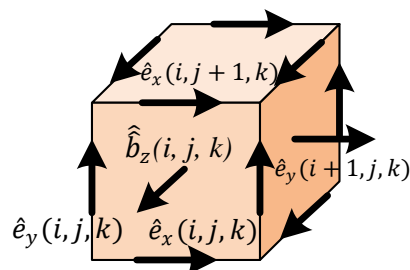


Рис. 4. Ячейка с указанными электрическими напряжениями \hat{e} на ребрах и магнитными потоками \hat{b} через поверхность

Fig. 4. Cell with the Indicated Electric Voltages \hat{e} at the Edges and Magnetic Fluxes \hat{b} Through the Surface

Уравнение (4) может быть заменено обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$\hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i+1, j, k) - \hat{e}_x(i, j+1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) = - \frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k). \quad (5)$$

Если провести замену уравнения (4) на (5) для каждой ячейки, тогда правило расчета может быть представлено в матричном виде: топологической матрице C как дискретном эквиваленте аналитическому оператору ротора:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & -1 \end{pmatrix}}_c \begin{pmatrix} \hat{e}_{n1} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n2} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n3} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n4} \\ \vdots \end{pmatrix} = -\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{b}_n \\ \vdots \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Если применить описанную выше схему к правилу Ампера для вторичной сетки (ортогональной первичной), применяемой для дискретизации уравнений, можно получить соответствующий дискретный оператор циркуляции \tilde{C} . Похожим образом дискретизация оставшихся уравнений дивергенции дает дискретные операторы \tilde{S} и S , которые соответствуют потоку, принадлежащему первичной и вторичной сетке, соответственно. Эти дискретные матричные операторы состоят только из элементов 0, 1, -1 и обозначают исключительно топологическую информацию. В результате мы получаем набор сеточных уравнений Максвелла:

$$Ce = -\frac{\partial}{\partial t} b, \tilde{C}h = \frac{\partial}{\partial t} d + j, \quad (7)$$

$$\tilde{S}d = q, Sb = 0. \quad (8)$$

Используемый численный метод обладает высокой эффективностью в задачах, в которых необходимо производить анализ нестационарных процессов в однородном, неоднородном и анизотропном пространствах для объектов, обладающих произвольной геометрической формой. Особенность метода Вейланда состоит в возможности универсальной пространственной дискретизации, которую возможно использовать для различных задач расчетов характеристик электромагнитного поля во временной и частотных областях.

Определение диэлектрической и магнитной проницаемости управляемого метаматериала

Значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости разработанного метаматериала отличаются от значений для вакуума, что создает некоторое сопротивление распространяющейся волне. Для определения этих величин воспользуемся методом, основанным на параметрах матрицы рассеяния [6].

На основе графиков S -параметров, полученных в результате моделирования разомкнутого метаматериала, рассчитываются основные параметры среды, которые не должны оказывать серьезного влияния на распространение волны.

Для определения волнового сопротивления метаматериала воспользуемся следующей формулой:

$$\eta_s = \pm \eta_0 \sqrt{\frac{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2}}, \quad (9)$$

где S_{11} и S_{21} – соответствующие элементы матрицы рассеяния (S -параметров); η_0 – волновое сопротивление свободного пространства ($\frac{\mu_0}{\epsilon_0}$).

Эффективное значение волнового сопротивления с учетом выражения (9):

$$Z_A = \frac{S_{21}(\eta_s + \eta_0)}{(\eta_s + \eta_0) - S_{11}(\eta_s - \eta_0)}. \quad (10)$$

Для определения волнового числа для данной среды воспользуемся следующим выражением:

$$k_s = \frac{1}{d} [-(\text{Arg}(Z_A) + 2p\pi) + j \cdot \ln(|Z_A|)], \quad (11)$$

где p – выбор ветви значений (при расчетах $p = 1$); d – толщина структуры.

Тогда относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости будут равны:

$$\mu_s(f) = \frac{k_s \cdot \eta_s}{2\pi f \cdot \mu_0}, \quad (12)$$

$$\epsilon_s(f) = \frac{k_s}{2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \eta_s}. \quad (13)$$

На основе приведенных выше уравнений были рассчитаны значения действительных и мнимых частей относительных магнитных и диэлектрических проницаемостей (рисунок 5).

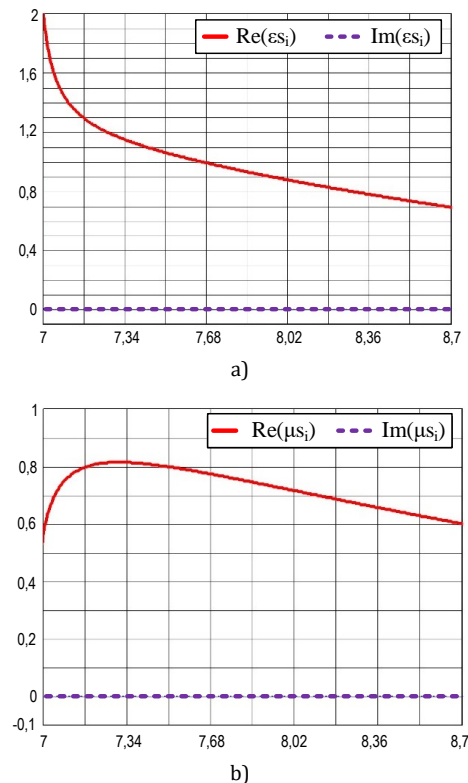


Рис. 5. Электрические параметры среды: а) относительная диэлектрическая проницаемость; б) относительная магнитная проницаемость

Fig. 5. Electrical Parameters of Metamaterial: a) Permittivity; b) Permeability

Влияние коммутации линий метаматериала на фазу электромагнитной волны

Для изменения параметров распространяющейся в волноводе электромагнитной волны производились коммутации линий метаматериала. При моделировании этого процесса использовалась spice модель pin-диода, а основными исследуемыми характеристиками выступали фазы S_{21} -параметров и картины полей внутри волновода. В процессе исследования производилась коммутация четырех слоев метаматериала (рисунок 6).

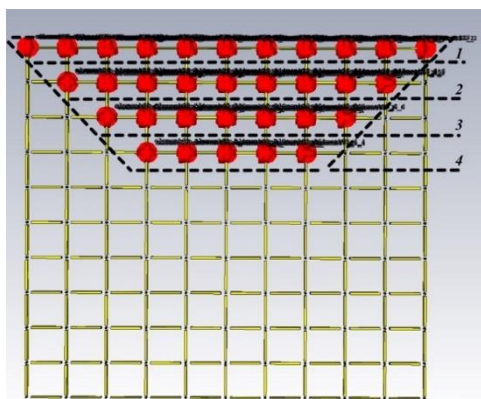


Рис. 6. Коммутируемые линии метаматериала

Fig. 6. Switched Lines of Metamaterial with Marked Layers

На рисунке 6 изображен сформированный плавный переход (в каждом последующем слое метаматериала коммутируется на 2 ячейке меньше), обусловленный особенностями распространения электромагнитной волны в волноводе: из-за сужения перехода происходит уменьшение полосы рабочих частот волновода, а наличие плавного перехода позволяет снизить потери электромагнитной энергии, а значит обеспечить более оптимальные рабочие характеристики системы.

Чтобы определить влияние замкнутых линий метаматериала на характеристики электромагнитной волны, воспользуемся полученными в результате моделирования графиками S_{21} -параметров, которые выступают коэффициентами передачи для волновода со входа на выход (рисунок 7), по которым определим влияние замкнутых линий на диапазон рабочих частот волновода.

По полученным результатам видно, что вследствие коммутации линий метаматериала произошло сужение диапазона рабочих частот волновода с 5,85–8,2 ГГц до 7–8,2 ГГц, что вызвано уменьшением поперечного сечения волновода. Эти изменения являются полностью ожидаемыми, так как распространяющаяся в прямоугольном волноводе основная H_{10} -волна имеет частоту среза, определяемую по следующей формуле:

$$f_c = \frac{c}{2 \cdot W}, \quad (14)$$

где c – скорость света в вакууме; f_c – критическая частота; W – ширина стенки волновода.

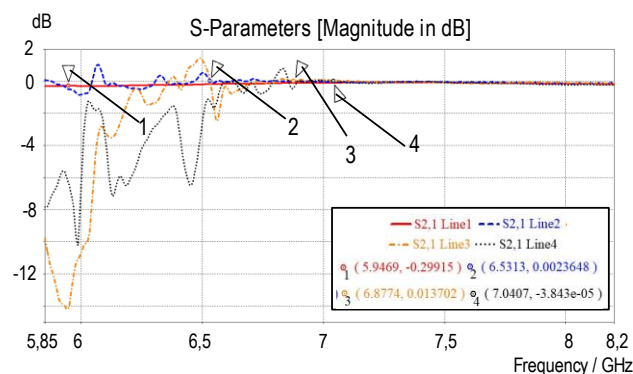


Рис. 7. S_{21} -параметры волновода при коммутации различных линий метаматериала: Line1 – первая линия; Line2 – вторая; Line3 – третья; Line4 – четвертая

Fig. 7. S_{21} -Parameters of the Waveguide at Various Commutations in the Metamaterial: Line1 – the First Line; Line2 – Second; Line3 – Third; Line4 – Fourth

При коммутации четырех линий метаматериала ширина стенки волновода составила 24,35 мм. Приведем графики для фаз S_{21} -параметров для различных вариантов коммутаций линий метаматериала (рисунок 8).

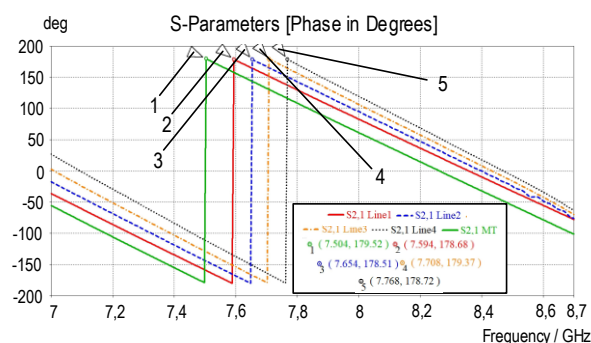


Рис. 8. Фаза S_{21} при коммутации различных линий метаматериала: MT – без коммутаций; LineN – коммутация N-ой линии

Fig. 8. Phase S_{21} for Various Switching Cases: MT – Without Switching; LineN – Closed Line

Для удобства анализа полученных результатов воспользуемся таблицей 1, в которой приводятся значения разности фаз для различных коммутаций в метаматериале.

ТАБЛИЦА 1. Фазы S_{21} -параметров волновода ($f = 7,768$ ГГц)
TABLE 1. Phases of S_{21} -Parameters of the Waveguide ($f = 7,768$ GHz)

Тип коммутаций	Нет коммутаций	1-я линия	2-я линия	3-я линия	4-я линия
$\varphi_4 - \varphi_1$, град.	62,26	41,46	27,99	14,27	0
$\varphi_3 - \varphi_1$, град.	48,67	27,65	14,12	0	343,46
$\varphi_2 - \varphi_1$, град.	34,95	14,03	0	344,39	328,54
$\varphi_1 - \varphi_1$, град.	20,8	0	344,01	329,68	313,02

Из таблицы 1 видно, что предложенная концепция позволяет реализовать управление фазой электромагнитной волны. Во всем рассматриваемом диапазоне частот отклонение значений сдвига фаз от представленных в таблице 1 составило не более 5 %, что показывает высокую стабильность

предложенной конструкции в широком диапазоне частот.

Проведем сравнение картин поля для различных сочетаний коммутируемых линий метаматериала. Картины поля были получены на частоте 8 ГГц, так как данная частота попадает в рабочий диапазон для всех вариантов коммутаций линий метаматериала (рисунок 9). По полученным картинам полей видно, что электромагнитная волна огибает зоны коммутации. Вследствие чего увеличивается расстояние, проходимое волной, а значит происходит смещение фазы волны. При этом в процессе протекания электромагнитной волны происходит незначительное уменьшение энергии поля, так как возникают отражения от структуры метаматериала.

Фазовращатель отражательного типа на основе управляемого метаматериала

Рассмотренный в данной работе активный метаматериал является перспективным устройством для управления параметрами электромагнитных волн. Как было показано выше, при интеграции метаматериала в конструкцию волновода удается создавать смещение фазы электромагнитной волны путем частичной коммутации слоев структуры. Другим способом изменения фазы является коммутация плоскости структуры с последующим отражением электромагнитной волны от нее, как показано на рисунке 10. Сдвиг фазы реализуется за счет изменения расстояния, которое проходит волна: от входа до замкнутой стенки метаматериала и обратно.

Для исследования предложенного отражательного фазовращателя было проведено математическое моделирование при поочередном замыкании плоскостей метаматериала. Отсчет плоскостей производился справа налево (рисунок 11). Помимо графиков фаз S -параметров, были получены 3D-картины полей в волноводе. Для примера, приведены картины поля при всех разомкнутых линиях (см. рисунок 11а), при замыкании третьей линии (см. рисунок 11б), седьмой (см. рисунок 11с), девятой (см. рисунок 11д).

Как видно из представленных рисунков, при замыкании плоскости метаматериала от нее происходит отражение электромагнитной волны в обратную сторону. При этом, незначительная часть энергии волны просачивается через замкнутую плоскость метаматериала.

На основе такой конструкции метаматериала возможно формирование активного рефлектора зеркальных антенн, что позволит осуществить управление характеристиками диаграммы направленности, при этом благодаря использованию электрических коммутирующих устройств возможно быстрое переключение режимов работы без изменения геометрических параметров антенны, что является перспективным, так как применение сверхширокополосных антенн востребовано.

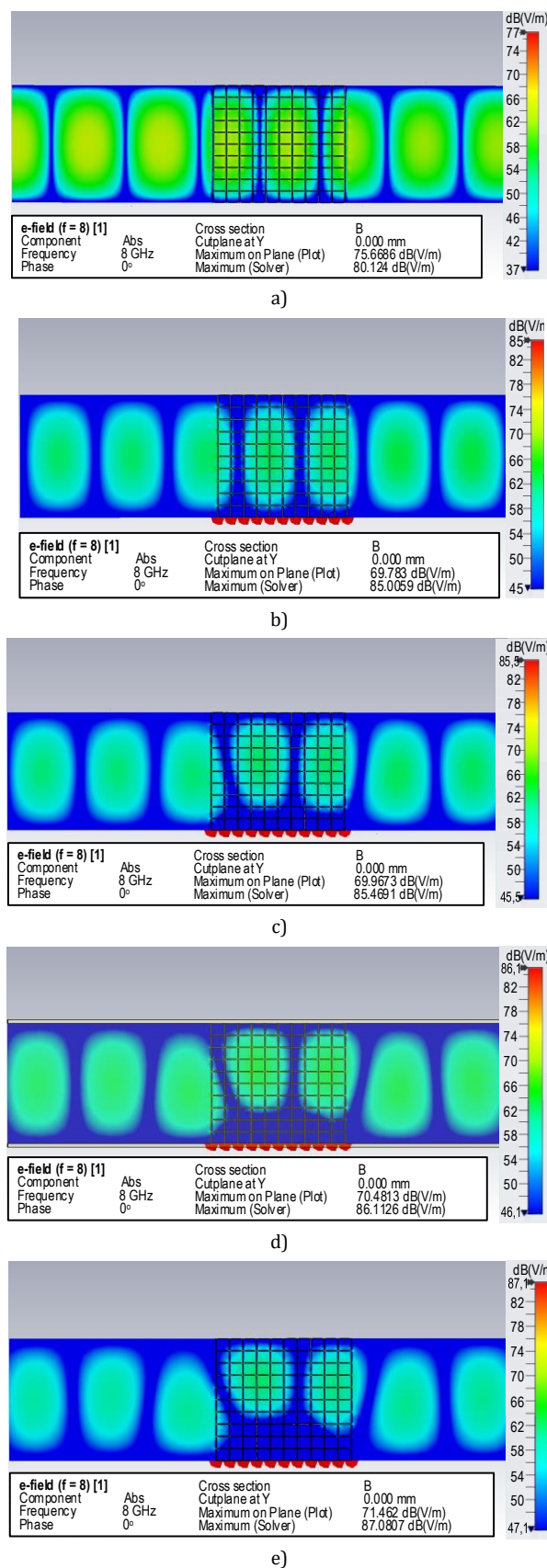


Рис. 9. Картины поля при коммутации различных линий: а) нет коммутаций; б) коммутация 1 линии; в) коммутация 2 линий; д) коммутация 3 линий; е) коммутация 4 линий

Fig. 9. Image of EMF, for Various Cases of Switching: a) no Switching; b) Switching of 1 Line; c) Switching of 2 Line; d) Switching of 3 Line; e) Switching of 4 Line

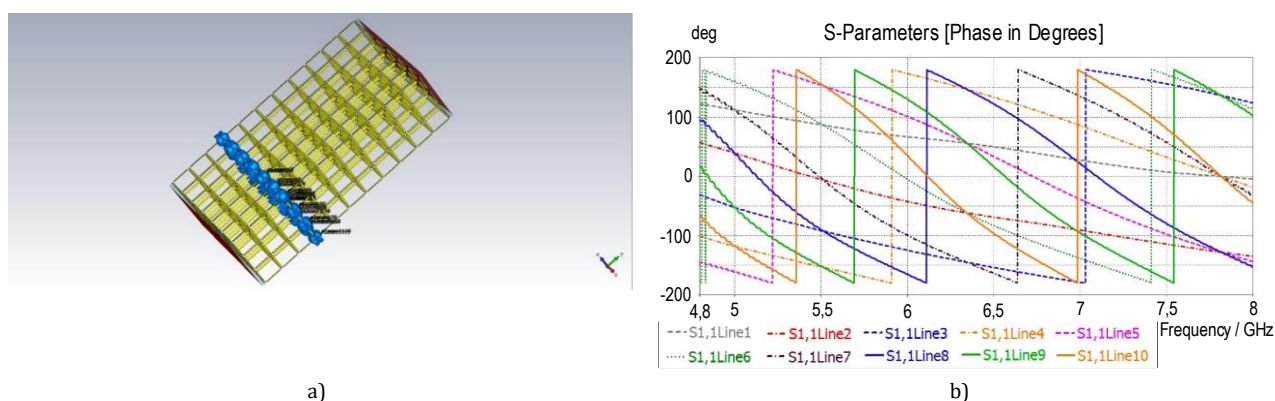


Рис. 10. Отражательный фазовращатель на основе активного метаматериала: а) вид структуры и выполненной коммутации слоя; б) фаза S_{11} -параметров волновода при замыкании различных линий

Fig. 10. Reflection Phaseshifter Based on the Active Metamaterial: a) View of Structure and Performed Layer Switching; b) Phase of S_{11} -Parameters of the Waveguided for Different Switched Lines

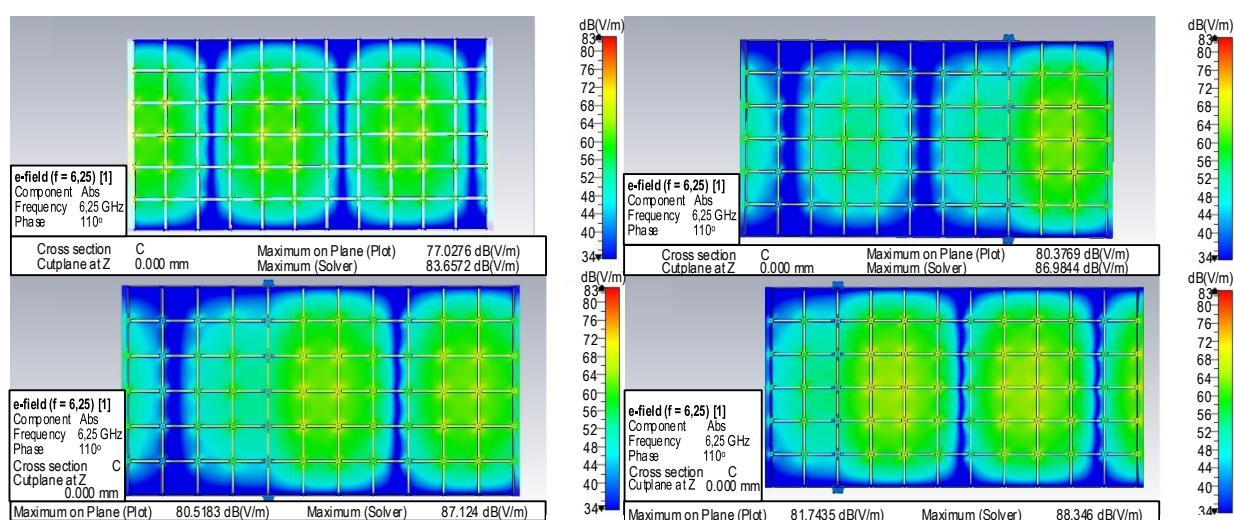


Рис. 11. Картины электрического поля в волноводе заполненным активным метаматериалом при замыкании различных линий

Fig. 11. Images of Electric Field Inside the Waveguide Filled with the Active Metamaterial when Different Lines were Switched

Заключение

Предложенная в данной статье структура позволяет реализовать управление фазой электромагнитной волны с помощью активного метаматериала. Для коммутации узлов применяются рп-диоды, которые в перспективе могут быть заменены МЭМС-коммутаторами, что позволит повысить скорость переключений в метаматериале, а следовательно, и скорость изменения фазы, также улучшить электрические характеристики структуры, так как микроэлектромеханические устройства позволяют обеспечить лучшую изоляцию в отключенном режиме и малое сопротивление в активном режиме. В данной работе представлено исследование волноводных фазовращателей на основе предложенного метаматериала.

Также перспективным способом применения управляемого метаматериала является интеграция метаматериала в конструкцию антенн. Так на основе предложенного метаматериала возможно

реализовать управление характеристиками диаграммы направленности пирамидальной рупорной антенны, как было показано в работе [3]. При построении фазированных антенных решеток обычно используются фазовращатели с перекрытием рабочей полосы частот 2, что ограничивает рабочую полосу частот и всей антенны в целом. Фазированные антенные решетки, построенные на основе фазовращателей, использующих предложенный активный метаматериал, будут лишены этого недостатка. Кроме того, разработанный активный метаматериал может служить основным строительным элементом для рефлекторов отражательных антенных решеток, что позволит гибко изменять диаграмму направленности в сверхширокой полосе частот. На основе конструкции метаматериала возможно формирование планарных активных антенн, в которых активация слоев метаматериала приводит к появлению новых резонансных частот, что позволяет сформировать многоди-

апазонную печатную антенну с управляемыми диапазонами, так как изначально печатные антенны обладают узким рабочим диапазоном частот.

Предложенная конструкция метаматериала может быть использована для реализации сверхширокополосных антенных систем, которые являются перспективными устройствами связи.

Особенностью предложенного метаматериала является то, что управление параметрами волны реализуется путем выполнения электрической коммутации узлов электромагнитного кристалла, при этом не изменяются геометрические параметры системы, что является существенным преимуществом.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-57.2020.9.

Список используемых источников

1. Ozgun O., Kuzuoglu M. Utilization of Anisotropic Metamaterial Layers in Waveguide Miniaturization and Transitions // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007. Vol. 17. Iss. 11. PP. 754–756. DOI:10.1109/LMWC.2007.908039
2. Wu Z., Liu J. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter // Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China (ACES, Beijing, China, 29 July – 1 August 2018). IEEE, 2018. PP.1–2. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
3. Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Сиваш М.А., Фёдоров С.М. Исследование влияния интегрированного в конструкцию пирамидального рупора метаматериала на диаграмму направленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 107–113. DOI:10.36622/VSTU.2020.16.5.016
4. Palomares-Caballero Á., Alex-Amor A., Valenzuela-Valdés J., Padilla P. Holey and pinned structures comparison for waveguide phase shifters // Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP, Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020). IEEE, 2020. PP. 1–5. DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135457
5. Weiland T.A. Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. Vol. 31. PP. 116–120.
6. Arslanagić S., Hansen T.V., Mortensen N.A., Gregersen A.H., Sigmund O., Ziolkowsky R.W., et al. A Review of Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2013. Vol. 55. Iss. 2. PP. 91–106. DOI:10.1109/MAP.2013.6529320

* * *

Use of Active Metamaterial as a Phase Shifter Integrated into the Waveguide

Yu. Pasternak¹, E. Ishchenko² , V. Pendyurin², S. Fedorov¹ 

¹Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394006, Russian Federation

²Research and Development Enterprise “Automated Communication Systems”, JSC,
Voronezh, 394062, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62

Received 13th January 2021

Accepted 03rd March 2021

For citation: Pasternak Yu., Ishchenko E., Pendyurin V., Fedorov S. Use of Active Metamaterial as a Phase Shifter Integrated into the Waveguide. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(1):54–62. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62

Abstract: Active metamaterials usage is one of the most promising ways to control the characteristics of antennas, waveguides, and other microwave devices. This article proposes the controlled metamaterial design in the form of an electromagnetic crystal with switches located at the nodes of the crystal lattice. This metamaterial application for changing the fundamental mode phase of the WR-137 waveguide is investigated. Controlling the characteristics of the metamaterial is performed by switching pin diodes at the nodes of the lattice, so this control method allows you

to achieve a high speed system, as well as to switch only certain pin diodes. Electrodynamics modeling was carried out, on the basis of which the characteristics of the waveguide were obtained for different metamaterial closed nodes combination, which changes the the electromagnetic wave phase.

Keywords: metamaterial, waveguide phase shifter, S-parameters, TE_{10} -wave.

FUNDING

This research was funded by the Russian President's grant for young researchers no. MK-57.2020.9.

References


1. Ozgun O., Kuzuoglu M. Utilization of Anisotropic Metamaterial Layers in Waveguide Miniaturization and Transitions. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2007;17(11):754–756. DOI:10.1109/LMWC.2007.908039
2. Wu Z., Liu J. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter. *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China, ACES, 29 July – 1 August 2018, Beijing, China*. IEEE; 2018. p.1–2. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
3. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Sivash M.A., Fedorov S.M. Investigation of the Influence of the Metamaterial Pyramidal Horn Integrated into the Construction on the Directional Diagram. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2020;16(5):107–113. DOI:10.36622/VSTU.2020.16.5.016
4. Palomares-Caballero Á., Alex-Amor A., Valenzuela-Valdés J., Padilla P. Holey and pinned structures comparison for waveguide phase shifters. *Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP, 15–20 March 2020, Copenhagen, Denmark*. IEEE; 2020. p.1–5. DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135457
5. Weiland T.A. Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Electronics and Communication*. 1977;31:116–120.
6. Arslanagić S., Hansen T.V., Mortensen N.A., Gregersen A.H., Sigmund O., Zolowsky R.W., et al. A Review of Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2013;55(2):91–106. DOI:10.1109/MAP.2013.6529320

Сведения об авторах:

ПАСТЕРНАК
Юрий Геннадьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета, pasternakyg@mail.ru

ИЩЕНКО
Евгений Алексеевич

инженер-исследователь АО НПП «Автоматизированные системы связи», kursk1998@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

ПЕНДЮРИН
Владимир Андреевич

генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», infonpp-acc.ru@yandex.ru

ФЁДОРОВ
Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета, fedorov_sm@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>