

Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра и их применение в антенных решетках проходного типа

А. В. Станковский[✉], С. В. Поленга, Е. А. Стригова,
А. Д. Немшон, Е. Р. Гафаров, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[✉] stankovskiy_a@mail.ru

Аннотация

Введение. Представлена процедура синтеза фазокорректирующих элементов (ФКЭ) на основе полосового фильтра с помощью специально разработанного программного обеспечения (ПО). Проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик синтезированных ФКЭ и LC-фильтров на сосредоточенных элементах. Полученные структуры могут быть применены в отклоняющих и фокусирующих антенных решетках (АР) проходного типа и в низкопрофильных сканирующих антенных системах (АС) наземных терминалов спутниковых систем связи. Это особенно актуально в условиях активного развития спутниковой связи, особенно при использовании средне- и низкоорбитальных космических аппаратов.

Цель работы. Разработка ПО для синтеза ФКЭ на основе полосового фильтра и последующее их применение в отклоняющих и фокусирующих АР проходного типа.

Материалы и методы. Для расчета характеристик фильтров использовались программы MATLAB, Filter Solutions и AWR DE. Характеристики ФКЭ получены при помощи электродинамического моделирования методом конечных элементов и методом конечного интегрирования.

Результаты. Произведены расчеты полосовых LC-фильтров по заданным характеристикам: центральная частота – 10 ГГц; полоса пропускания – 40 %; неравномерность в полосе пропускания – 0.1 дБ. Разработано ПО для синтеза ФКЭ на основе фильтров Чебышева 1-го типа четного и нечетного порядков с 3-го по 9-й. Получено хорошее совпадение характеристик фильтра на связанных резонаторах и ФКЭ. Синтезированы отклоняющая и фокусирующая структуры и проведено их электродинамическое моделирование. Угол наклона диаграммы направленности отклоняющей структуры составил 20°. Коэффициент отражения фокусирующей структуры в диапазоне 10.7...12.7 ГГц не превысил –15 дБ. Коэффициент направленного действия изменялся от 25.8 до 28 дБ.

Заключение. Разработанное ПО позволяет синтезировать резонаторные фильтры и ФКЭ различных порядков по заданным характеристикам. ПО позволяет в значительной степени сократить время, затрачиваемое на расчет и синтез большого количества ФКЭ. Синтезированные отклоняющие и фокусирующие структуры могут быть использованы как самостоятельно, так и в качестве управляющих слоев в низкопрофильных сканирующих АС.

Ключевые слова: полосовой фильтр, фазокорректирующий элемент, периодическая структура, пространственный фильтр, фильтр Чебышева

Для цитирования: Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра и их применение в антенных решетках проходного типа / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, А. Д. Немшон, Е. Р. Гафаров, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 20–32.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-20-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Статья поступила в редакцию 14.08.2024; принята к публикации после рецензирования 14.10.2024; опубликована онлайн 30.04.2025

Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna

Andrey V. Stankovsky✉, Stanislav V. Polenga, Yelena A. Strigova,
Andrey D. Nemshon, Evgeniy R. Gafarov, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ stankovskiy_a@mail.ru

Abstract

Introduction. This paper presents a procedure for synthesis of phase-correcting elements (PCE) based on band-pass filter using specialized software developed for these purposes. The amplitude response of the synthesized PCE and LC-filters based on lumped elements is compared. The obtained structures can be applied in deflecting and focusing transmitarrays and in low-profile scanning antenna systems of ground terminals of satellite communication systems, which is particularly significant for the advancement of satellite communications used by medium- and low-orbit spacecrafts.

Aim. Software development for PCE synthesis based on band-pass filters (BPF) for application in deflecting and focusing transmitarrays.

Materials and methods. The filter characteristics were calculated using the MATLAB, Filter Solutions, and AWR DE software applications. Characteristics of the synthesized PCE were obtained by electrodynamic modeling using the finite element and finite integration methods.

Results. BPF were calculated in different software applications according to the given characteristics: center frequency – 10 GHz; bandwidth – 40%; and irregularity in the bandwidth – 0.1 dB. A software environment for synthesis of PCE was developed based on Chebyshev filters of type 1 of even and odd orders from 3 to 9. A satisfactory match between the characteristics of the coupled resonator filter and PCE was obtained. The deflecting and focusing structures were synthesized, and their electrodynamic modeling was carried out. The slope angle of the radiation pattern of the deflecting structure was 20°. The reflection coefficient of the focusing structure ranged within 10.7...12.7 GHz, not exceeding –15 dB. The directivity coefficient varied from 25.8 to 28 dB.

Conclusion. The synthesized deflecting and focusing structures can be used both independently and as control layers in low-profile scanning antenna systems. The developed software provides a significant reduction in the time required for the calculation and synthesis of a large number of PCE.

Keywords: band-pass filter, phase-correcting element, periodic structure, spatial filter, Chebyshev filter

For citation: Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Nemshon A. D., Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 20–32.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-20-32

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The study was carried out as part of the state task of the Siberian Federal University (number FSRZ-2023-0008).

Submitted 14.08.2024; accepted 14.10.2024; published online 30.04.2025

Введение. Антенны с механоэлектрическим сканированием, работающие на принципе квазиоптического управления диаграммой направленности (ДН), позволяют изменять положение максимума вращением двух идентичных отклоняющих слоев [1], профиль антенны при этом не изменяется. Каждый из слоев вносит линейный фазовый набег, а результирующий

наклон фазового фронта зависит от взаимного положения упомянутых слоев. Одной из наиболее простых реализаций отклоняющей структуры являются диэлектрические клинья, которые были исследованы и описаны в [2, 3]. К основным недостаткам таких структур можно отнести большие габариты и потери в диэлектрике. Диаграммообразующая схема с

Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра

и их применение в антенных решетках проходного типа

Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter
and Their Application in Transmitarray Antenna

синфазным распределением и отклоняющие структуры располагаются параллельно поверхности земли. Толщиной структур в этом случае можно пренебречь. Сканирование в угломестной плоскости обеспечивается поворотом отклоняющих слоев вокруг оси антенны на одинаковый угол в противоположных направлениях. Поворот слоев в одном направлении обеспечивает сканирование по азимуту.

К наиболее распространенным на сегодняшний день структурам, управляющим лучом ДН, относятся линзовые структуры и антенные решетки (АР) проходного типа в виде частотно-селективных поверхностей (ЧСП). Подобные структуры активно исследуются, разрабатываются и применяются учеными во всем мире [4–7]. В таких решетках ЧСП выступает в роли пространственного фильтра [8–11] и состоит из набора фазокорректирующих элементов (ФКЭ) [12–14]. Каждый отдельный элемент АР рассчитывается и настраивается таким образом, чтобы обеспечить пропускание в рабочей полосе частот и при этом внести необходимую фазовую задержку. Это позволяет управлять фазовым фронтом волны и реализовывать на основе ФКЭ отклоняющую и фокусирующую структуры. Для уменьшения профиля сканирующей антенны упомянутые структуры могут быть объединены в один слой.

Результаты исследований. *Топология и эквивалентная схема.* В представленной статье ФКЭ является пространственным фильтром, который рассчитывается на основе эквивалентного полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на связанных резонаторах, переход к которому подробно описан в [15, 16]. Модель ФКЭ показана на рис. 1 и представляет собой набор квадратных диэлектрических подложек с размером сторон D , чередующихся металлических

пластин с размерами $(D - s)$, образующих емкостные слои, и линий с размерами w , образующих индуктивные слои. Толщина подложки равна h , индексы α и β указывают на расположение подложки относительно индуктивного слоя (α – выше, β – ниже). Индексы i, j зависят от порядка фильтра и принимают следующие значения: $i = 1, 2, \dots, N, j = i + 1$, но не больше N . Подложки из диэлектрического материала также являются индуктивными слоями (вносимой емкостью пренебрегают ввиду ее малого значения). Количество слоев представленной топологии определяется порядком N эквивалентного ППФ. Общая толщина структуры зависит от порядка фильтра и составляет приблизительно $(N - 1)\lambda_0/30$, что много меньше, чем у аналогичной диэлектрической линзы. Размер D подложки ФКЭ составляет $0.1 \dots 0.2 \lambda_0$.

Синтез фильтров в различных программах. Синтез ФКЭ происходит в 2 этапа: сначала вычисляются номиналы эквивалентного ППФ на связанных резонаторах, а затем эти значения пересчитываются в размеры самого ФКЭ. Для реализации программного обеспечения (ПО), позволяющего синтезировать ФКЭ, использовалась программа MATLAB. С помощью встроенных функций в ней можно рассчитать математическую модель фильтра на классической схеме, получить матрицы нулей (z) и полюсов (p) и вычислить его передаточную характеристику:

$$H(s) = \frac{z(s)}{p(s)},$$

где s – комплексная переменная.

Для расчета номиналов элементов фильтра с заданными характеристиками можно, например, воспользоваться программой Filter Solutions. Однако пользоваться дополнительным ПО при

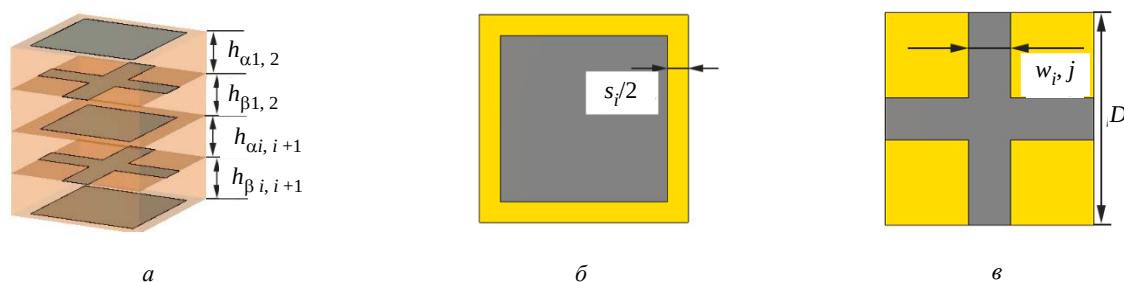


Рис. 1. Топология ФКЭ на основе ППФ 3-го порядка: а – 3D-модель; б – емкостный слой; в – индуктивный слой

Fig. 1. Topology of the PCE based on the 3rd order BPF: а – 3D-model; б – capacitive layer; в – inductive layer

Табл. 1. Преобразование ФНЧ в ППФ

Tab. 1. Converting a low-pass filter to a band-pass filter

Элемент ФНЧ	Элемент ППФ

синтезе ФКЭ не очень удобно. В связи с этим в MATLAB также необходимо реализовать расчет номиналов элементов фильтров.

Полосовой фильтр. Для расчета полосового фильтра, реализованного по классической схеме, обычно используют низкочастотный (НЧ) фильтр-прототип, номиналы емкости (C) и индуктивности (L) которого выбираются в соответствии с типом фильтра. Для получения ППФ с двумя полосами заграждения из фильтра нижних частот (ФНЧ) с одной полосой заграждения выполняют частотное преобразование [17] по следующим формулам:

$$s = \frac{p^2 + \omega_0^2}{Bp};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_B \omega_H}, \text{ если } \frac{\omega_B}{\omega_H} \leq 1.05;$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_B \omega_H}{\left(\omega_B + \omega_H - \sqrt{(\omega_H - \omega_B)^2 + \omega_B \omega_H} \right)},$$

если $\frac{\omega_B}{\omega_H} > 1.05,$

где p – комплексная частотная переменная; B – ширина полосы пропускания в рад/с; ω_0 – центральная частота; ω_B и ω_H – верхняя и нижняя граничные частоты.

Элементы преобразуются согласно схемам, приведенным в табл. 1. Классическая схема полосового фильтра представлена на рис. 2.

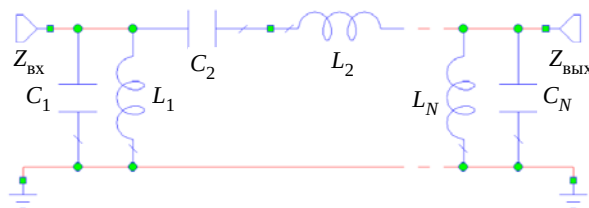


Рис. 2. Полосовой фильтр

Fig. 2. Band-pass filter

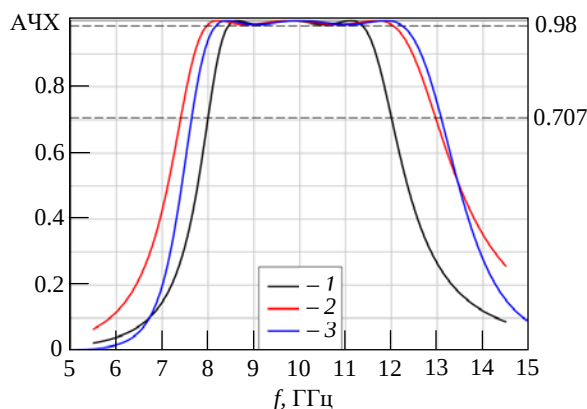


Рис. 3. АЧХ фильтров Чебышева 3-го порядка

Fig. 3. Amplitude response of the 3rd order Chebyshev filter

Передаточная функция для такой схемы записывается в следующем виде:

$$K(p) = \frac{2U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} \sqrt{\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ВЫХ}}}},$$

где $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ – входное и выходное напряжения; $Z_{\text{ВХ}}$ и $Z_{\text{ВЫХ}}$ – соответствующие сопротивления.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные для трех полосовых фильтров Чебышева 1-го типа 3-го порядка со следующими параметрами: центральная частота – 10 ГГц, полоса пропускания – 40 %.

Графикам на рис. 3 соответствуют следующие фильтры: 1 – синтезированный на основе НЧ-прототипа; 2 – рассчитанный с помощью встроенных функций MATLAB; 3 – синтезированный в программе Filter Solutions. В используемых программах (MATLAB и Filter Solutions) полоса пропускания задается параметром B . Неравномерность АЧХ (A) в этой полосе не превышает установленного порогового значения, а превышение определяет частоту среза синтезируемого фильтра. При синтезе ППФ на основе НЧ-прототипа частота среза задается по уровню 0.707, что и дает меньшую полосу пропускания

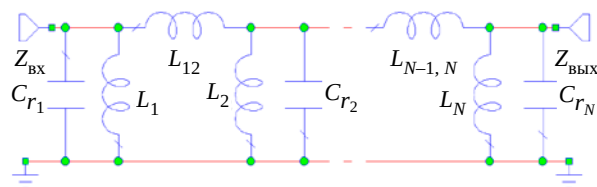


Рис. 4. Схема фильтра на связанных резонаторах

Fig. 4. Filter on coupled resonators

(BW). Это следует учитывать при проектировании фильтров и реализации ПО.

Фильтры на связанных резонаторах. Эквивалентная схема ФКЭ, полученная в [18], представляет собой резонаторный полосовой фильтр на сосредоточенных элементах (рис. 4). Как следует из названия, он состоит из нескольких резонаторов (количество зависит от порядка фильтра), соединенных индуктивной либо емкостной связью [19].

Особенность расчета фильтра на связанных резонаторах в том, что номиналы элементов крайних резонаторных контуров (1-го и N-го) подлежат расчету по следующим формулам:

$$L_1 = \frac{L_{12}L_{r_1}}{L_{12} - L_{r_1}}; \quad L_N = \frac{L_{N-1,N}L_{r_N}}{L_{N-1,N} - L_{r_N}};$$

$$C_{r_1} = \frac{\alpha_1 R_{ВХ}}{(\omega_B - \omega_H)Z_0}; \quad C_{r_N} = \frac{\alpha_N R_{ВЫХ}}{(\omega_B - \omega_H)Z_0},$$

где $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$ и α – табличные нормированные значения ФНЧ-прототипа [17], которые выступают в качестве входных данных в реализуемом ПО; Z_0 – входное и выходное сопротивления фильтра на сосредоточенных элементах. Для пространственного фильтра $Z_0 = 377$ Ом (волновое сопротивление свободного пространства). Для расчета номинальных значений индуктивностей или емкостей внутренних резонаторных контуров необходимо задать их с некоторыми ограничивающими условиями. Для емкостей эти условия представлены выражениями:

$$C_{r_2} < \frac{\alpha_1 \alpha_2 C_{r_1}}{\delta^2};$$

$$C_{r_{N-1}} < \frac{\alpha_N \alpha_{N-1} C_{r_N}}{\delta^2},$$

$$C_{r_{N-1}} > \delta^2 \times$$

$$\times \left[\frac{1}{\sqrt{\alpha_{N-2} \alpha_{N-1}}} \sqrt{C_{r_{N-2}}} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_{N-1} \alpha_N}} \sqrt{C_{r_N}} \right]^2;$$

$$C_{r_i} < \left[\frac{\sqrt{\alpha_{i-1} \alpha_i} \left(\sqrt{C_{r_{i-1}}} - \frac{1}{\sqrt{\alpha_{i-2} \alpha_{i-1}}} \sqrt{C_{r_{i-2}}} \right)}{\delta} \right]^2,$$

$$i = 3, 4, \dots, N-2;$$

$$\delta = \frac{\omega_B - \omega_H}{\omega_0}.$$

После этого номиналы индуктивностей рассчитываются из следующего соотношения:

$$L_{r_k} C_{r_k} = \frac{1}{\omega_0^2}, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Подобным образом определяются и номиналы емкостей при заданных номиналах индуктивностей. Такие условия, в том числе, позволяют в дальнейшем ограничить суммарную площадь емкостных патчей, так как она должна быть меньше площади подложки. В противном случае в ЧСП может образоваться полностью металлический слой без зазоров, что приведет к полному отражению волны.

С точки зрения синтеза фильтров, необходимость задавать номиналы элементов усложняет процесс. На практике же это упрощает настройку фильтров, позволяет подобрать элементы из номинального ряда, а при расчете ФКЭ получить более удобные их размеры w , s и h .

Преобразования между схемами с П-образным и Т-образным соединениями элементов осуществляются по известным формулам [17, 19].

Номиналы оставшихся индуктивностей вычисляются по формулам

$$\frac{1}{L_k} = \frac{1}{L_{r_k}} - \frac{1}{L_{k-1,k}} - \frac{1}{L_{k,k+1}},$$

$$k = 2, 3, \dots, N-1;$$

$$L_{12} = \sqrt{\frac{\alpha_2 L_{r_2} Z_0}{(\omega_B - \omega_H) R_{ВХ}}};$$

$$L_{k,k+1} = \frac{\omega_0}{\omega_B - \omega_H} \sqrt{\alpha_k \alpha_{k+1} L_{r_k} L_{r_{k+1}}},$$

$$k = 2, 3, \dots, N-2,$$

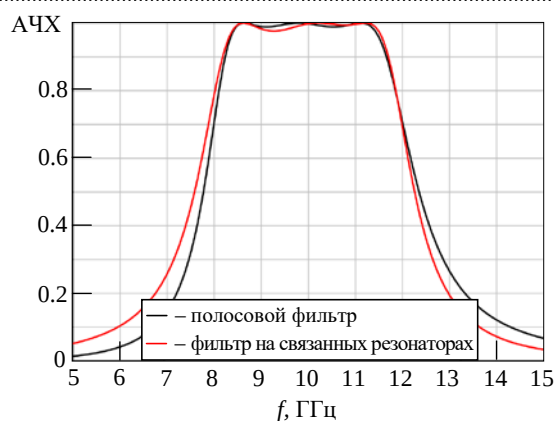


Рис. 5. АЧХ полосового фильтра и фильтра на связанных резонаторах

Fig. 5. Amplitude responses of band-pass filter and filter on coupled resonators

$$L_{N-1, N} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-1} L_{r_{N-1}} Z_0}{(\omega_B - \omega_H) R_{\text{ВЫХ}}}}.$$

На рис. 5 приведены АЧХ полосового фильтра Чебышева и рассчитанного на его основе резонаторного фильтра. Как видно, представленные характеристики имеют хорошее совпадение в области полосы пропускания 8...12 ГГц.

Синтез и моделирование ФКЭ. Как отмеча-

лось ранее, ПО для синтеза ФКЭ разработано в среде MATLAB. Рабочее окно программы показано на рис. 6.

Получив все необходимые исходные данные, программа рассчитывает резонаторный фильтр, его АЧХ и фазочастотную характеристику (ФЧХ), которые отображаются справа. Значения емкостей внутренних резонаторов $C_2 \dots C_{N-1}$ вводятся в дополнительные диалоговые окна. Учитывая электрическую и магнитную постоянные (ϵ_0 , μ_0), а также эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости выбранного материала подложки (ϵ_{ef} , μ_{ef}), программа пересчитывает синтезированный резонаторный фильтр в размеры ФКЭ по следующим формулам:

$$s_i = \frac{2D \arcsin \left[\exp \left(-\frac{\pi C_i}{2D \epsilon_0 \epsilon_{\text{ef}}} \right) \right]}{\pi};$$

$$w_{i,j} = \frac{2D \arcsin \left[\exp \left(-\frac{2\pi L_{i,j}}{D \mu_0 \mu_{\text{ef}}} \right) \right]}{\pi};$$

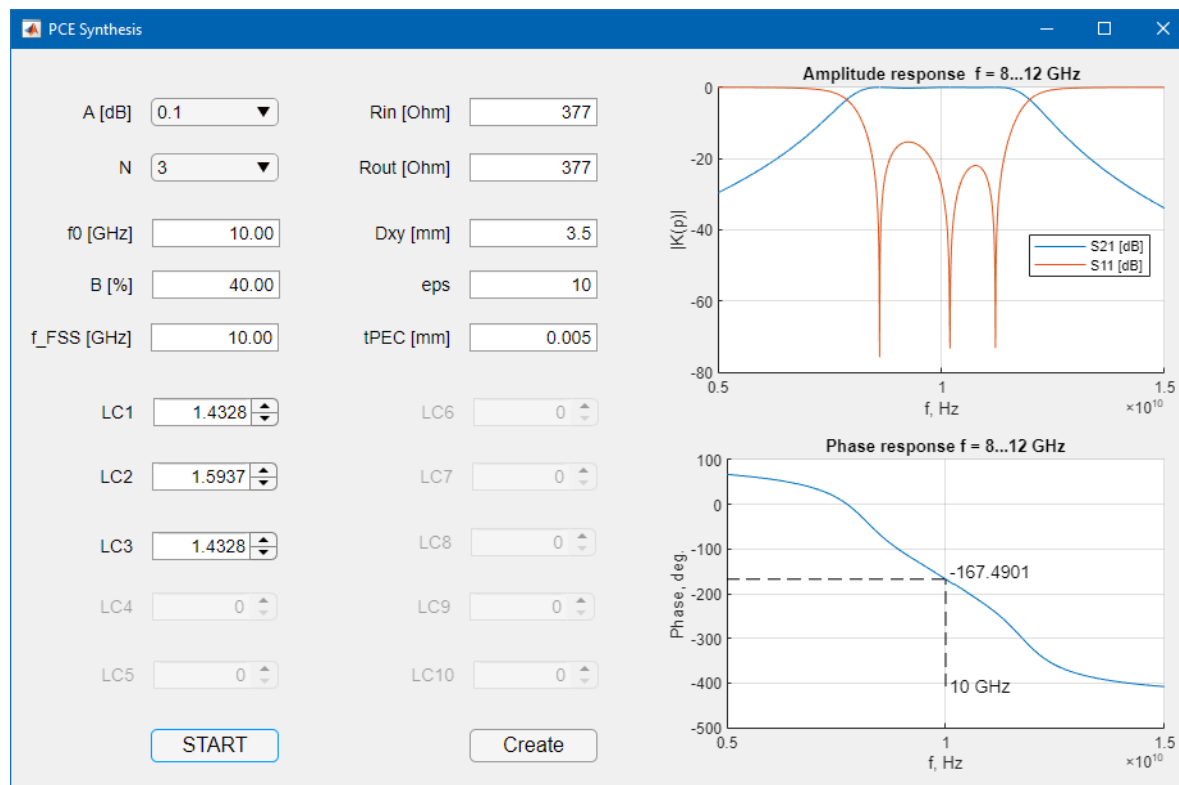


Рис. 6. Окно программы

Fig. 6. Software window

Табл. 2. Номиналы элементов фильтров и размеры элементов ЧСП

Tab. 2. Nominal values of filter elements and dimensions of frequency selective surface elements

Полосовой фильтр	Резонаторный фильтр	ЧСП 1	ЧСП 2
$C_1 = C_3 = 0.1512$ пФ	$C_1 = C_3 = 0.1512$ пФ	$s_1 = s_3 = 0.714$ мм	$s_1 = s_3 = 0.813$ мм
$C_2 = 0.011$ пФ	$C_2 = 0.2158$ пФ	$s_2 = 0.219$ мм	$s_2 = 0.624$ мм
$L_1 = L_3 = 1801.2$ пГн	$L_1 = L_4 = 1053.1$ пГн	$w_{12} = w_{23} = 1.084$ мм	$w_{12} = w_{23} = 0.797$ мм
$L_2 = 23906$ пГн	$L_2 = L_3 = 1801.2$ пГн	$ha_{12} = h\beta_{23} = 1.059$ мм	$ha_{12} = h\beta_{23} = 1.052$ мм
	$L_{12} = L_{23} = 809.93$ пГн	$ha_{23} = h\beta_{12} = 0.473$ мм	$ha_{23} = h\beta_{12} = 0.797$ мм

$$h_{\alpha(\beta)\{i, i+1\}} = \frac{L_{\alpha(\beta)\{i, i+1\}}}{\mu_0 \mu_{ef} \alpha(\beta)\{i, i+1\}}.$$

Для электродинамического моделирования несколько идентичных ФКЭ можно объединить, образуя пространственный фильтр в виде ЧСП. В табл. 2 приведены номиналы элементов фильтров и размеры элементов ЧСП ($f_0 = 10$ ГГц; $BW = 40\%$; $A = 0.1$ дБ). Стоит отметить, что характеристики пространственного фильтра на ЧСП 1 значительно отличаются от характеристик фильтров на сосредоточенных элементах (рис. 7 и 8). В связи с этим в формулы были введены поправочные коэффициенты и получен фильтр ЧСП 2.

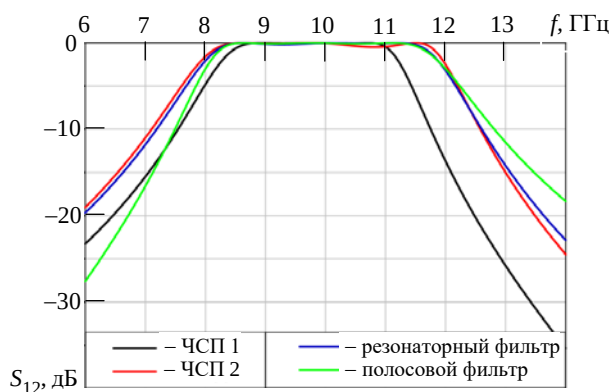


Рис. 7. Коэффициент передачи различных фильтров

Fig. 7. Transmission coefficients of the filters versus frequency

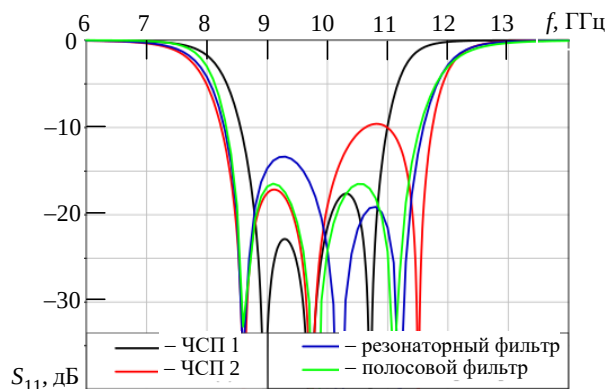


Рис. 8. Коэффициент отражения различных фильтров

Fig. 8. Reflection coefficients of the filters versus frequency

Размеры D ФКЭ для обеих структур были выбраны равными 3.5 мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 10$, сопротивление $Z_0 = 377$ Ом.

Результаты электродинамического моделирования в виде графиков коэффициентов передачи (S_{12}) и отражения (S_{11}) двух пространственных фильтров приведены на рис. 7 и 8. Для сравнения представлены эти же характеристики двух фильтров на сосредоточенных элементах, из которых и были получены ФКЭ.

Стоит отметить, что характеристики фильтров на сосредоточенных элементах, полученные с помощью реализуемого ПО, совпадают с аналогичными характеристиками таких фильтров, рассчитанными в других программах, что свидетельствует о корректной работе разработанного ПО в этой части.

Моделирование проходных АР. С помощью представленной программы можно синтезировать проходную АР. На ФЧХ элемента влияет центральная частота, на которую рассчитан резонаторный фильтр. При этом каждому ФКЭ будет соответствовать своя смещенная по частоте АЧХ. Полоса пропускания проходной АР в виде ЧСП должна располагаться в рабочем диапазоне частот (например, 10.7...12.7 ГГц для Ку-диапазона). Для этого АЧХ всех ФКЭ при их совмещении должны давать необходимое окно прозрачности, что достигается выбором широкой полосы пропускания (например, 60 %) синтезируемых фильтров. При этом регулировка фазы в Ку-диапазоне должна составлять 360° .

На рис. 9 приведены графики зависимостей фазы коэффициента передачи семи ФКЭ. Характер ФЧХ в диапазоне 10.7...12.7 ГГц близок к линейному и позволяет обеспечить необходимую регулировку задержки фазы прошедшей волны различными ФКЭ. Наклон кривых увеличивается с уменьшением центральной рабочей частоты.

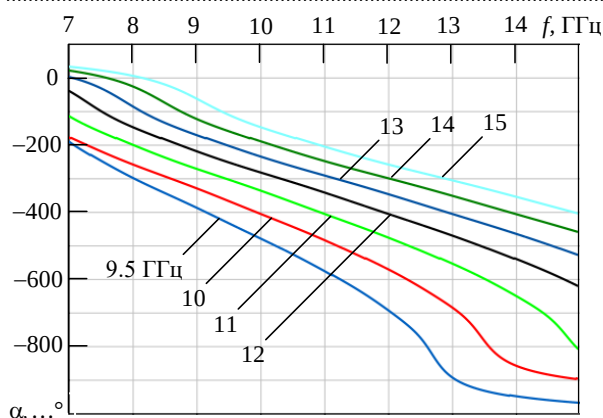


Рис. 9. Зависимость фазы коэффициента передачи от частоты для различных фазокорректирующих элементов

Fig. 9. Frequency dependence of the transmission coefficient phase for different phase-correcting elements

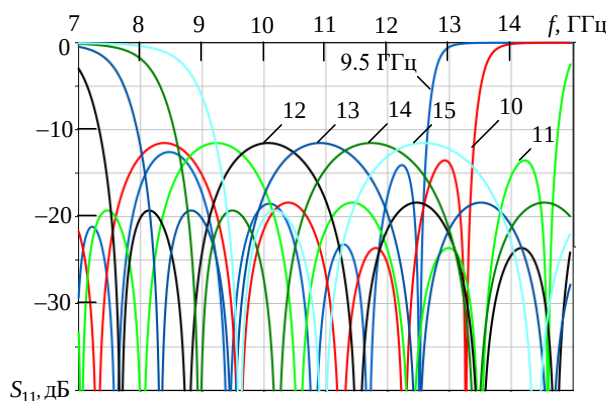


Рис. 10. Коэффициенты отражения фазокорректирующих элементов

Fig. 10. Reflection coefficients of phase-correction elements

На рис. 10 приведены графики зависимостей коэффициентов отражения от частоты семи ФКЭ.

Центральная частота синтезируемых фильтров была выбрана с учетом указанных выше требований. Видно, что при совмещении ФКЭ имеют широкую полосу рабочих частот 37 % (8.7...12.7 ГГц), а в диапазоне 10.7...12.7 ГГц уровень S_{11} не превышает -12 дБ.

Таким образом, с помощью представленного ПО можно синтезировать ФКЭ с требуемыми АЧХ и ФЧХ. Далее по полученным размерам создаются электродинамические модели ФКЭ, характеристики которых рассчитываются при помощи САПР. Топология аналогична показанной на рис. 1, но имеет большее количество слоев. При необходимости производится дополнительная настройка и оптимизация размеров ФКЭ.

Полученные характеристики свидетельствуют о том, что предлагаемая структура пригодна для реализации широкополосных низкопрофильных проходных АР. Проходную структуру на основе пространственных фильтров можно реализовать как в виде фокусирующей линзы, так и в виде отклоняющей системы. Синтез отклоняющей ЧСП, состоящей из ФКЭ, осуществляется по принципу дискретного изменения фазовой задержки в соседних элементах и с учетом принципа зонирования (рис. 11).

Для модели ЧСП, показанной на рис. 11, при синтезе ФКЭ был выбран фильтр 6-го порядка, $D = 6$ мм. В качестве подложки для всех элементов использовали материал толщиной 1 мм и $\epsilon = 2.4$, что позволило реализовать каждый слой ЧСП в одном технологическом процессе. Общая тол-

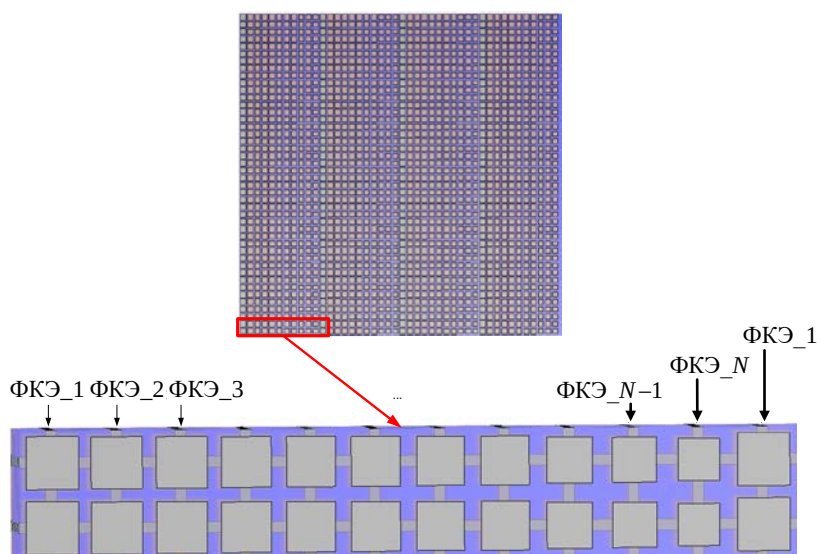


Рис. 11. Модель отклоняющей ЧСП

Fig. 11. Model of a deflecting frequency selective surface

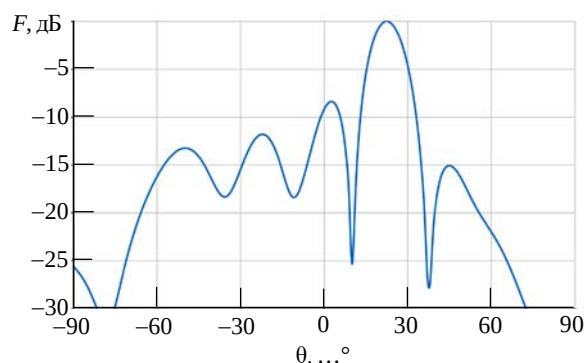


Рис. 12. Отклонение ДН с помощью ЧСП

Fig. 12. Radiation pattern deflection using a frequency selective surface

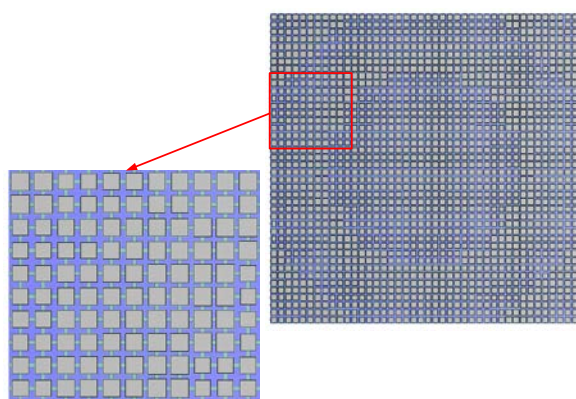


Рис. 13. Модель фокусирующей ЧСП

Fig. 13. Model of a focusing frequency-selective surface

шина АР составила 12 мм, а поперечные размеры – 250 × 250 мм. В данной модели был реализован угол наклона ДН, равный 20°, что видно из графика на рис. 12.

Для синтеза фокусирующей структуры в виде ЧСП (рис. 13) необходимо определить значения фазы электромагнитной волны, создаваемой источником со сферическим фазовым фронтом, на плоскости, находящейся на определенном

фокусном расстоянии F . Эти значения находятся из уравнения сферической волны, записанного в декартовой системе координат:

$$E(x, y) = E_0 \frac{e^{-ik\sqrt{x^2+y^2+F^2}}}{\sqrt{x^2+y^2+F^2}};$$

$$A(x, y) = \arg \left[E_0 \frac{e^{-ik\sqrt{x^2+y^2+F^2}}}{\sqrt{x^2+y^2+F^2}} \right],$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

После этого легко определить фазовые задержки, обеспечиваемые каждым отдельным ФКЭ в ЧСП.

В качестве облучателя представленной АР использовался стандартный конический рупор Ку-диапазона, $F = 260$ мм. Ниже приведены рассчитанные частотные зависимости S_{11} (рис. 14, а) и коэффициента направленного действия (КНД) (рис. 14, б) синтезированной структуры.

Из графиков видно, что S_{11} не превышает –15 дБ, а КНД изменяется от 25.8 до 28 дБ в диапазоне 10.7...12.7 ГГц. При этом коэффициент использования поверхности равен 0.45.

Далее приведены ДН для центральной и крайних значений частоты Ку-диапазона в плоскости E (рис. 15, а) и в плоскости H (рис. 15, б).

Как и ожидалось, наиболее высокий уровень боковых лепестков (–13 дБ) наблюдается на нижней частоте в плоскости H . Ширина ДН изменяется от 5 до 7°.

Обсуждение. В разработанном ПО в качестве исходного фильтра используется фильтр Чебышева 1-го типа. Он удовлетворяет поставленным задачам синтеза проходных АР. В дан-

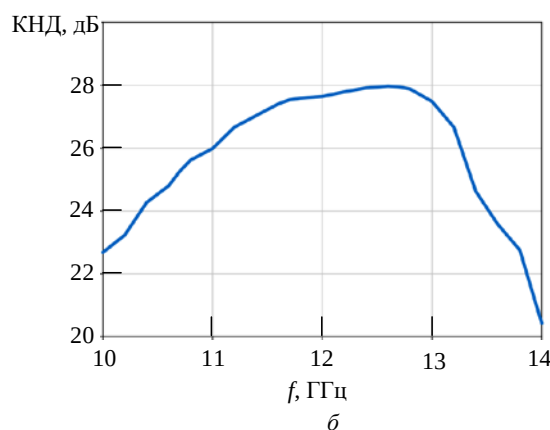
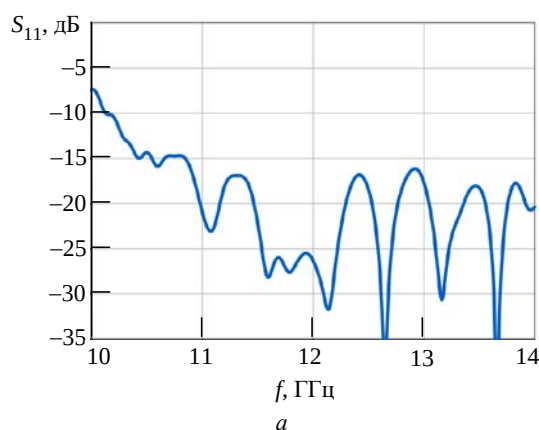


Рис. 14. Частотные зависимости коэффициента отражения (а) и КНД синтезированной структуры (б)

Fig. 14. Reflection coefficient (a) and directional coefficient of the synthesized structure (b)

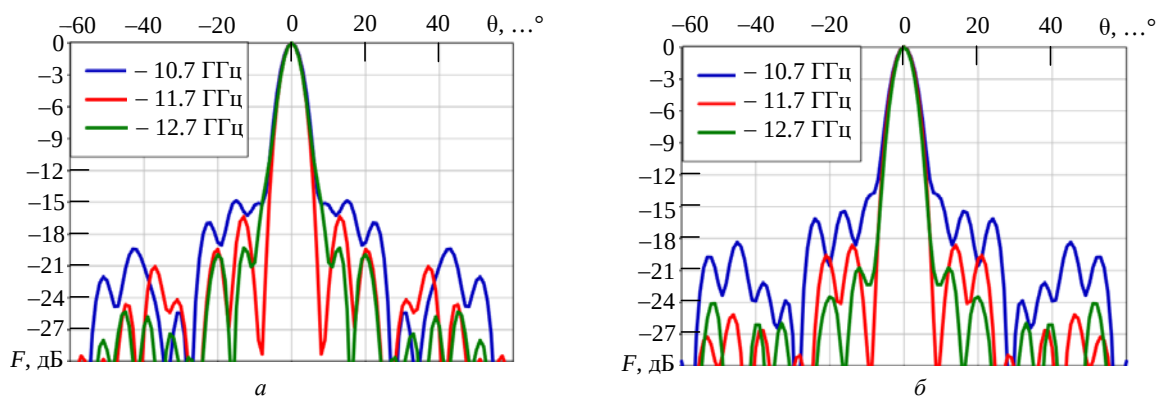


Рис. 15. ДН в плоскости E (а) и в плоскости H (б)

Fig. 15. Radiation pattern in the E -plane (а) and in the H -plane (б)

ной статье приведены характеристики синтезированных фильтров 3-го и 6-го порядков. При этом разработанное ПО позволяет рассчитывать фильтры четного и нечетного порядков с 3-го по 9-й. В дальнейшем планируется внедрение НЧ-прототипов других видов фильтров. Как показано в данной статье, полученные в результате синтеза ФКЭ можно использовать для проектирования отклоняющих и фокусирующих АР проходного типа. В свою очередь на основе отклоняющих структур можно разработать низкопрофильные сканирующие АС. Угол наклона ДН представленной отклоняющей структуры составляет 20° , что в сканирующей системе, содержащей две подобные структуры, позволит достичь максимального отклонения около 45° . Для реализации больших углов сканирования необходимо увеличить отклонение одним слоем до 30° . По результатам математического моделирования именно это значение дает максимальный наклон ДН АС, равный 90° . Следовательно, дальнейшее увеличение угла отклонения в одном слое не имеет смысла.

Закключение. Разработанное ПО позволяет синтезировать резонаторные фильтры и ФКЭ различных порядков по заданным характеристикам. Выходными данными являются как номиналы элементов схемы, так и размеры ФКЭ, а также АЧХ и ФЧХ. При проектировании ЧСП данное ПО позволяет в значительной степени сократить время, затрачиваемое на расчет и синтез большого количества ФКЭ. Построение графиков позволяет качественно оценить характеристики синтезированного фильтра и, при необходимости, внести изменения. Также для некоторых САПР возможно управлять построением электродинамических моделей непосредственно из разработанного ПО, что также положительно сказывается на временных затратах. Синтезированные при помощи данного ПО фокусирующие и отклоняющие структуры можно использовать для построения АР с механоэлектрическим типом сканирования для обеспечения спутниковой связи в движении, а также в наземных терминалах низкоорбитальных и среднеорбитальных систем спутниковой связи.

Авторский вклад

Станковский Андрей Вадимович – математическое моделирование; разработка фильтров на связанных резонаторах; разработка программного обеспечения, написание и отладка кода; электродинамическое моделирование ФКЭ.

Поленга Станислав Владимирович – математическое моделирование; электродинамическое моделирование фокусирующей структуры.

Стригова Елена Алексеевна – электродинамическое моделирование ЧСП; обработка расчетных данных.

Немшон Андрей Данилович – моделирование фильтров на сосредоточенных элементах; электродинамическое моделирование отклоняющей структуры.

Гафаров Евгений Раисович – синтез топологий ФКЭ; обработка расчетных данных.

Саломатов Юрий Петрович – общее руководство проектом.

Author's contribution

Andrey V. Stankovsky, mathematical modeling; filters on coupled resonators development; software development, code writing and debugging; electrodynamic modeling of PCE.

Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра

и их применение в антенных решетках проходного типа

Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna

Stanislav V. Polenga, mathematical modeling; focusing structure electrodynamic modeling.

Yelena A. Strigova, frequency selective surfaces electrodynamic modeling; processing of calculation data.

Andrey D. Nemshon, modeling of filters on concentrated elements; deflecting structure electrodynamic modeling.

Evgeniy R. Gafarov, synthesis of PCE topologies; computational data processing.

Yury P. Salomatov, general scientific project management.

Список литературы

1. Антенные системы с широкоугольным механическим сканированием / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 50–62.
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62
2. Khan M. R. A beam steering technique using dielectric wedges / Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London. 1985. 206 p.
3. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna beam steering technique using dielectric wedges // IEE Proc. H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989. Vol. 136, iss. 2. P. 126–131.
4. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журн. техн. физики. 2013. Т. 83, № 1. С. 3–28.
doi: 10.1134/S1063784213010234
5. Гуляев Ю. В., Лагарьев А. Н., Никитов С. А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестн. РАН. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–449.
6. Engheta N., Ziolkowski R. W. Metamaterials: physics and engineering explorations. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
doi: 10.1002/0471784192
7. Полосно-пропускающий фильтр из диэлектрических слоев с субволновыми решетками полосковых проводников на границах / Б. А. Беляев, В. В. Тюрнев, А. С. Волошин, Ан. А. Лексиков, Р. Г. Галеев, В. Ф. Шабанов // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494, № 1. С. 75–81.
doi: 10.31857/s2686740020050041
8. Al-Joumayly M. A., Behdad N. Wideband Planar Microwave Lenses Using Sub-Wavelength Spatial Phase Shifters // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, № 12. P. 4542–4552.
doi: 10.1109/TAP.2011.2165515
9. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A wide-scan printed planar K-band microwave lens // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005. Vol. 4. P. 313–316.
doi: 10.1109/APS.2005.1552652
10. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices // Int. J. of Sci. & Eng. Research. 2013. Vol. 4, iss. 7. P. 109–115.
11. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley-Interscience, 2000. 440 p.
doi: 10.1002/0471723770
12. A broadband sub-wavelength phase-correcting element for transmit antenna arrays / A. D. Nemshon, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, V. S. Panko, Yu. P. Salomatov // 24th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, 07–13 Sept. 2014. IEEE, 2014. P. 469–470.
doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959483
13. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces / A. V. Stankovsky, Ye. A. Litinskaya, A. D. Nemshon, S. V. Polenga, Yu. P. Salomatov // Ural Symp. on Biomedical Eng., Radioelectronics and Information Technology, Yekaterinburg, Russia, 13–14 May 2021. IEEE, 2021. P. 234–237.
doi: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455106
14. Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches / O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Raisanen, S. A. Tretyakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, № 6. P. 1624–1632.
doi: 10.1109/TAP.2008.923327
15. Li M., Al-Joumayly M. A., Behdad N. Broadband True-Time-Delay Microwave Lenses Based on Miniaturized Element Frequency Selective Surfaces // IEEE transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61, № 3. P. 1166–1179.
doi: 10.1109/TAP.2012.2227444
16. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam // IEEE transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61, № 6. P. 3086–3092.
doi: 10.1109/TAP.2013.2253298
17. Zverev A. I. Handbook of filter synthesis. New York: John Wiley and Sons, 1967. 592 p.
18. Al-Joumayly M. A., Behdad N. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements // IEEE transactions on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, № 12. P. 4033–4041.
doi: 10.1109/TAP.2010.2078474
19. Алексеев Л. В., Знаменский А. Е., Лоткова Е. Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. М.: Связь, 1976. 281 с.

Информация об авторах

Станковский Андрей Вадимович – кандидат технических наук (2023), инженер-исследователь, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; сканирующие антенные системы; квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: stankovskiy_a@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Поленга Станислав Владимирович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009, Сибирский федеральный университет), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 58 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; отражательные антенные решетки, квазиоптические антенны, метаматериалы.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: twinlive@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Стригова Елена Алексеевна – кандидат технических наук (2022), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 42 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая связь; сканирующие антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ylitinskaya@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Немшон Андрей Даниилович – магистр по направлению "Радиотехника" (2013, Сибирский федеральный университет), техник кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 19 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; сканирующие антенные системы; квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: nemshon@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0480-5826>

Гафаров Евгений Раисович – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая радионавигация; цифровые антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: Egafarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

References

1. Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Salomatov Yu. P. Antenna Systems with Wide-Angle Mechano-electrical Beam Steering. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, iss. 5, pp. 50–62. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62
2. Khan M. R. A beam steering technique using dielectric wedges. Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 1985, 206 p.
3. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna Beam Steering Technique Using Dielectric Wedges. IEE Proc. H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989, vol. 136, iss. 2, pp. 126–131.
4. Vendik I. B., Vendik O. G. Metamaterials and Their Application in Microwaves: A Review. J. of Technical Physics. 2013, vol. 83, no. 1, pp. 3–28. (In Russ.)
doi: 10.1134/S1063784213010234
5. Guljaev Ju. V., Lagar'kov A. N., Nikitov S. A. Metamaterials: Fundamental Research and Prospects of Application. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2008, vol. 78, no. 5, pp. 438–449. (In Russ.)
6. Engheta N., Ziolkowski R. W. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. New Jersey,

John Wiley & Sons, 2006, 440 p.
doi: 10.1002/0471784192

7. Beljaev B. A., Tjurnev V. V., Voloshin A. S., Leksikov An. A., Galeev R. G., Shabanov V. F. Band-pass Filter on Dielectric Layers with Strip Conductor Grids on Their Interface. Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences. 2020, vol. 494, no. 1, pp. 75–81. (In Russ.)
doi: 10.31857/s2686740020050041

8. Al-Joumayly M. A., Behdad N. Wideband Planar Microwave Lenses Using Sub-Wavelength Spatial Phase Shifters. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011, vol. 59, no. 12, pp. 4542–4552.
doi: 10.1109/TAP.2011.2165515

9. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A Wide-Scan Printed Planar K-Band Microwave Lens. IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005, vol. 4, pp. 313–316.
doi: 10.1109/APS.2005.1552652

10. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices. Int. J. of Sci. & Eng. Research. 2013, vol. 4, iss. 7, pp. 109–115.

11. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York, Wiley-Interscience, 2000, 440 p.
doi: 10.1002/0471723770

12. Nemshon A. D., Alexandrin A. M., Polenga S. V., Stankovsky A. V., Panko V. S., Salomatov Yu. P. A Broadband Sub-Wavelength Phase-Correcting Element for Transmit Antenna Arrays. 24th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, 07–13 Sept. 2014, IEEE, 2014, pp. 469–470.
doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959483

13. Stankovsky A. V., Litinskaya Ye. A., Nemshon A. D., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces. Ural Symp. on Biomedical Eng., Radioelectronics and Information Technology. Yekaterinburg, Russia, 13–14 May 2021. IEEE, 2021. P. 234–237.
doi: 10.1109/USBERIT51232.2021.9455106

14. Luukkonen O., Simovski C., Granet G., Goussetis G., Lioubtchenko D., Raisanen A. V., Tretyakov S. A. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008, vol. 56, no. 6, pp. 1624–1632.

doi: 10.1109/TAP.2008.923327

15. Li M., Al-Joumayly M. A., Behdad N. Broadband True-Time-Delay Microwave Lenses Based on Miniaturized Element Frequency Selective Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 3, pp. 1166–1179.
doi: 10.1109/TAP.2012.2227444

16. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 6, pp. 3086–3092.
doi: 10.1109/TAP.2013.2253298

17. Zverev A. I. Handbook of Filter Synthesis. New York, John Wiley and Sons, 1967, 592 p.

18. Al-Joumayly M. A., Behdad N. A Generalized Method for Synthesizing Low-Profile, Band-Pass Frequency Selective Surfaces with Non-Resonant Constituting Elements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010, vol. 58, no. 12, pp. 4033–4041.
doi: 10.1109/TAP.2010.2078474

19. Alekseev L. V., Znamensky A. E., Lotkova E. D. Electric Filters of Meter and Decimeter Ranges. Moscow, 1976, 281 p. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey V. Stankovsky, Cand. Sci. (Eng.) (2023), Research Engineer, Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; scanning antenna systems; quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: stankovskiy_a@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Stanislav V. Polenga, Master's degree in Radio Engineering (2009, Siberian Federal University), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 58 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; reflectarrays; quasi-optical antennas; metamaterials.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Yelena A. Strigova, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 42 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite communication; scanning antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Andrey D. Nemshon, Master's degree in Radio Engineering (2013, Siberian Federal University), Technician of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 19 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; scanning antenna systems; quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: nemshon@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0480-5826>

Evgeniy R. Gafarov, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associate professor of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite radionavigation; digital antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: Egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>