

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.3.095.222

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СНИЖЕНИЯ
РАССЕИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ© 2019 г. А. Ю. Гринева^{1, *}, А. П. Волков^{1, 2, **}¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993 Москва, Волоколамское шоссе, 4²АО «Концерн радиостроения «ВЕГА»,
Российская Федерация, 121170 Москва, Кутузовский просп., 34

*E-mail: grinevau@yandex.ru

**E-mail: alexander.p.volkov@gmail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2018 г.

После доработки 28.09.2018 г.

Принята к публикации 17.10.2018 г.

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование снижения рассеивающих свойств линейных антенных решеток вне их рабочего диапазона с помощью полосно-заграждающих частотно-селективных структур (ЧСС). Для исследования выбрана двухслойная ЧСС на основе квадратных петель, расположенных в разных слоях диэлектрического основания. Проведено электродинамическое моделирование диаграммы обратного рассеяния (ДОР) линейной периодической структуры, экранированной ЧСС. Выявлен и экспериментально подтвержден эффект подавления отдельных дифракционных лепестков рассеяния в ДОР. Дано физическое объяснение выявленного эффекта и предложены меры по его устранению. Приведены результаты электродинамического моделирования антенной системы, состоящей из ФАР L-диапазона, двухслойной ЧСС, расположенной перед ФАР, и поглощающего материала.

DOI: 10.1134/S0033849419060020

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что радиолокационная заметность летательного аппарата определяется в основном его сильно отражающими элементами: воздухозаборниками двигателей, фюзеляжем, крыльями и т.д. [1]. Антенны и, в частности, фазированные антенные решетки (ФАР) относятся к таким сильно отражающим элементам, характеристика рассеяния которых (эффективная поверхность рассеяния) $\sigma(f, \theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0)$ и диаграмма обратного рассеяния (ДОР) $(f, \theta, \varphi) = \sigma(f, \theta = \theta_0, \varphi = \varphi_0)$ зависят от поляризации падающего поля, углов падения и наблюдения, геометрии антенны и ее электрофизических параметров, а также частоты падающего поля [1–5].

Возникновение при определенных условиях облучения антенных решеток (АР) многочисленных дифракционных лепестков рассеяния [1, 3, 5] в ДОР АР – мощных отражений, не являющихся зеркальным отражением, – приводит к тому, что АР может вносить наибольший вклад в уровень эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) летательного аппарата (ЛА) в широком секторе углов облучения, увеличивая радиолокационную заметность ЛА.

Частотно-селективные структуры (ЧСС) являются резонансными структурами, состоящими из металлических элементов, диэлектрических слоев, а также слоев с поглощением [6–9] и используются как пространственные фильтры. ЧСС могут обладать частотной избирательностью, характеризуются собственной рабочей полосой радиочастот (в общем случае отличающейся от рабочей полосы частот АР), имеют частотную характеристику типа фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающего фильтра (ППФ), полосно-заграждающего и др. Кардинальный способ снижения уровня ЭПР АР с помощью ЧСС – поглощение падающих радиоволн вне рабочей полосы частот АР. Однако более практичен другой способ действия ЧСС: в рабочей полосе частот АР – хорошая радиопрозрачность ЧСС, а вне рабочей полосы частот АР – максимальный уровень отражения волн от поверхности ЧСС. Использование ЧСС для снижения рассеивающих свойств АР рассмотрено в ряде работ, например [10–17].

В [10] рассмотрены свойства и возможности частотно-селективных поглощающих (диссипативных), отражающих (реактивных) и переизлучающих структур, выполненных на основе вибра-

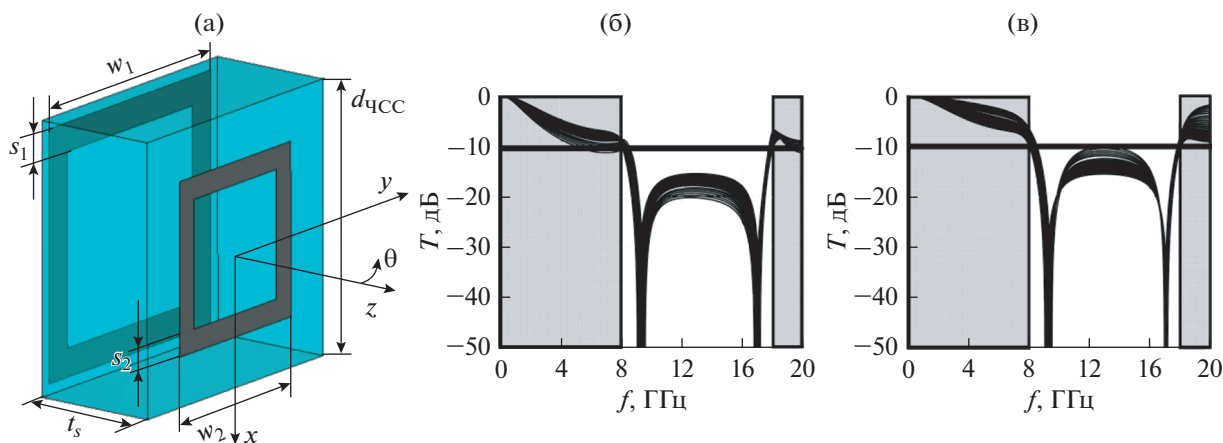


Рис. 1. Двухслойная частотно-селективная структура: геометрия единичной ячейки (а) и коэффициент прохождения ЧСС для TE -поляризованной (б) и TM -поляризованной (в) волн.

торных решеток, для уменьшения рассеивающих свойств ФАР. В [11] рассмотрен частотно-избирательный обтекатель на основе полосно-пропускающей двухслойной ЧСС для ФАР X-диапазона. Однако в [10, 11] не учитывалось влияние АР на отражающие свойства ЧСС. В работах [8, 9] рассмотрены полосно-пропускающие ЧСС для уменьшения ЭПР антенн и АР путем перераспределения мощности падающей плоской электромагнитной (ЭМ) волны в пространстве. В [12] рассмотрена интеграция антенны типа монополь с коническим обтекателем на основе полосно-пропускающей ЧСС. Исследовано влияние частотно-селективного обкателя на характеристики согласования и направленности антенны. Приведены характеристики рассеяния антенны с частотно-селективным обтекателем. В [13] рассмотрена интеграция полосно-пропускающей двухслойной ЧСС с щелевой АР и показано, что при нормальном падении плоской ЭМ-волны использование ЧСС позволяет уменьшить амплитуду незеркальных лепестков бистатической ДОР на 20 дБ.

Полосно-заграждающие ЧСС в задачах снижения радиолокационной заметности используются в качестве проводящего основания (рефлектора) антенны [14, 15]. В работе [15] рассмотрено использование полосно-заграждающей ЧСС в качестве проводящего основания вибраторной антенной решетки, состоящей из 4×2 элементов, для снижения ее радиолокационной заметности. Вне рабочей полосы АР частотно-селективный рефлектор пропускает падающую ЭМ-волну, что позволяет снизить ЭПР АР в полосе частот 5.5...13.5 ГГц на 10 дБ м^2 и более. В работе [16] приведены результаты разработки частотно-селективного обкателя, который позволяет поглощать падающую ЭМ-волну на частотах, выше рабочей частоты антенны. Для дальнейших исследований в работе [17] проведено тестирование, в результате которого выявлена возможность ис-

пользования резистивных ЧСС для уменьшения ЭПР щелевой АР. Рассмотрено влияние резистивной ЧСС как на двухпозиционную, так и на однопозиционную ЭПР. Проведен анализ влияния резистивной ЧСС на коэффициент усиления АР.

Цель работы — численное и экспериментальное исследование возможности снижения рассеивающих свойств линейной ФАР вне рабочего диапазона частот с помощью полосно-заграждающих ЧСС.

1. ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ СТРУКТУР

Проектирование ЧСС для уменьшения ЭПР АР включает ряд необходимых этапов: синтез фильтра-прототипа на сосредоточенных элементах [18]; выбор моделей периодических решеток, используемых для перехода от фильтра-прототипа к реальной электродинамической структуре ЧСС, а также выбор методов анализа периодических решеток для определения геометрических и электрофизических параметров ЧСС [19, 20]; проведение электродинамического моделирования ЧСС с использованием периодических граничных условий, включающее сопоставление различных методов моделирования (FDTD, FEM) [14, 21]; оценка влияния геометрических и электрофизических параметров ЧСС, угла падения и поляризации волны на характеристики ЧСС; моделирование ФАР совместно с ЧСС, включающее оценку влияния ЧСС на характеристики согласования и направленности ФАР (в полосе рабочих частот ФАР), а также оценку ДОР ФАР с ЧСС.

В соответствии с изложенными этапами были определены геометрические размеры двухслойной ЧСС (рис. 1а), которая состоит из двух печатных периодических решеток на основе квадратных петель, расположенных в разных слоях диэлектрического основания. Двухслойная ЧСС имеет полосу заграждения по уровню коэффициента прохожде-

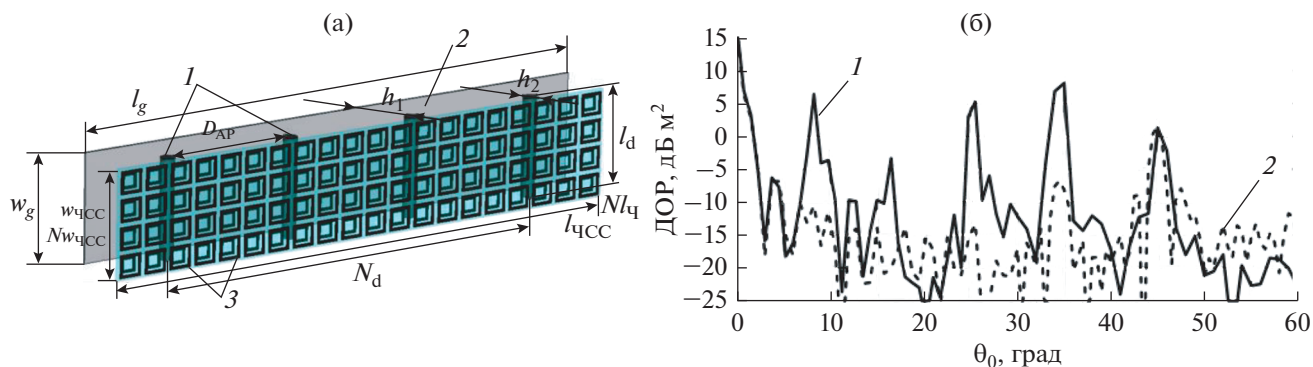


Рис. 2. Вид ЛПС с двухслойной ЧСС (а) и диаграмма обратного рассеяния (б) на частоте 11 ГГц: а – ЛПС (1), проводящий экран (2), ЧСС (3); б – ДОР ЛПС без ЧСС (1) и с ЧСС (2).

ния $T \leq -10$ дБ в полосе рабочих частот 8...18 ГГц. Размеры ЧСС: период $d_{чсс} = 4.8$ мм, размер печатных элементов $w_1 = 4.58$ мм, $w_2 = 3.57$ мм, ширина металлизации печатных элементов $s_1 = 0.2$ мм, $s_2 = 0.25$ мм. Диэлектрическое основание ЧСС толщиной $t_s = 2.7$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.3$. На рис. 16, 1в приведены рассчитанные методом конечных элементов (КЭ) графики частотной зависимости коэффициента прохождения T двухслойной ЧСС для TE - и TM -поляризации при изменении угла падения плоской электромагнитной волны от 0° до 60° с шагом 2° .

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ С ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕЙ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЙ СТРУКТУРОЙ

Проведен анализ рассеивающих свойств конечной линейной АР, экранированной полосно-заграждающей ЧСС, вне рабочего диапазона частот. Для этого была выбрана модель линейной периодической структуры (ЛПС) из восьми элементов, экранируемой синтезированной двухслойной ЧСС (рис. 2а). Параметры ЛПС (1): шаг ЛПС $D_{AP} = 96$ мм, радиус элемента ЛПС 5 мм, длина элемента ЛПС $l_d = 68$ мм, количество элементов ЛПС $N_d = 8$. Расстояние от ЧСС (3) до ЛПС $h_2 = 15$ мм, длина ЧСС $l_{чсс} = 768$ мм, количество ячеек ЧСС на длину $Nl_{чсс} = 160$, ширина ЧСС $w_{чсс} = 76.8$ мм, количество ЧСС на ширину $Nw_{чсс} = 16$. Расстояние от ЛПС до проводящего экрана $h_1 = 25$ мм (2), а полное расстояние от ЧСС до проводящего экрана $h_1 + h_2 = 40$ мм. На рис. 2б приведены рассчитанные методом конечных разностей во временной области ДОР ЛПС без ЧСС (кривая 1) и с ЧСС (кривая 2) при вертикальной поляризации падающей ЭМВ.

Использование ЧСС позволило снизить амплитуду дифракционных лепестков Брэгга ($n = 1...4$) на 15...20 дБ. Однако пятый дифракционный лепесток

Брэгга ($\theta_0 = 45^\circ$) при наличии ЧСС свой уровень не изменил. Механизм этого следующий. При падении волны $\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(-i\vec{k}\vec{r})$ на систему АР–ЧСС волна в полосе заграждения ЧСС должна отражаться от полосно-заграждающей ЧСС, что должно уменьшать амплитуду дифракционных лепестков Брэгга в полосе радиолокационной защиты. Однако небольшая часть энергии зондирующей волны всегда проходит сквозь ЧСС. Используя модель многоэлементной линейной антенной решетки, запишем постоянную распространения ЧСС в направлении дифракционного лепестка Брэгга:

$$k_{zn}^{чсс} = \pm k_{чсс} \left[1 - \left[(m\lambda_{чсс}/d_{чсс}) - \sin(\theta) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $k_{чсс} = 2\pi/\lambda_{чсс}$ ($\lambda_{чсс}$ – длина падающей на структуру ЭМ-волны), θ – угол падения ЭМ-волны, m – индекс гармоник Флоке < ЧСС.

Поскольку $d_{чсс}/\lambda_{чсс} < 1/2$, то в области между ЧСС–АР (область $h_1 + h_2$ на рис. 2) возбуждается распространяющаяся основная мода с индексом $m = 0$ и спектр затухающих мод. Основная мода отражается от АР (элементов, расположенных над проводящим экраном), порождая, в силу условия $D_{AP}/\lambda_{чсс} > 1/2$, новый более широкий спектр гармоник АР с постоянными распространения:

$$k_{zn}^{чсс} = \pm k_{чсс} \left[1 - \left[(n\lambda_{чсс}/D_{AP}) - \sin(\theta) \right]^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Эти рассеянные гармоники высшего порядка многократно переотражаются между проводящим экраном, АР и ЧСС. Область между проводящим экраном представляет собой резонатор с полупрозрачной стенкой (также известный как резонатор Фабри–Перо) [22]. При определенных расстояниях между ЧСС и проводящим экраном (первое уравнение системы (3)), возникает резонанс отдельных гармоник:

$$\begin{cases} \Psi_{чсс}^R(f, \theta) - \pi - \frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta) \approx 2\pi N \\ \sin(\theta) = \frac{nc}{2D_{AP}f} \\ N = 0, 1, 2, \dots, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (3)$$

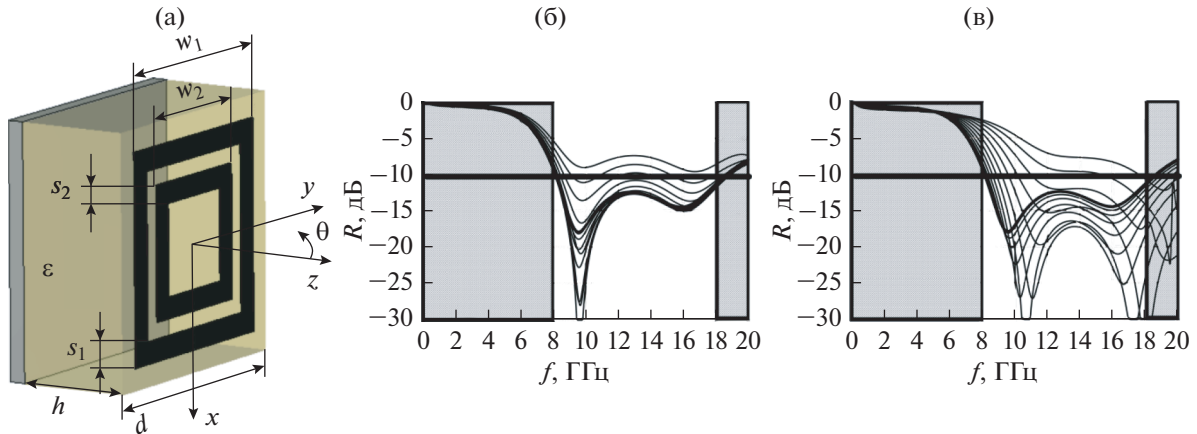


Рис. 3. Поглощающая структура на основе резистивного печатного элемента: геометрия единичной ячейки (а) и коэффициент отражения для TE -поляризованной (б) и TM -поляризованной (в) ЭМ-волны.

где $\Psi_{\text{ЧСС}}^R(f, \theta)$ – фаза коэффициента отражения от ЧСС, N – номер резонансной моды резонатора, n – номер дифракционного лепестка Брэгга, c – скорость света.

Вследствие высокого коэффициента отражения в полосе запираания ЧСС резко увеличивается амплитуда той гармоники, для которой выполняются условия резонанса (3), и это ослабляет полосоно-заграждающие свойства ЧСС для некоторых дифракционных лепестков Брэгга. Угловое θ и частотное f положение n -го неподавленного дифракционного лепестка Брэгга в ДОР АР можно оценить из системы уравнений (3): первое определяет частотную зависимость резонансных углов резонатора с полупрозрачной стенкой [22], а второе – угловое положение n -дифракционного лепестка Брэгга [1, 3, 5]. Напомним, что похожий резонансный эффект возникает в совмещенных двухчастотных АР [23].

Заметим, что первое уравнение системы (5) получено для ненагруженной ЧСС (не учитывает наличие ЛПС) дает лишь приближенное решение, и для повышения точности необходимо реализовать численное моделирование системы ЧСС–ЛПС–проводящий экран. Выше дана интерпретация механизма неподавления отдельных дифракционных лепестков Брэгга ДОР системы ЧСС–ЛПС–экран.

Возможны два способа устранения неподавленных дифракционных лепестков Брэгга: 1) уменьшение расстояния от ЧСС до проводящего экрана или 2) введение поглощающих материалов, располагаемых на проводящем экране. Как правило, уменьшение расстояния от ЧСС до проводящего экрана ($h_1 + h_2$) затруднено в связи со значительной высотой профиля АР (h_1).

При втором способе в качестве поглощающего материала используется поглотитель, представляющий собой периодическую решетку из резистив-

ных печатных элементов, расположенных на тонком диэлектрическом слое с проводящим экраном [24]. На рис. 3а приведена геометрия единичной ячейки такой поглощающей структуры. Параметры поглощающего материала $h = 3.5$ мм, диэлектрическая проницаемость подложки поглотителя $\epsilon = 1.1$, $d = 8.0$ мм, $w_1 = 6.6$ мм, $w_2 = 4.2$ мм, $s_1 = 0.7$ мм, $s_2 = 0.67$ мм, $R = 30.0$ Ом/квадрат. На рис. 3б, 3в приведены рассчитанные методом КЭ частотные зависимости коэффициента отражения в диапазоне углов падения $0^\circ \dots 60^\circ$ плоской ЭМ-волны с шагом 5° для TE - и TM -поляризации.

На рис. 4а приведена геометрия задачи. Вычисленные методом конечных разностей во временной области (КРВО) ДОР восьмиэлементной ЛПС без ЧСС (кривая 1), ЛПС с ЧСС (кривая 2), ЛПС с ЧСС и поглощающим материалом на проводящем экране приведены на рис. 4б. Использование поглощающего материала позволило снизить амплитуду всех дифракционных лепестков Брэгга (в том числе и для $n = 5$).

Чтобы охарактеризовать вклад в поперечник рассеяния эффективную поверхность рассеяния i -го дифракционного лепестка Брэгга в зависимости от частоты введем коэффициент $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$:

$$\sigma_i^{\text{Бр}}(f) = \frac{1}{2\Delta\theta_i} \int_{\theta_i - \Delta\theta}^{\theta_i + \Delta\theta} \text{ДОР}(f, \theta) d\theta, \quad (4)$$

где θ_i – положение i -го дифракционного лепестка Брэгга, определяемое аналитически из (2), $\text{ДОР}(f, \theta)$ – ДОР АР, $2\Delta\theta_i$ – ширина i -го дифракционного лепестка Брэгга.

Коэффициенты $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$ позволяют судить об эффективности уменьшения ДОР АР. На рис. 5 приведены частотные зависимости коэффициента $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$, вычисленные методом FDTD для первых шести дифракционных лепестков Брэгга для

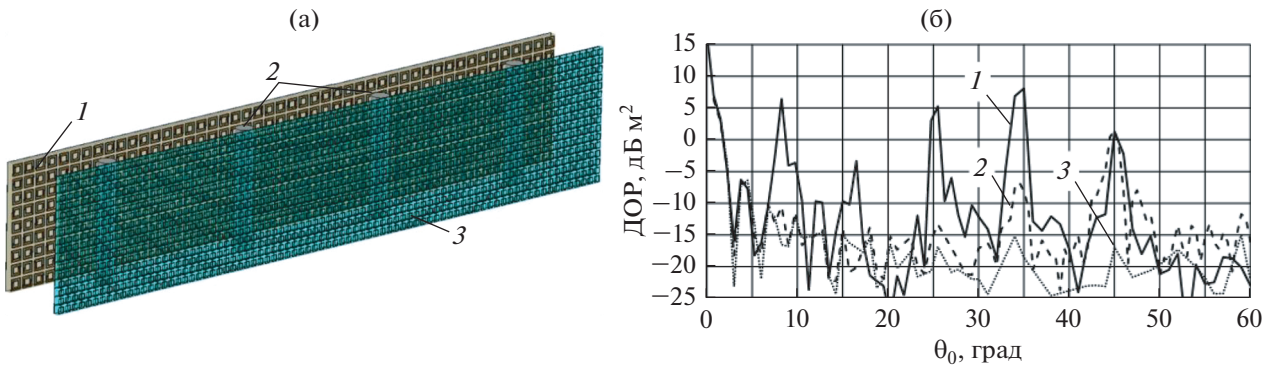


Рис. 4. Введение поглощающего материала для устранения эффекта ослепления ЧСС; *a* – геометрия задачи: проводящий экран, покрытый поглощающим материалом (1), ЛПС (2), ЧСС (3); б – диаграмма обратного рассеяния на частоте 11 ГГц: 1 – ЛПС с проводящим экраном, 2 – ЛПС с ЧСС и проводящим экраном, 3 – ЛПС с ЧСС и проводящим экраном, покрытым поглощающим материалом.

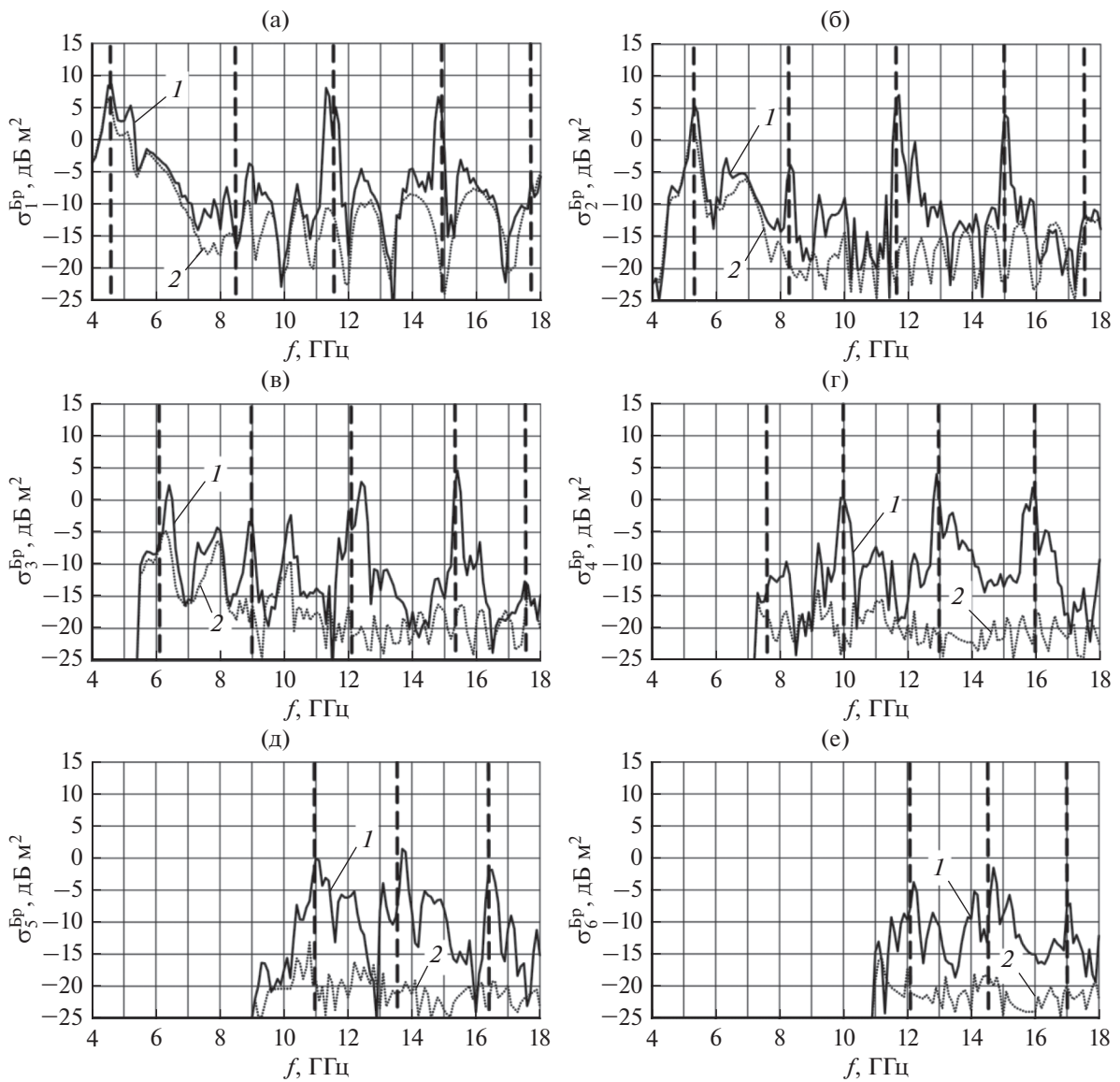


Рис. 5. К устранению эффекта ослепления ЧСС при $n = 1$ (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е): 1 – ЛПС с ЧСС и проводящим экраном, 2 – ЛПС с ЧСС и проводящим экраном, покрытым поглощающим материалом.

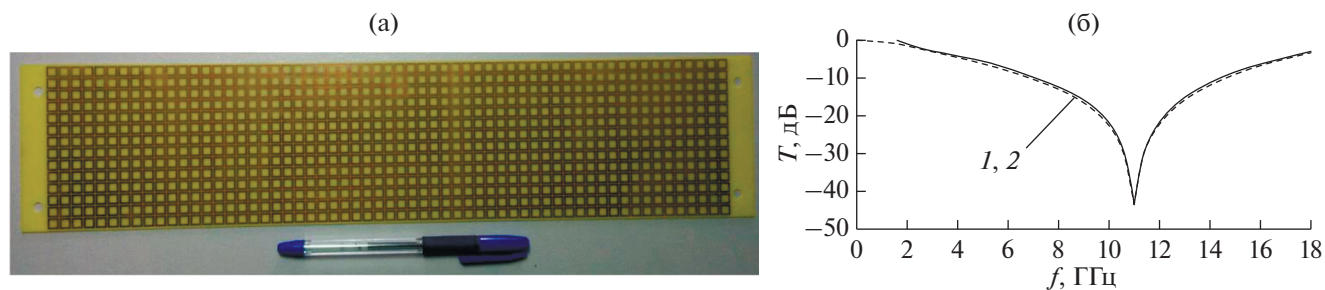


Рис. 6. Макет (а) и частотная зависимость коэффициента прохождения (б) однослойной ЧСС.

ЛПС с проводящим экраном, экранированной двухслойной ЧСС (кривая 1), а также $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$ первых шести дифракционных лепестков Брэгга для ЛПС, экранированной двухслойной ЧСС и проводящим экраном, покрытым поглощающим материалом (кривая 2). Сплошными вертикальными линиями отмечены положения неподавленных резонансных лепестков, определенные по системе уравнений (5). Использование поглощающего материала позволило существенно снизить $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$ для каждого из дифракционных лепестков Брэгга. Значение $\sigma_i^{\text{Бр}}(f)$ ЛПС, экранированной двухслойной ЧСС и проводящим экраном, который покрыт поглощающим материалом, не превышает минус 10 дБ м² в полосе запыриания ЧСС и поглотителя (8...18 ГГц).

3. МАКЕТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения эксперимента была изготовлена однослойная однорезонансная ЧСС (рис. 6а) с периодом $d_{\text{ЧСС}} = 7.0$ мм, размером печатных элементов $w = 6.5$ мм и шириной металлизации печатных элементов $s = 1.1$ мм, вытравленная на подложке из материала FR-4 толщиной 1 мм с

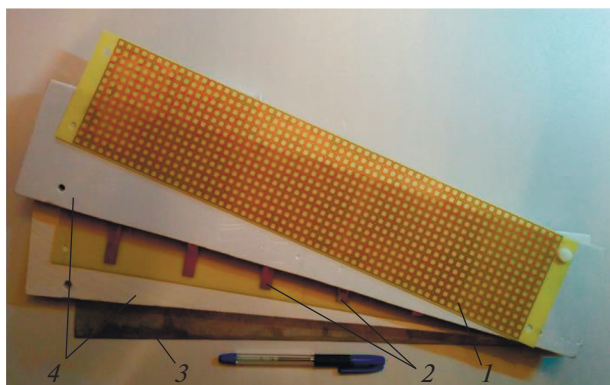


Рис. 7. Макет: ЧСС (1), ЛПС (2), металлический экран (3), пенопласт (4).

диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.3$. На первом этапе измеряли частотную зависимость коэффициента прохождения ЧСС при нормальном падении плоской ЭМ-волны. На рис. 6б приведены измеренные (сплошная кривая) и рассчитанные методом КЭ (штриховая) частотные зависимости коэффициента прохождения ЧСС.

Для выявления неподавленных дифракционных лепестков Брэгга изготовлен макет шестиэлементной ЛПС, которая моделирует АР L-диапазона (рис. 7). ЛПС с периодом $D_{\text{АР}} = 70$ мм вытравлена на подложке из материала FR-4 толщиной 1.5 мм и $\epsilon = 4.3$. Проводящий экран (3) изготовлен из оцинкованного железа толщиной 0.3 мм. Слои ЧСС (1), ЛПС и экрана разделены между собой с помощью слоев пеноплекса (4) толщиной 20 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1.01...1.05$. Общая толщина изготовленного макета 42.5 мм. Длина и ширина макета 450×100 мм.

На рис. 8 приведены результаты измерений на некоторых частотах ДОР ЛПС с проводящим экраном (кривая 1), ЛПС с ЧСС и проводящим экраном (кривая 2). Неподавление дифракционных лепестков Брэгга наблюдается, например, при $f = 5.04$, $\theta_0 = 26^\circ$ и $f = 7.82$, $\theta_0 = 17^\circ$. На частоте 7.82 ГГц наблюдается увеличение амплитуды на 7 дБ дифракционного лепестка Брэгга ЛПС с ЧСС и проводящим экраном по сравнению со случаем без ЧСС. Также на рис. 8 приведены результаты измерений ДОР ЛПС с ЧСС без проводящего экрана (кривая 3), что имитирует наличие “идеального” поглощающего материала на проводящем экране. Удаление проводящего экрана позволяет с помощью ЧСС снизить амплитуду отмеченных неподавленных дифракционных лепестков Брэгга исходной ЛПС на 12...15 дБ. Результаты расчета методом FDTD ДОР модели макета ЛПС с ЧСС и проводящим экраном отмечены кривой 4. Как видно, наблюдается довольно высокая точность совпадения численных и экспериментальных результатов (ср. 4 и 2), особенно в областях, соответствующих дифракционным лепесткам Брэгга.

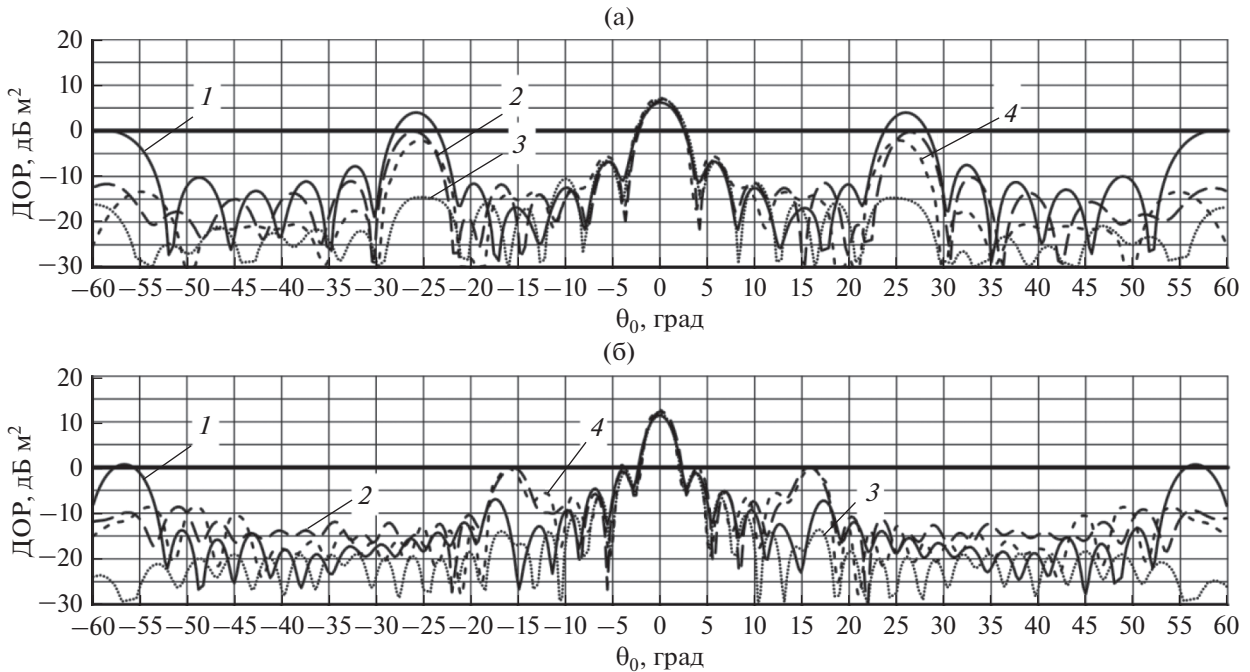


Рис. 8. Результаты измерения (1–3) и расчет методом КРВО (4) диаграммы обратного рассеяния ЛПС с проводящим экраном (кривая 1), ЛПС с ЧСС и проводящим экраном (кривая 2, 4), ЛПС с ЧСС без проводящего экрана (линия 3) при $f = 5.04$ (а) и 7.82 ГГц (б).

4. ПРИМЕНЕНИЕ ЧСС И ПОГЛОТИТЕЛЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ L-ДИАПАЗОНА

В работе [25] были исследованы характеристики рассеяния ФАР L-диапазона на основе металлодиэлектрического неоднородного излучателя (МНИ) с помощью ЧСС, реализующих полосо-заграждающий пространственный фильтр, и отмечен эффект подавления отдельных дифракционных лепестков Брэгга в ДОР ФАР. Воспользуемся полученными результатами для снижения ДОР указанной ФАР. На рис. 9 приведен общий вид излучателя линейной ФАР L-диапазона (1), раз-

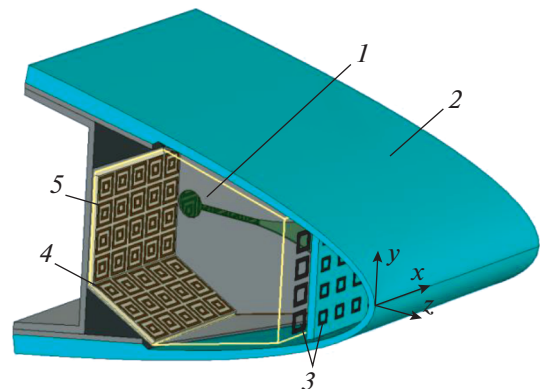


Рис. 9. Общий вид элемента ФАР типа МНИ (1) с двухслойной ЧСС (3) и поглотителем (4, 5); 2 – обтекатель ЛА.

Таблица 1. Коэффициент усиления ФАР L-диапазона

f/f_0	θ , град	Коэффициент усиления, дБ	
		исходная ФАР	ФАР с двухслойной ЧСС и поглотителем
0.769	0	7.6	8.67
0.769	30	8.62	8.74
0.769	45	7.68	9.74
1.0	0	10.1	9.83
1.0	30	8.57	8
1.0	45	7	9
1.231	0	12.1	12.6
1.231	30	12.2	11.6
1.231	45	10.2	10.6

мещенной вдоль носка консоли крыла ЛА под радиопрозрачным обтекателем (2), одновременно являющимся частью аэродинамической поверхности крыла. Двухслойная ЧСС (3) размещается на расстоянии $0.043\lambda_{AP}$ от ФАР. Поглощающий материал (4, 5) размещается на П-образном профиле металлического отражателя. При введении в конструкцию ФАР ЧСС наблюдалось ухудшение качества согласования [24], в связи с чем параметры излучателя ФАР были подстроены с учетом наличия ЧСС и поглощающего материала.

В таблице 1 приведены значения коэффициента усиления исходной ФАР и подстроенной

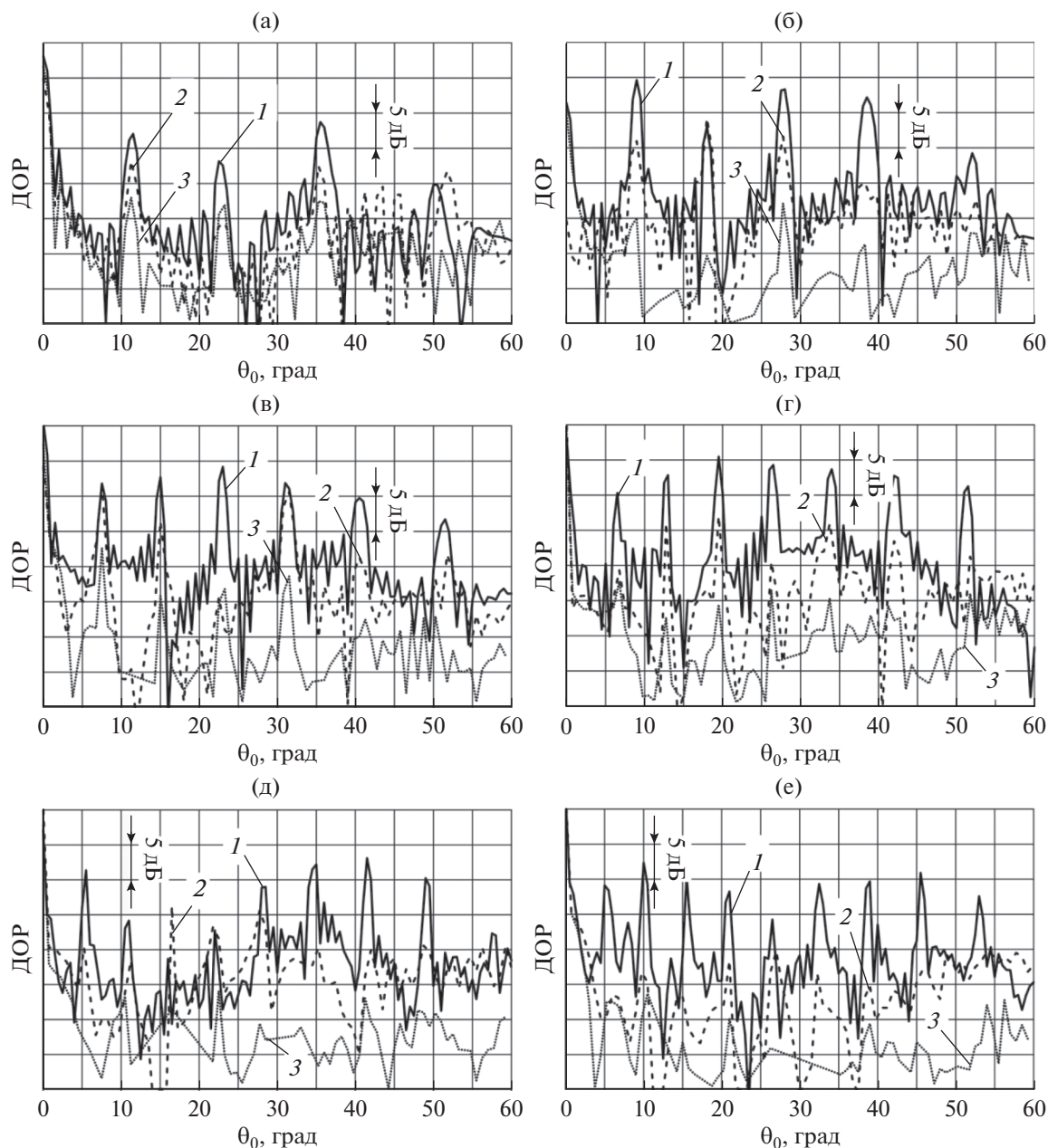


Рис. 10. Диаграмма обратного рассеяния линейной восьмиэлементной ФАР при $D_{AP}/\lambda = 2.6$ (а), 3.2 (б), 3.8 (в), 4.5 (г), 5.3 (д) и 5.6 (е): кривые 1 – ФАР без ЧСС; 2 – подстроенная ФАР двухслойной ЧСС; 3 – подстроенная ФАР с двухслойной ЧСС и поглощающим материалом.

ФАР с поглощающим материалом и двухслойной ЧСС для некоторых частот и направлений фазирования луча. Отметим, что в некоторых случаях коэффициента усиления ФАР с ЧСС и поглощающим материалом выше, чем коэффициента усиления исходной ФАР, что вызвано, по-видимому, уменьшением резонансных явлений в П-образном профиле металлического отражателя, а также лучшей подстройкой параметров излучателя.

На рис. 10 приведены результаты расчета методом FDTD ДОР линейных восьмиэлементных

ФАР L-диапазона различных конфигураций: исходной ФАР (кривая 1), ФАР с ЧСС (2) и ФАР с ЧСС и поглощающим материалом (3). Комплексное использование двухслойной ЧСС и поглощающего материала позволило устранить эффект подавления отдельных дифракционных лепестков (например: ($D_{AP}/\lambda = 2.6$, $\theta_0 = 51^\circ$), ($D_{AP}/\lambda = 3.2$, $\theta_0 = 18^\circ$), ($D_{AP}/\lambda = 3.8$, $\theta_0 = 7^\circ$, $\theta_0 = 32^\circ$), ($D_{AP}/\lambda = 5.3$, $\theta_0 = 17^\circ$, $\theta_0 = 22^\circ$)) и существенно уменьшить амплитуду дифракционных лепестков Брэгга в ДОР ФАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследования снижения рассеивающих свойств линейных антенных решеток вне их рабочего диапазона с помощью полосно-заграждающих ЧСС.

На первом этапе разработана двухслойная полосно-заграждающая частотно-селективная структура на основе квадратных петель. Полоса заграждения ЧСС по уровню коэффициента прохождения ≤ -10 дБ – 8...18 ГГц для углов падения $\pm 60^\circ$ для *ТМ*- и *ТЕ*-поляризованной ЭМ-волны. Коэффициент прохождения ЭМ-волны через ЧСС в диапазоне частот 1...1.6 ГГц не менее -1.5 дБ.

На втором этапе проведено электродинамическое моделирование восьмиэлементной ЛПС, экранированной разработанной ЧСС. Показано и экспериментально подтверждено, что использование ЧСС не обеспечивает снижения всех дифракционных лепестков Брэгга из-за возникновения резонатора с полупрозрачной стенкой системой ЧСС-проводящий экран. Предложен способ устранения выявленного резонансного эффекта путем нанесения поглощающего материала на проводящий экран ЛПС. Предложенный способ позволил снизить дифракционные лепестки Брэгга ЛПС на 10...30 дБ в полосе частот 8...18 ГГц в диапазоне углов падения $\pm 60^\circ$ плоской ЭМ-волны.

Полученные результаты были использованы для снижения ДОР линейной ФАР L-диапазона. Приведены результаты электродинамического моделирования антенной системы, состоящей из восьмиэлементной ФАР L-диапазона на основе неоднородных металлодиэлектрических излучателей, размещенной под радиопрозрачным обтекателем, двухслойной ЧСС, расположенной перед ФАР, и поглощающего материала, нанесенного на П-образном профиле металлического основания. Снижение дифракционных лепестков Брэгга составило 3...20 дБ в полосе частот 8...18 ГГц в диапазоне углов падения $\pm 60^\circ$ плоской ЭМ-волны. Снижение коэффициента усиления ФАР с ЧСС и поглощающим материалом в полосе рабочих частот 1...1.6 ГГц и секторе сканирования $\pm 45^\circ$ составило не более 0.6 дБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.А. Каложину, К.М. Баскову и И.И. Краснолобову за обсуждение работы и полезные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knott E.F., Shaeffner J.F., Tuley M.T.* Radar Cross Section. Raleigh, NC: Scitech Publishing, 2004.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. Сколника М.И. М.: Техносфера, 2014.
3. *Kesler O.B., Pasquan D., Pellett L.* // Modern Antenna Handbook / Ed. Balanis C.A. John Wiley & Sons, 2008. P. 1035.
4. *Бененсон Л.С., Фельд Я.Н.* // РЭ. 1988. Т. 33. № 2. С. 225.
5. *Stimson G.W., Griffiths H.D., Baker C.J.* Introduction to Airborne Radar. Raleigh, NC: SciTech Publ., 2014.
6. *Кравченко В.Ф., Лабунько О.С., Лерер А.М., Синявский Г.П.* Вычислительные методы в современной радиофизике. М.: Физматлит, 2009.
7. *Vardaxoglou J.C.* Frequency-Selective Surfaces: Analysis and Design. Taunton.: Res. Studies Press, 1997.
8. *Wu T.K.* Frequency-Selective Surface and Grid Array. N.Y.: John Wiley & Sons, 1995.
9. *Munk B.A.* Frequency-Selective Surfaces: Theory and Design. N.Y.: John Wiley & Sons, 2000.
10. *Пономарев Л.И., Попов В.В.* Рассеивающие свойства антенн и фазированных антенных решеток. М.: РУДН, 2003.
11. *Pelton E.L., Munk B.A.* // IEEE Trans. 1974. V. AP-22. № 6. P. 799.
12. *Hang Z., Qu S., Lin B. et al.* // IEEE Trans. 2012. V. AP-60. № 6. P. 3040.
13. *Chen H., Hou X., Deng L.* // IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2009. V. 8. P. 1231.
14. *Wang W.-T., Gong S.-X., Wang X. et al.* // J. Electromagnetic Waves and Appl. 2009. V. 23. P. 1505.
15. *Genovesi S., Costa F., Monorchio* // IEEE Trans. 2012. V. AP-60. № 5. P. 2327.
16. *Costa F., Monorchio A., Manara G.* // IEEE Trans. 2012. V. AP-60. № 6. P. 2740.
17. *Genovesi S., Costa F., Monorchio A., Manara G.* // IEEE Trans. 2014. V. AP-62. № 1. P. 163.
18. *Pozar D.M.* Microwave Engineering. N.Y.: John Wiley & Sons, 2012.
19. *Tretyakov S.* Analytical Modeling in Applied Electromagnetics. Norwood, MA: Artech House, 2003.
20. *Costa F., Monorchio A., Manara G.* // IEEE Trans. 2012. V. AP-54. № 4. P. 35.
21. *Гринева А.Ю.* Численные методы решения прикладных задач электродинамики. М.: Радиотехника, 2012.
22. *Trentini G.* // IRE Trans. 1956. V. AP-4. № 4. P. 666.
23. *Пономарев Л.И., Степаненко В.И.* Сканирующие многочастотные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2009.
24. *Costa F., Monorchio A., Manara G.* // IEEE Trans. 2010. V. AP-58. № 5. P. 1551.
25. *Гринева А.Ю., Волков А.П., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф.* // Антенны. 2016. № 10. С. 60.