

А.О. Касьянов**ТРАНСФОРМАТОРЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

Статья посвящена анализу результатов численного исследования характеристик рассеяния печатных поляризаторов на основе электродинамического моделирования микрорешетчатых дифракционных решеток. Задачи моделирования решены методом интегрального уравнения. С помощью разработанной математической модели выполнено всестороннее численное исследование микроволновых трансформаторов поляризации поля возбуждающей поляризаторы электромагнитных волн, выполненных в виде многоэлементных мультипланарных печатных отражательных антенных решеток. На основе проведенных исследований найдены конструктивные решения для поляризаторов в интегральном исполнении, реализующих функции трансформаторов поляризации волн микроволнового диапазона. Рассмотрены вопросы конструктивного синтеза планарных поляризаторов для создания устройств трансформации поляризации, интегрируемых в излучающие и распределительные системы современных многоэлементных фазированных антенных решеток в печатном исполнении. Получены численные результаты электродинамического моделирования трансформаторов поляризации волн микроволнового диапазона на основе печатных дифракционных решеток, которые могут быть использованы для выбора наиболее рациональных вариантов топологий поляризаторов при разработке многофункциональных обтекателей в антеннах СВЧ. На основе полученных численных данных рассматриваются возможности применения ряда вариантов плоских дифракционных решеток в качестве поляризаторов проходного и отражательного типа в составе антенных обтекателей. Предложенные в работе трансформаторы поляризации электромагнитного поля в виде мультипланарных печатных решеток, входящих в состав антенных обтекателей, предназначены для обеспечения расширения функциональных возможностей перспективных радиоэлектронных средств, содержащих сканирующие антенные решетки, устанавливаемые под антенными обтекателями. Кроме того, применение предложенных в работе твист-рефлекторов и пространственных поляризаторов в составе интеллектуальных радиоэлектронных покрытий открывает дополнительные возможности по цифровому управлению полями рассеяния различных объектов радиолокационного наблюдения, позволяя создавать желаемые радиолокационные образы защищаемых объектов.

Трансформатор поляризации; поляризатор; оптически активная среда; печатная антенная решетка; дифракционная решетка; математическое моделирование; переизлучатель; поляризационная матрица рассеяния; твист-поляризатор.

А.О. Kasyanov**ELECTROMAGNETIC WAVES POLARIZATION TRANSFORMATION
BY PRINTED GRATINGS AT MICROWAVES**

The problem of printed gratings application is considered as converters of electromagnetic waves polarization and polarizing modulators. Two directions in development of antenna engineering are considered in this paper. In each of them the scattering fields control of an antenna arrays allows essentially to expand functionalities of radio engineering sets. The first direction is the creation of auxiliary depolarizing reflectors for two-mirror reflector antennas and folded lenses. In addition, in twist-reflectors based on printed gratings, it is possible to constructively realize the necessary phase distributions of the field on their surfaces. Thus, it becomes possible to use such twist-reflectors to create phase-correcting twist-reflectors. The second direction is connected to application of antenna arrays for a reduction of a radar cross section of the radar-tracking targets. Transformation of a field polarization by an antenna array allows to achieve both these purposes. In an aspect of high cost and complexity of arrays experimental researches as a

method of the analysis the mathematical simulation is selected. Besides, it is shown that introduction of impedance loads in the construction of the re-radiating elements of the printed grating opens additional possibilities for controlling the field scattered by it. Thus, twist reflectors with improved characteristics can be realized on the basis of microstrip-pin gratings. The given results can be used for choosing the most of rational electrodynamic structure geometry variant at decision of particular problems by antennas engineering. The possible flat arrays based on printed complicated shape elements application area is also discussed and it's shown these arrays are the very attractive type for controllable radioelectronic covers designing at microwaves. Some numerical results presented prove the possibility of a printed reflectarrays application as smart covers microwave modules.

Polarization transformation; polarizer; electromagnetic activity; grating; printed array; diffraction grating; mathematical simulation; re-radiator; scattering matrix; twist-reflectok.

Введение. В монографии автора [1] показано, что усложнение топологии печатных элементов микрополосковых дифракционных решеток (МДР), применяемых для построения частотно-избирательных поверхностей, открывает дополнительные возможности при построении дифракционных структур с заданными частотными характеристиками. Покажем, что усложнение топологии печатного элемента МДР также позволяет создавать и поляризационно-активные устройства на основе таких электродинамических структур. Исследованы тонкие плоские поляризаторы, выполненные в виде дифракционных решеток печатных элементов, как на диэлектрических подложках с примыкающими к ним экранами, так и на неэкранированных диэлектрических подложках.

Печатные элементы имеют специфическую форму и располагаются периодически в узлах сетки с прямоугольной формой единичной ячейки. Значительное распространение получили такие электродинамические структуры (ЭДС), форма печатных элементов которых подобна заглавной букве омега греческого алфавита (Ω) [2]. Вид печатного элемента такой формы показан на рис. 1.

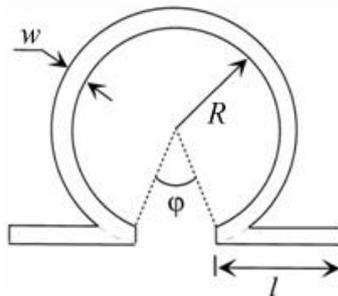


Рис. 1. Схематическое изображение Ω -элемента дифракционной решетки

Как видно из рисунка, такой переизлучатель является составным. В его состав входят симметричный печатный вибратор, каждое из плеч которого имеет длину l и рамочный переизлучатель радиусом R . При этом и вибратор и рамка имеют общий возбуждающий зазор.

Для того, чтобы решетки, составленные из Ω -элементов, обладали оптической активностью требуется высокая степень симметрии печатных переизлучателей. Данного недостатка лишены печатные решетки, составленные из асимметричных элементов. В качестве модели оптически активных ЭДС, выполненных на основе таких решеток, может быть использована обобщенная неаксиальная бианизотропная среда.

Известные применения подобных моделей в виде бесконечных двояко-периодических решеток отражательного и проходного типа:

- ◆ микроволновые фильтры [6];
- ◆ искусственные диэлектрики [7];
- ◆ поляризаторы волн [8–16];
- ◆ антенные рефлекторы [17];
- ◆ частотно-избирательные поверхности [18–19].

Таким образом, исследование характеристик рассеяния печатных дифракционных решеток – трансформаторов поляризации полей падающих на них волн представляет несомненный практический интерес.

Результаты численного моделирования поляризаторов на основе дифракционных решеток печатных TFH-элементов. Приведенные ниже результаты в виде рассеянных полей получены для случая дальней зоны. Рассматривается случай возбуждения нормально падающими плоскими волнами каждой из исследованных ниже печатных решеток. В качестве элементов печатных решеток использованы переизлучатели по форме напоминающие ладонь с двумя пальцами «two-finger hand» (TFH) [3]. Вид печатного элемента такой формы показан на рис. 2.

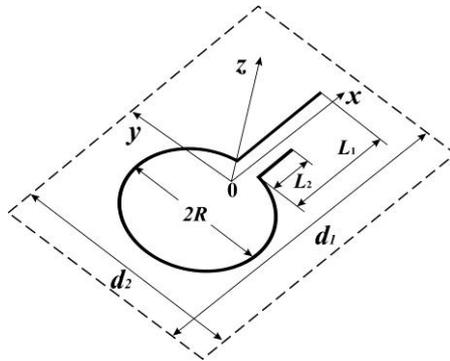


Рис. 2. Схематическое изображение единичной ячейки решетки

Данный печатный переизлучатель может быть получен путем такого преобразования топологии Ω -элемента, при которой симметричный электрический вибратор заменяется на несимметричный, одно из плеч которого длиной L_1 разворачивается на угол 270° , а другое длиной L_2 – на угол 90° . Таким образом формируется свернутый вибратор с сонаправленными плечами. Как и в случае Ω -элемента, рамочная и вибраторная части данного составного TFH-элемента имеют общий возбуждающий зазор.

При проведении расчетов предполагалось, что дифракционная решетка является двоякопериодической и бесконечно протяженной. Как показано на рис. 2, шаг решетки вдоль оси Ox равен d_1 , а шаг решетки вдоль оси Oy – d_2 . При этом предполагается, что печатные рассеиватели являются идеально проводящими. Дифракционная решетка возбуждается линейно-поляризованной плоской волной. При этом рассматриваются два случая:

1) вектор напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны (ЭМВ) $\vec{E}_1^{\text{пад}}$ параллелен плечам свернутого несимметричного печатного вибратора из состава TFH-элемента;

2) вектор напряженности электрического поля падающей ЭМВ $\vec{E}_2^{\text{пад}}$ перпендикулярен вектору $\vec{E}_1^{\text{пад}}$.

Прежде всего, рассмотрим случай решетки из свободно установленных элементов. На рис. 3–8 показаны частотные зависимости характеристик рассеяния такой решетки. Параметры решетки: $R = 3$ мм, $L_1 = 5$ мм, $L_2 = 2$ мм, $d_1 = 15$ мм, $d_2 = 10$ мм, $\varphi \approx 19,1^\circ$. На рис. 3 показаны частотные характеристики (ЧХ) коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны [5] для случая, когда решетка возбуждается нормально падающей волной, вектор напряженности электрического поля которой $\vec{E}^{\text{пад}} = \vec{E}_1^{\text{пад}}$.

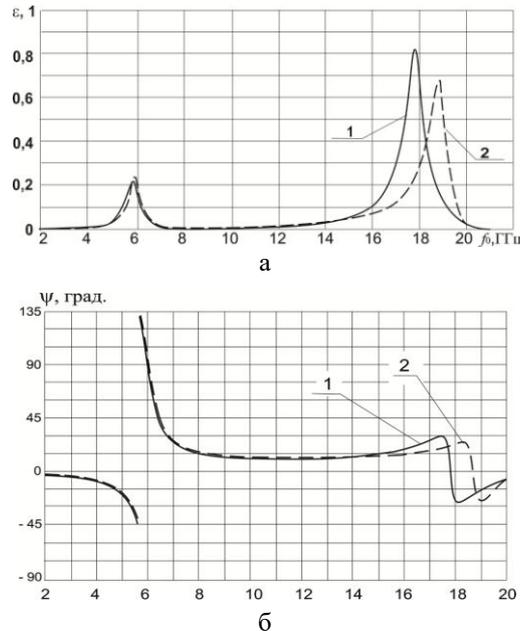


Рис. 3. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая нормального возбуждения решетки x -поляризованной ЭМВ: 1 – результаты расчета, проведенного с помощью авторского программного обеспечения (ПО) [4], 2 – результаты, независимо полученные в работе [3].

Как видно из сравнения графиков расчетных зависимостей $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$, показанных на рис. 3, в случаях использования, как авторского ПО, разработанного с помощью математической модели многослойной мультипланарной печатной дифракционной решетки, описанной в [4], так и на основе данных, приведенных в [3], эти численные результаты находятся в соответствии между собой.

Как видно из графиков, в окрестности двух резонансных частот $f_1 \approx 6$ ГГц и $f_2 \approx 18$ ГГц при отражении наблюдается преобразование поляризации падающей на описанную решетку волны. Максимальные значения коэффициентов эллиптичности наблюдаются в окрестностях резонансных частот, на первой из которых f_1 длина ТФН-элемента решетки L^I равна половине резонансной длины волны λ_1 , а на второй – f_2 – длина печатной рамки L^{II} примерно равна резонансной длине волны λ_2 . Здесь приняты следующие обозначения:

$$L^I = L_1 + L_2 + L^{II},$$

где $L^{II} = 2\pi R - \Delta$ – длина печатной рамки из состава ТФН-элемента решетки. При этом

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0},$$

где c – скорость света в вакууме.

На рис. 4 показаны частотные характеристики (ЧХ) модулей коэффициентов отражения на согласованной $|R_{11}|$ и кроссовой поляризациях $|R_{21}|$, где $R_{ij} = S_{11, ij}$, $i = 1, 2; j = 1$ – элементы поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) решетки [S]. При этом $j = 1$ – случай нормального возбуждения решетки x -поляризованной падающей плоской волной, $j = 2$ – то же для случая y -поляризованной волны.

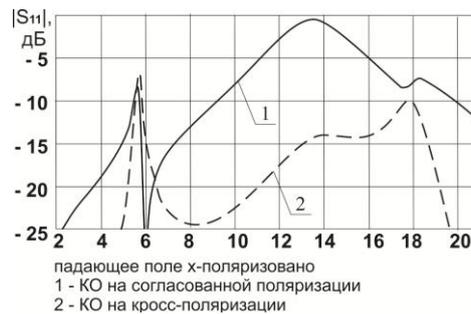


Рис. 4. ЧХ коэффициентов отражения (КО) решетки свободно установленных TFH-элементов (случай x -поляризации)

Как видно из графиков, показанных на рис. 4, в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц зависимость $|S_{11}(f)|$ имеет экстремумы типа максимум: в окрестностях частот f_1 и f_2 , а также $f_3 \approx 13,5$ ГГц. При этом на двух резонансных частотах f_1 и f_2 наблюдается частичное отражение падающей на решетку волны, а на третьей резонансной частоте f_3 наблюдается её полное отражение. Кроме того, на резонансных частотах f_1 и f_2 происходит трансформация поляризации падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну вращающейся эллиптической поляризации, что указывает на то, что на x -поляризации данная дифракционная решетка обладает свойством оптической активности [3]. При этом на частоте f_3 рассматриваемая решетка становится полностью непроницаемой для линейно-поляризованных по x волн, что подтверждается показанными на рис. 5 ЧХ коэффициентов прохождения сквозь неё падающей x -поляризованной волны на согласованной $|T_{11}|$ и кроссовой поляризациях $|T_{21}|$, где $T_{ij} = S_{21, ij}$, $i = 1, 2; j = 1$.



Рис. 5. ЧХ коэффициентов прохождения (КП) решетки свободно установленных TFH-элементов (случай x -поляризации)

На рис. 6 показаны ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая, когда решетка возбуждается нормально падающей волной. При этом сплошными линиями показаны ЧХ $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$ для случая, когда решетка возбуждается x -поляризованной волной, а пунктиром – в случае возбуждения решетки y -поляризованной волной.

Как видно из графиков зависимостей $\varepsilon(f)$ и $\psi(f)$, в случае падения на решетку y -поляризованной волны максимальные значения коэффициента эллиптичности ε наблюдаются в окрестностях частот $f_4 \approx 7$ ГГц, $f_5 \approx 14$ ГГц, где угол наклона главной оси эллипса поляризации ψ близок к нулю.

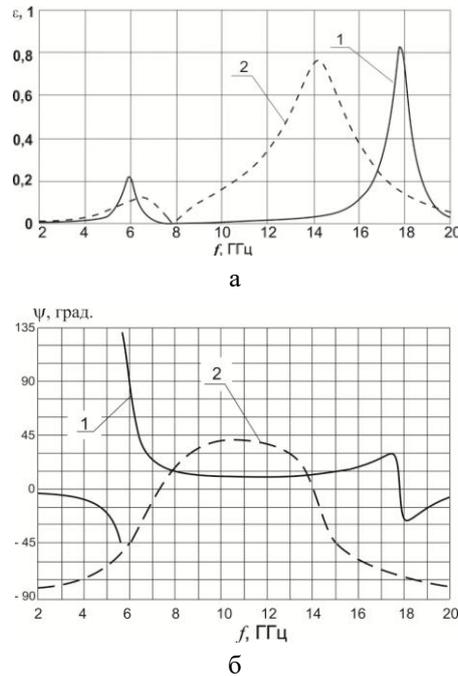


Рис. 6. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ отраженной волны для случая нормального возбуждения решетки: 1 – x -поляризованной волной (сплошная), 2 – y -поляризованной волной (пунктир).

На рис. 7 показаны ЧХ модулей коэффициентов отражения на согласованной $|R_{22}|$ и кроссовой поляризациях $|R_{12}|$, где $R_{ij} = S_{11, ij}$, $i = 1, 2; j = 2$.

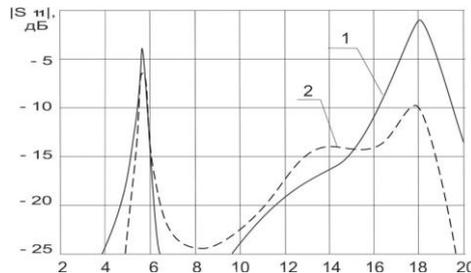


Рис. 7. ЧХ коэффициентов отражения (КО) решетки свободно установленных ТФН-элементов (случай y -поляризации): 1 – на согласованной поляризации (сплошная), 2 – на кросс-поляризации (пунктир).

Как видно из графиков, показанных на рис. 7, в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц зависимость $|S_{11}(f)|$ имеет экстремумы типа максимум: в окрестностях частот f_1 и f_2 . При этом на обеих резонансных частотах f_1 и f_2 наблюдается частичное отражение падающей на решетку волны. Кроме того, на резонансных частотах f_1 и f_2 происходит трансформация поляризации падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну вращающейся эллиптической поляризации, что указывает на то, что данная решетка и на у-поляризации обладает свойством оптической активности.

В то же время, как показано на рис. 8, где представлены ЧХ коэффициентов прохождения сквозь решетку у-поляризованной волны на согласованной $|T_{22}|$ и крессовой $|T_{12}|$ поляризациях, на частотах f_1 и f_2 рассматриваемая решетка имеет наименьший значение $|T_{22}|$ на согласованной поляризации и наибольшее значение $|T_{12}|$ – на крессовой поляризации.

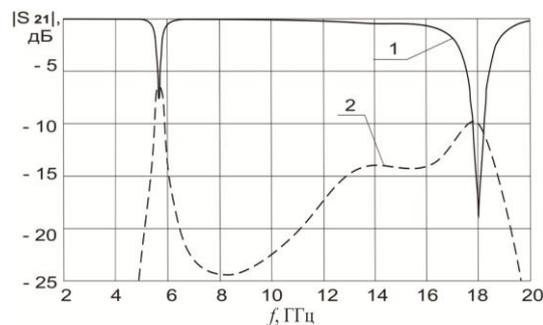


Рис. 8. ЧХ коэффициентов прохождения (КП) решетки свободно установленных ТФН-элементов (случай у-поляризации)

На рис. 9 показаны пунктиром ЧХ коэффициента эллиптичности ϵ и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ прошедшей сквозь решетку волны для случая, когда она возбуждается нормально падающей волной.

Как видно из графиков, показанных на рис. 9,а, на частотах f_1 , f_2 и f_3 коэффициент эллиптичности прошедшей сквозь решетку обращается нуль. При этом в окрестности каждой из частот f_1 , f_2 и f_3 коэффициент эллиптичности дважды максимизируется. Такой характер зависимости $\epsilon(f)$ связан с поворотом главной оси эллипса поляризации прошедшей волны в каждой из окрестностей указанных выше частот (см. рис. 9,б). Так, в окрестности частоты f_1 этот поворот происходит независимо от поляризации падающей волны (х- или у-поляризация).

В то же время в окрестности частоты f_3 поворот главной оси эллипса поляризации происходит в полосе частот $f_3 \pm 0,037f_3$ примерно равной 6,5% от f_3 только в случае возбуждения решетки нормально падающей х-поляризованной волной. И, наконец, в окрестности частоты f_2 наблюдается аналогичное поведение, но только для случая, когда падающая волна имеет у-поляризацию. Следовательно, рассмотренная выше решетка из свободно установленных ТФН-элементов трансформирует поляризацию не только отраженных, но и прошедших сквозь неё волн. Таким образом, данная электродинамическая структура обладает оптической активностью.

Помимо решеток из свободно установленных элементов, представляет интерес исследование поляризационных характеристик печатных решеток с переизлучателями сложной формы, выполненных на диэлектрических подложках в присутствии проводящего экрана, примыкающего к теневой стороне подложки. В качестве примера рассмотрим печатную решетку из ТФН-элементов. Схематическое изображение единичной ячейки такой решетки показано на рис. 10.

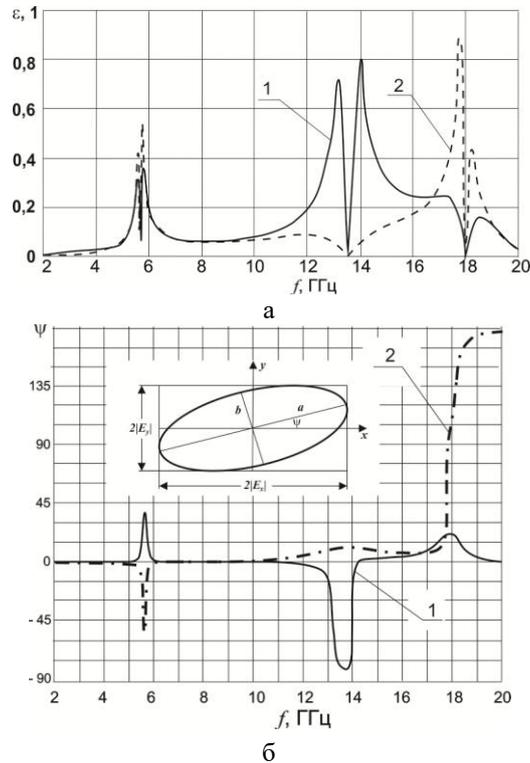


Рис. 9. ЧХ коэффициента эллиптичности ε и угла наклона главной оси эллипса поляризации ψ прошедшей волны для случая нормального возбуждения решетки: 1 – x -поляризованной волной (сплошная), 2 – y -поляризованной волной (пунктир).



Рис. 10. Единичная ячейка печатной решетки ТФН-элементов

Параметры печатной решетки: $2R = 2,195$ мм – диаметр кольцевой рамки ТФН-элемента; $w = 0,15$ мм ширина полоскового проводника; $L_1 = 2,025$ мм – длина первого плеча несимметричного печатного вибратора; $L_2 = 0,6$ мм – длина его второго плеча; $d_1 = 4,5$ мм – шаг решетки вдоль оси Ox ; $d_2 = 2,475$ мм – шаг решетки вдоль оси Oy ; $\Delta = 0,3$ мм – зазор, выполненный в рамочном переизлучающем элементе решетки для включения свернутого несимметричного печатного вибратора; $\varepsilon_R = 4,55$ – относительная диэлектрическая проницаемость подложки; $d = 1,54$ мм – её толщина.

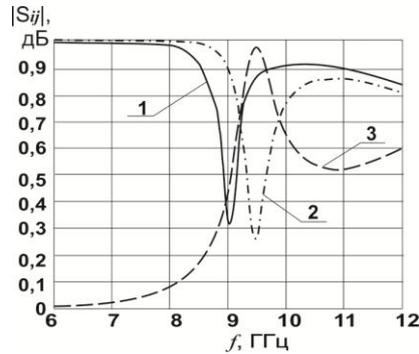


Рис. 11. ЧХ модулей элементов ПМР печатной решетки TFH-элементов:
 1 – КО на основной поляризации, рассчитанный с помощью авторского ПО;
 2 – то же, приведенное в [2]; 3 – КО на кроссовой поляризации из [2].

На рис. 11 показаны частотные характеристики (ЧХ) модулей коэффициентов отражения описанной решетки для случая её нормального возбуждения плоской линейно поляризованной волной, вектор поляризации которой ориентирован вдоль оси Ox , т.е. $\vec{E}^{\text{пад}} = \vec{E}_1^{\text{пад}}$. Как видно из сравнения графиков расчетных зависимостей, показанных на рис. 11, в случаях использования авторского программного обеспечения, разработанного на основе математической модели отражательной антенной решеткой (ОАР) в печатном исполнении, описанной в [4], и на основе данных, приведенных в [3], эти численные результаты находятся в соответствии между собой.

Как видно из графиков, как в случае наличия, так и при отсутствии проводящего экрана, вблизи резонансной частоты $f_0' \approx 9$ ГГц при отражении наблюдается преобразование поляризации падающей на описанную решетку волны. Максимальное значение коэффициента отражения для волны кроссовой поляризации $|R_{21}|$ наблюдается в окрестности резонансной частоты, на которой длина TFH-элемента решетки L' равна половине резонансной длины волны λ_e . При этом

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}},$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Значение частоты f_0' и уровень максимальной трансформации поляризации $|R_{21}|$ изменяются, как при реконфигурировании топологии печатного TFH-элемента, так и изменении параметров заземленной диэлектрической подложки. Действительно, как показано на рис. 12, где приведены ЧХ $|R_{11}(f)|$ (рис. 12,а) и $|R_{21}(f)|$ (рис. 12,б) для различных значений R , при увеличении R значение f_0' снижается со скоростью примерно равной 2,95 ГГц/мм. При этом увеличение R ведет к росту максимального значения коэффициента отражения для волны кроссовой поляризации $|R_{21}|$ со скоростью 2,3 дБ/мм.

При этом следует заметить, что возможности по увеличению R ограничены шагом решетки вдоль оси Oy – $d_2 = 2,475$ мм. На рис. 13 показаны ЧХ модулей (рис. 13,а) и фаз (рис. 13,б) КО решетки печатных TFH-элементов для значения R , при котором величина зазора δ между TFH-элементами соседних ячеек вдоль оси Oy равна $\delta = \delta_1 = 40$ нм.

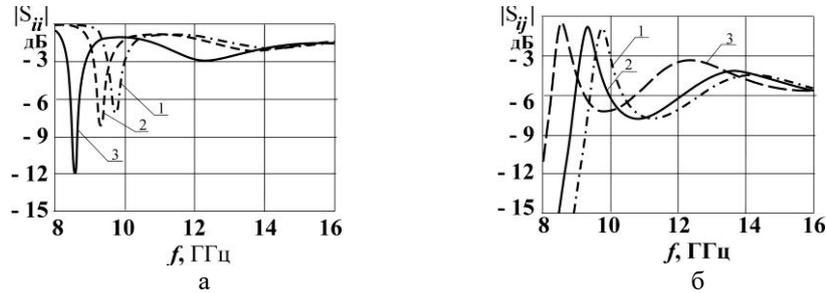


Рис. 12. ЧХ модулей элементов ПМР печатной решетки TFH-элементов: 1 – $R = 2,1$ мм; 2 – $R \approx 2,2$ мм; 3 – $R = 2,4$ мм

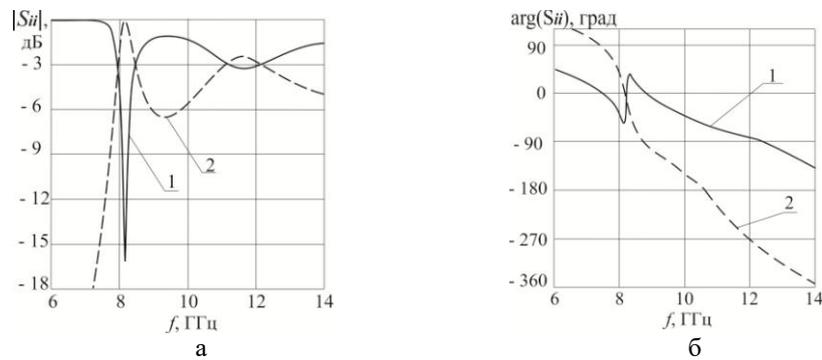


Рис. 13. ЧХ элементов ПМР решетки TFH-элементов при $\delta = \delta_1$:
а – модули КО ($1 - |R_{11}(f)|$; $2 - |R_{21}(f)|$); б – фазы КО ($1 - \arg R_{11}(f)$; $2 - \arg R_{21}(f)$)

Как видно из графиков, в этом случае значение резонансной частоты f_0^I примерно равно 8,21 ГГц, при этом величина $|R_{21}|$ достигает значения минус 0,14 дБ, а ЧХ фазы КО на согласованной поляризации – $\varphi_{11}(f) = \arg R_{11}(f)$ при $f \rightarrow f_0^I$ претерпевает разрыв, величина которого равна 90° .

В том случае когда $\delta = \delta_2 = 0$, ЧХ модулей и фаз КО решетки принимает вид, показанный на рис. 14. Как видно из графиков, в этом случае преобразование поляризации поля падающей на решетку волны происходит на частоте $f_0^{II} \approx 15,6$ ГГц, которая почти в два раза выше, чем f_0^I .

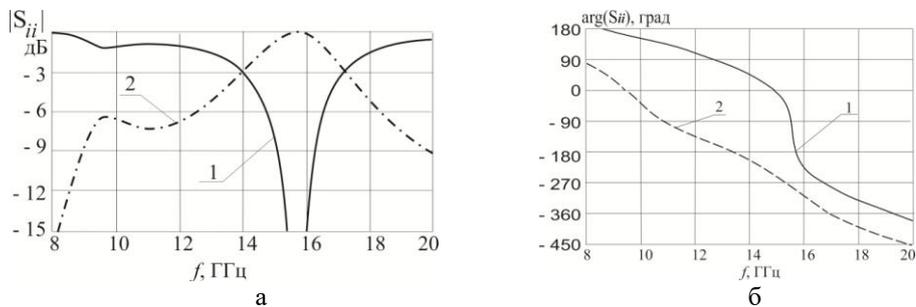


Рис. 14. ЧХ элементов ПМР решетки TFH-элементов при $\delta = \delta_2$:
а – модули КО ($1 - |R_{11}(f)|$; $2 - |R_{21}(f)|$); б – фазы КО ($1 - \arg R_{11}(f)$; $2 - \arg R_{21}(f)$)

Таким образом, если между элементами соседних ячеек решетки возникает гальванический контакт, происходит скачкообразное почти двукратное увеличение частоты трансформации поляризации поля. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что введение в состав описанной решетки управляющих элементов (УЭ) микроволнового диапазона позволит построить на ее основе поляризационный манипулятор, подобный ранее описанному автором, например, в монографии [20]. Схематическое изображение фрагмента такого поляризационного манипулятора, в качестве УЭ которого выступают переключаемые диоды СВЧ (*p-i-n* – диоды) показано на рис. 15.

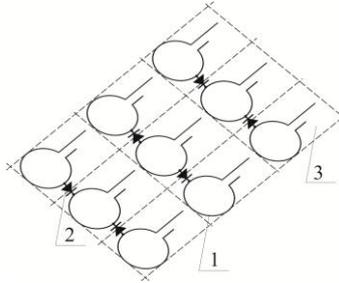


Рис. 15. Схематическое изображение фрагмента такого поляризационного манипулятора: 1 – печатный TFH-элемент; 2 – *p-i-n* – диод; единичная ячейка решетки

Наряду с изменением резонансной частоты, при $\delta = 0$ наблюдается практически трехкратное снижение добротности резонансной кривой Q (со значения $Q_1 \approx 16$ при $\delta = \delta_1$ до значения $Q_2 \approx 5,3$ при $\delta = \delta_1$), сопровождающееся весьма незначительным ростом (на 0,12 дБ) максимума величины $|R_{21}|$ в полосе частот преобразования поляризации поля.

В том случае, когда $\delta = 0$, также имеется возможность изменения частоты преобразования поляризации поля. Для этого можно варьировать толщину заземленной диэлектрической подложки d или значение диэлектрической проницаемости материала подложки – ϵ . В качестве примера рассмотрим ЧХ модулей КО на согласованной и кроссовой поляризациях при различных значениях d .

На рис. 16 показаны ЧХ модулей КО на согласованной и кроссовой поляризациях решетки при $\delta = 0$ для различных значений d . При этом на рис. 16,а показаны ЧХ для КО на согласованной поляризации, а на рис. 16,б – ЧХ для КО на кроссовой поляризации.

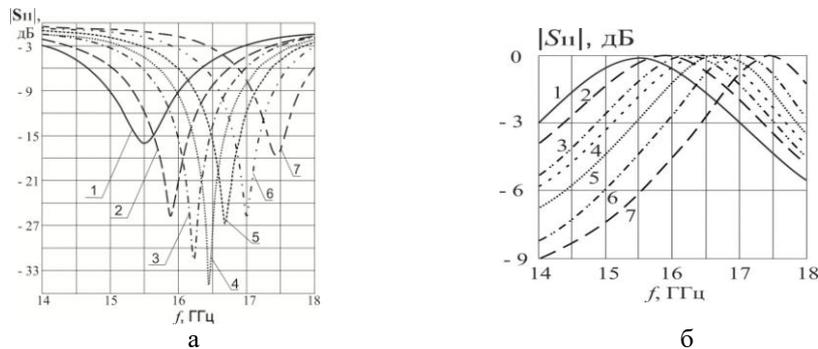


Рис. 16. ЧХ модулей элементов ПМП печатной решетки TFH-элементов: 1 – $d = 1,7$ мм; 2 – $d = 1,54$ мм; 3 – $d = 1,4$ мм; 4 – $d = 1,32$ мм; 5 – $d = 1,24$ мм; 6 – $d = 1,1$ мм; 7 – $d = 1$ мм

Как видно из графиков, с ростом толщины подложки d снижается частота f_0'' со скоростью примерно равной 2714,3 МГц/мм. При этом минимальное значение $|R_{11}|$ в полосе частот с увеличением толщины подложки изменяется немонотонно, сначала падая при увеличении толщины d от d_{\min} до $d_{\text{ср}}$ со скоростью примерно 58 дБ/мм, а затем возрастая со скоростью 50 дБ/мм на участке от $d_{\text{ср}}$ до d_{\max} . Здесь обозначено: $d_{\min} = 1$ мм, $d_{\max} = 1,7$ мм, $d_{\text{ср}} = (d_{\min} + d_{\max})/2$ – среднее арифметическое.

Поляризационно-активные устройства отражательного и проходного типа на основе микрополосковых дифракционных решеток с S- и Z-образными элементами. Представляет интерес исследование поляризационных свойств микрополосково-щелевой ОАР с S-образными элементами, расположенных в узлах сетки с прямоугольной формой ячейки. Топология щелевых переизлучателей печатной ОАР показана на рис. 17,а. Решетка возбуждается нормально падающей линейно-поляризованной плоской волной. Поляризационный базис выбран таким образом, что $\mathbf{i}_1 = \mathbf{i}_x$, $\mathbf{i}_2 = \mathbf{i}_y$. ЧХ элементов ПМР S_{pq} отражательной решетки с шагом $d_1 = d_2 = d = 10$ мм (квадратная единичная ячейка) и $\varphi = 120^\circ$ показаны на рис. 17,б. На отдельных частотах f_{Dep} такая ОАР представляет собой твист-рефлектор. Как видно из рисунка, описанная решетка является деполаризующей на 2-х частотах в одноволновой области периодичности $f < f_{\text{WA}}$: $f_{\text{Dep}}^{(1)}$ и $f_{\text{Dep}}^{(2)}$. При этом на нижней деполаризация падающей волны является частичной. Помимо решеток с S-образными элементами, поляризационной активностью обладают и печатные ОАР с Z-образными элементами.

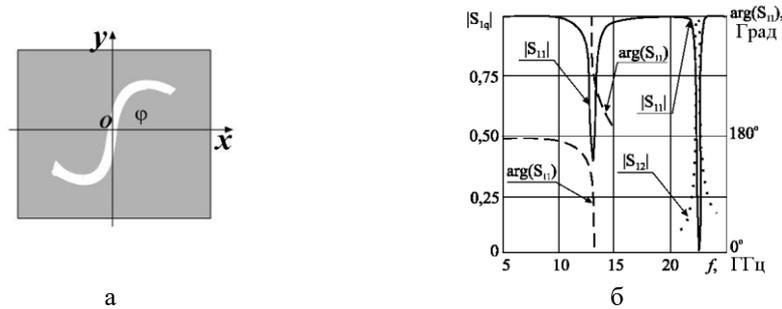


Рис. 17. Печатная ОАР как поляризационно-активная ЭДС

На рис. 18 представлены результаты численного исследования полосковых решеток из Z-образных щелевых элементов. Параметры решеток из S-образных и Z-образных элементов совпадают. Отличие состоит лишь в форме щелевого переизлучателя.

В качестве изменяемого параметра на рис. 18 выступают длины L горизонтальных участков Z-образной щели. Как видно из графиков, показанных на рис. 18,а в одноволновой области периодичности такая решетка имеет три частоты, на которых происходит деполаризация (каждой из них соответствует свой график, обозначенный одной из цифр от 1 до 3). Зависимости уровней деполаризации $|S_{12}|$ от относительных длин горизонтальных участков щелей – L/d на частотах деполаризации $f_{\text{Dep}}^{(i)}$, $i = \overline{1,3}$ показаны на рис. 18,б.

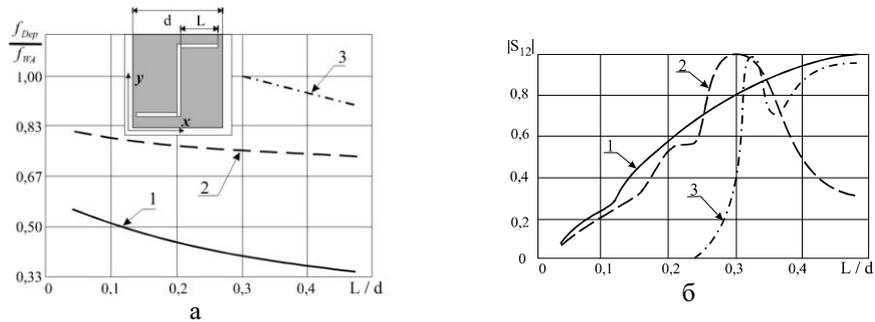


Рис. 18. Рассчитанные зависимости параметров МДР на основе Z-образных целевых элементов от длины L горизонтальных участков Z-образной цели: а – частоты деполяризации; б – недиагональные элементы ПМР печатной решетки

Весьма интересен анализ наклонного падения на решетку плоской волны. Результаты такого анализа приведены на рис. 19, где представлены ЧХ коэффициентов передачи периодической плоской решетки из Z-образных пластин. Единичный элемент такой решетки показан на врезке рис. 19. Размеры единичной ячейки этой решетки совпадают с размерами двух предыдущих. Однако, в отличие от них, здесь нет экрана, а в качестве переизлучающего элемента выступает не щелевой, а пластинчатый вибратор. При этом проекция плоскости падения возбуждающей решетку плоской волны параллельна горизонтальным плечам Z-образного ленточного вибратора. Поведение элементов поляризационной матрицы рассеяния плоской решетки из таких киральных элементов [21–22] в случае наклонного падения плоской волны (см. рис. 19) качественно повторяет аналогичные характеристики широкополосного микрополоскового твист-рефлектора, рассмотренного, например, в таких автора как [23–24].

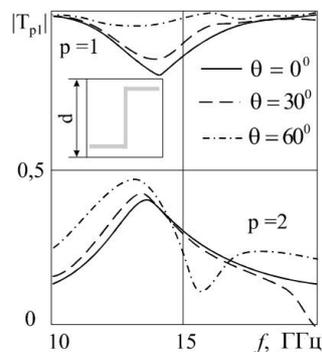


Рис. 19. ЧХ коэффициентов прохождения волн сквозь печатную решетку

Для целей преобразования поляризации поля из линейной во вращающуюся удобно использовать отражательную решетку из спиральных элементов. Воспользовавшись математической моделью микрополосковой ОАР, разработанной автором и описанной в монографии [25], исследуем применение решетки из спиральных излучателей для преобразования падающей линейно-поляризованной волны в отраженную волну с круговой поляризацией. В качестве элементов этой решетки выступают излучатели круговой поляризации, представляющие собой печатные двухзаходные спирали Архимеда. Структура спирали выбрана самодополнитель-

ной, то есть ширина щели равна промежутку между ветвями. Ширина щели составляет $1/15$ от шага решетки d . Форма единичной ячейки – квадрат, то есть $d_1 = d_2 = d$. Величина d выбрана таким образом, чтобы длина наибольшего витка спирали была равна λ_0 , где $\lambda_0 = 3,33$ см. Тогда $d = 0,47 \lambda_0$. При этом в одном плече спирали укладывается $7/4$ витка. Печатные спирали нанесены на фторопласт с $\varepsilon = 2,05$. Толщина подложки $h = 0,15 \lambda_0$. К теневой стороне подложки примыкает проводящий плоский экран. На рис. 20 представлены ЧХ модулей и фаз элементов поляризационной матрицы рассеяния S_{22} и S_{12} для случая нормального падения возбуждающей волны, поляризованной либо вдоль оси Ox , либо вдоль оси Oy декартовой системы координат (поляризации 1 и 2, соответственно).

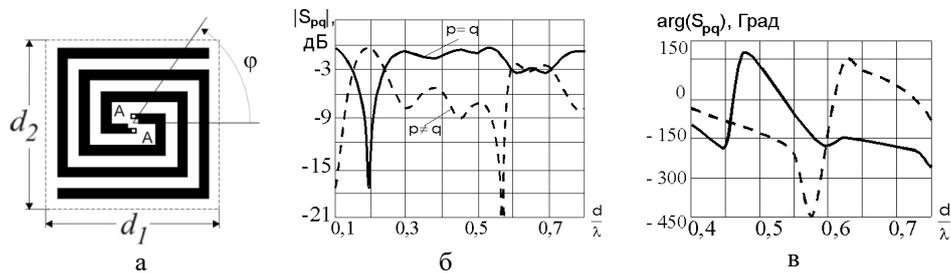


Рис. 20. Микрополосковая отражательная решетка из спиральных элементов: а – топология ячейки; б – ЧХ модулей элементов ПМР; в – ЧХ фаз элементов ПМР.

Как видно из графиков, исследуемая структура не только трансформирует линейную поляризацию в круговую при значениях d/λ от 0,6 до 0,75, в ней также при $d/\lambda = 0,2$ наблюдается твист-эффект. Действительно, описанная микрополосковая дифракционная решетка в диапазоне изменения относительной длины витка l/λ от 0,58 до 0,72 при отражении трансформирует линейно поляризованную волну в волну круговой поляризации. В указанном диапазоне значения модулей S_{22} и S_{12} очень близки, разность фаз приближается к 270° (или -90°).

Заключение. На основе проведенных в настоящей работе численных исследований:

- ♦ проанализированы характеристики рассеяния многослойных мультирешеточных печатных поляризационно-избирательных поверхностей, используемых для построения антенных обтекателей СВЧ-диапазона;

- ♦ показана возможность эффективного использования при проектировании твист-поляризаторов, разработанной математической модели периодической решетки печатных и/или щелевых элементов. Благодаря достаточной универсальности модели удалось исследовать твист-поляризаторы не только в виде однослойных решеток с элементами простой формы, но и в виде совмещенных и многослойных решеток. Применение последних позволяет строить твист-поляризаторы, не только улучшенными диапазонными характеристиками, но и создавать многофункциональные устройства;

- ♦ проведенные численные исследования позволяют утверждать, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию, открывает дополнительные возможности по поляризационной фильтрации и трансформации поляризации полей, отраженных от и/или прошедших сквозь такие решетки электромагнитных волн. В частно-

сти, показано, что с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (Ω - и ТФН-типа, S - и Z-образных, а также спиральных элементов) реализуются не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касьянов А.О.* Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
2. *Yatsenko V.V., Maslovski S.I., Tretyakov S.A., Prosvirnin S.L., Zouhdi S.* Plane-wave reflection from double arrays of small magnetoelectric scatterers // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – January 2003. – Vol. 51, No. 1. – P. 2-11.
3. *Zouhdi S., Couenon G.E., Fourier-Lamer A.* Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – January 2003. – Vol. 47, No. 1. – P. 1061-1065.
4. *Касьянов А.О.* Математическое моделирование и расчет характеристик рассеяния печатного частотно-избирательного антенного обтекателя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 6 (216). – С. 129-139.
5. *Бакланов Е.В.* Комплексная форма записи эллиптически поляризованной волны // *Вестник НГУ. Серия Физика*. – 2008. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 118-122.
6. *Касьянов А.О.* Антенный обтекатель с угловой фильтрацией на основе металлодиэлектрических дифракционных решеток // *Радиотехника*. – 2021. – Т. 85, № 7. – С. 70-79.
7. *Касьянов А.О. и др.* Разработка и применение композитных материалов с требуемыми свойствами: монография / под ред. М.Ю. Звездиной. – Новосибирск: Изд-во АНС «СибБАН», 2016. – 198 с.
8. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // *Антенны*. – 2001. – Вып. 4 (50). – С. 12-16.
9. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Численное исследование многофункциональных обтекателей антенн судовых РЛС // *Матер. 3-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» – (ПТСПИ'99)*. – Владимир, 1999. – С. 160-166.
10. *Касьянов А.О., Кошкидько В.Г.* Применение электродинамических методов анализа при разработке антенных систем судовых РЛС // *Известия ТРТУ. Спец. Выпуск: Матер. 45-й НТК ППС ТРТУ*. – 2000. – № 1. – С. 19.
11. *Касьянов А.О.* Обтекатель антенны судовой радиолокационной станции // *Тр. Международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" ИРЭМВ-2003, 16-20 июня 2003 г.* – Таганрог: ТРТУ. – С. 96-99.
12. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Дифракционные решетки как устройства пространственно-частотной и поляризационной селекции // *Сб. трудов III Международного симпозиума «Конверсия науки – международному сотрудничеству» (Сибконверс'99)*. – Томск, 1999. – С. 406-408.
13. *Kasyanov A.O., Obukhovets V.A.* Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays // *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi*. – P. 46-49.
14. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Поляризационные фильтры, преобразователи и модуляторы на основе управляемых микрополосковых дифракционных решеток // *Всероссийская конференция «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности»*: Сб. тр. Ч. 2. Таганрог, 1999. – С. 121-126.
15. *Касьянов А.О., Суматохин К.В., Ильин И.В.* Реконфигурируемый микроволновый модуль цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией на основе микрополосковой отражательной антенной решетки // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2013. – № 8. – С. 101-109.
16. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Суматохин К.В.* Управляемые твист-рефлекторы на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток // *Антенны*. – 2013. – Вып. 10 (197). – С. 29-36.
17. *Касьянов А.О.* Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.

18. Касьянов А.О. Результаты численного исследования характеристик рассеяния антенных обтекателей на основе металлodieлектрических дифракционных решеток // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 91-105.
19. Касьянов А.О. Частотно-избирательный антенный обтекатель на основе металлodieлектрических дифракционных решеток и перфорированных экранов // Антенны. – 2021. – № 3. – С. 39-49.
20. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника. 2006. – 240 с.
21. Kas'yanov A.O. The polarizing Properties of Periodic Printed Reflectarrays from the Elements of The Complicated Shape // Proceedings of the 24-th ESA Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas, 30 May-1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
22. Осипов О.В., Почепцов А.О., Антипова Т.А. Электродинамика планарных отражающих структур с киральными слоями на основе тонкопроволочных спиральных элементов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 59-65.
23. Касьянов А.О. Конструктивный синтез печатного фазокорректирующего твист-рефлектора с улучшенными характеристиками // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 30-38.
24. Касьянов А.О. Твист-поляризаторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 5 (60). – С. 34-39.
25. Касьянов А.О., Касьянова А.Н. Электродинамический анализ и разработка САПР-ориентированных математических моделей печатных антенных решеток: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 300 с.

REFERENCES

1. Kas'yanov A.O. Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and applications: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
2. Yatsenko V.V., Maslovski S.I., Tretyakov S.A., Prosvirnin S.L., Zouhdi S. Plane-wave reflection from double arrays of small magnetoelectric scatterers, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, January 2003, Vol. 51, No. 1, pp. 2-11.
3. Zouhdi S., Couenon G.E., Fourier-Lamer A. Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, January 2003, Vol. 47, No. 1, pp. 1061-1065.
4. Kas'yanov A.O. Matematicheskoe modelirovanie i raschet kharakteristik rasseyaniya pechatnogo chastotno-izbiratel'nogo antennoogo obtekatel'ya [Mathematical modeling and calculation of scattering characteristics of a printed frequency-selective antenna fairing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 129-139.
5. Baklanov E.V. Kompleksnaya forma zapisi ellipticheskoi polarizovannoy volny [Complex form of elliptically polarized wave recording], *Vestnik NGU. Seriya Fizika* [Bulletin of the NSU. Physics series], 2008, Vol. 3, Issue 2, pp. 118-122.
6. Kas'yanov A.O. Antennnyy obtekatel' s uglovoy fil'tratsiey na osnove metallo-dielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Antenna fairing with angular filtration based on metal-dielectric diffraction gratings], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2021, Vol. 85, No. 7, pp. 70-79.
7. Kas'yanov A.O. i dr. Razrabotka i primeneniye kompozitnykh materialov s trebuemyimi svoystvami: monografiya [Development and application of composite materials with the required properties: monograph], ed. by M. Yu. Zvezdinoy. Novosibirsk: Izd-vo ANS «SibAK», 2016, 198 p.
8. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Otrazhatel'nye antennnye reshetki kak mikrovolnovye komponenty intellektual'nykh pokrytiy [Reflective antenna arrays as microwave components of intelligent coatings], *Antenny* [Antennas], 2001, Issue 4 (50), pp. 12-16.
9. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Chislennoe issledovanie mnogofunktsional'nykh obtekatel'ey anten sudovykh RLS [Numerical study of multifunctional fairings of ship radar antennas], *Mater. 3-y MNTK «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii» – (PTSPI'99)* [Materials of the 3rd ISTC "Promising technologies in the media of information transmission" – (PTSPI'99)]. Vladimir, 1999, pp. 160-166.
10. Kas'yanov A.O., Koshkid'ko V.G. Primeneniye elektrodinamicheskikh metodov analiza pri razrabotke antennykh sistem sudovykh RLS [Application of electrodynamic analysis methods in the development of antenna systems of ship radars], *Izvestiya TRTU. Spets. Vypusk: Mater. 45-y NTK PPS TRTU* [Izvestia TRTU. Special Issue: Materials of the 45th STC of the TRTU Teaching Staff], 2000, No. 1, pp. 19.

11. Kas'yanov A.O. Obtekatel' anteny sudovoy radiolokatsionnoy stantsii [The fairing of the antenna of the ship's radar station], *Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln" IREMV-2003, 16-20 iyunya 2003 g.* [Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of electromagnetic waves" IREMV-2003, June 16-20, 2003]. Taganrog: TRTU, pp. 96-99.
12. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Difraktsionnye reshetki kak ustroystva prostranstvenno-chastotnoy i polarizatsionnoy selektsii [Diffraction gratings as devices of spatial-frequency and polarization selection], *Sb. trudov III Mezhdunarodnogo simpoziuma «Konversiya nauki – mezhdunarodnomu sotrudnichestvu» (Sibkonvers'99). Tomsk, 1999* [Proceedings of the III International Symposium "Conversion of Science to International cooperation" (Sibconverse'99). Tomsk, 1999], pp. 406-408.
13. Kasyanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays, *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi*, pp. 46-49.
14. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizatsionnye fil'try, preobrazovateli i modulyatory na osnove upravlyaemykh mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Polarizing filters, converters and modulators on the basis of controlled microstrip diffraction gratings], *Vserossiyskaya konferentsiya «Komp'yuternye tekhnologii v inzhenernoy i upravlencheskoy deyatel'nosti»: Sb. tr. Ch. 2. Taganrog, 1999* [All-Russian Conference "Computer Technologies in engineering and Management activities": Collection of works Part 2. Taganrog, 1999], pp. 121-126.
15. Kas'yanov A.O., Sumatokhin K.V., Il'in I.V. Rekonfiguriruemyy mikrovolnovyy modul' tsifrovogo upravlyaemogo radioelektronnoy pokrytiya s prostranstvenno-vremennoy adresatsiey na osnove mikropoloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Reconfigurable microwave module of a digital controlled radioelectronic coating with spatio-temporal addressing based on a microstrip reflective antenna array], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [The successes of modern radio electronics], 2013, No. 8, pp. 101-109.
16. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Sumatokhin K.V. Upravlyaemye tvist-reflektory na osnove rekonfiguriruemykh mikropoloskovykh reshetok [Controlled twist reflectors based on reconfigurable microstrip arrays], *Antenny* [Antennas], 2013, Issue 10 (197), pp. 29-36.
17. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Donu; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
18. Kas'yanov A.O. Rezul'taty chislennogo issledovaniya kharakteristik rasseyaniya antennoy obtekatel'nykh na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Results of a numerical study of the scattering characteristics of antenna fairings based on metal-dielectric diffraction gratings], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 91-105.
19. Kas'yanov A.O. chastotno-izbiratel'nyy antennoy obtekatel' na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok i perforirovannykh ekranov [Frequency-selective antenna fairing based on metal-dielectric diffraction gratings and perforated screens], *Antenny* [Antennas], 2021, No. 3, pp. 39-49.
20. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O. Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennoy reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie [Microstrip reflective antenna arrays. Design methods and numerical modeling]. Moscow: Radiotekhnika. 2006, 240 p.
21. Kasyanov A.O. The polarizing Properties of Periodic Printed Reflectarrays from the Elements of The Complicated Shape, *Proceedings of the 24-th ESA Antenna Workshop on Innovate Periodic Antennas, 30 May-1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
22. Osipov O.V., Pocheptsov A.O., Antipova T.A. Elektrodinamika planarnykh otrazhayushchikh struktur s kiral'nymi sloyami na osnove tonkoprovolochnykh spiral'nykh elementov [Electrodynamics of planar reflecting structures with chiral layers based on thin-wire spiral elements], *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2018, Vol. 21, No. 3, pp. 59-65.
23. Kas'yanov A.O. Konstruktivnyy sintez pechatnogo fazokorrektiruyushchego tvist-reflektora s uluchshennymi kharakteristikami [Constructive synthesis of a printed phase-correcting twist reflector with improved characteristics], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2011, No. 9, pp. 30-38.

24. Kas'yanov A.O. Twist-polyarizatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Twist polarizers based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 5 (60), pp. 34-39.
25. Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N. Elektrodinamicheskiy analiz i razrabotka SAPR-orientirovannykh matematicheskikh modeley pechatnykh antennykh reshetok: monografiya [Electrodynamic analysis and development of CAD-oriented mathematical models of printed antenna arrays: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 300 p.

Статью рекомендовал к опубликованию: д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Южный федеральный университет, e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

Kasyanov Alexander Olegovich – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor

УДК 621.372.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-34-42

М.Н. Максимов, С.М. Максимова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ПУАНКАРЕ-СТЕКЛОВА ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В статье показана возможность использования фильтра Пуанкаре-Стеклова для обеспечения устойчивости полунатурного моделирования нелинейных систем. Полунатурное моделирование (НПМ) предполагает разбиение исходной системы на части, причём одна часть моделируется численно на компьютере, а вторая часть представлена реальным физическим объектом. Части системы обмениваются данными друг с другом через программно-аппаратный интерфейс, который может быть реализован по-разному и должен обеспечивать устойчивость, а также сходимость результатов полунатурного моделирования к результатам моделирования исходной системы. Варианты построения программно-аппаратных интерфейсов ИТМ, ТЛМ, ТФА, РСД, ДИМ, ГСД и фильтр Пуанкаре-Стеклова описаны в соответствующих литературных источниках. В статье показано, как исходная нелинейная система с помощью фильтра Пуанкаре-Стеклова была разбита на части, что соответственно привело к разбиению на части системы уравнений, описывающей поведение исходной системы. Далее были вычислены значения стабилизирующих параметров фильтра Пуанкаре-Стеклова и в соответствии с полученными значениями скорректированы системы уравнений разбитой на части системы. На следующем этапе в статье приводятся результаты численного моделирования исходной и разбитой на части системы в MATLAB. При моделировании по частям части системы обменивались данными друг с другом на каждом шаге моделирования только один раз с задержкой h . Такой способ численного моделирования разбитой на части системы максимально приближен к процессам, происходящим при полунатурном моделировании систем. Сравнение полученных результатов моделирования исходной и разбитой на части системы позволило сделать вывод, что фильтр Пуанкаре-Стеклова при правильном выборе значений стабилизирующих параметров позволяет обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования как линейных, так и нелинейных систем.

Полунатурное моделирование; устойчивость моделирования по частям; фильтр Пуанкаре-Стеклова.