



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ» (АО «ВНИИРТ»)

ул. Б. Почтовая, 22, Москва, 105082

Тел.: (499) 267-66-04; факс: (499) 265-60-38; e-mail: vniirt@vniirt.ru  
ОКПО 07505269, ОГРН 1027701015352, ИНН/КПП 7701315700/770101001

15.05.2017 № 300/14 - 1642

На № 011/11 от 24.04.2017

Московский авиационный институт,  
проректору по научной работе  
Равиковичу Ю. А.

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д. 4,  
тел. (499)158-43-33

Отзыв оппонента

Направляю отзыв официального оппонента М. В. Инденбома на диссертацию Волкова А. П. на тему: "Периодические СВЧ композитные структуры в бортовых антенных системах".

Приложение: 1) Диссертация в 1 экз.

2) Отзыв в 2 экз. на 5 л. каждый.

Заместитель генерального  
директора

В. И. Порсев

Исп. Инденбом  
тел. (499) 261-30-95



## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Волкова Александра Петровича

на тему: Периодические СВЧ композитные структуры в бортовых антенных системах по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа посвящена исследованию характеристик периодических структур на основе различных проводящих элементов (также называемых композитными структурами, метаматериалами, искусственными электромагнитными кристаллами) и возможности создания на этой основе антенн с улучшенными характеристиками применительно к бортовым радиосистемам.

Данная тематика безусловно является актуальной, так как известно, что такие структуры могут быть использованы для уменьшения рассеяния электромагнитных волн (повышение скрытности объектов), уменьшения размеров антенн, устранения условий распространения поверхностных волн, приводящих к уменьшению коэффициента усиления и увеличению уровня боковых лепестков антенны, и других целей. Данной тематике в последние одно-два десятилетия уделяется большое внимание, что находит отражение в большом числе публикаций как за рубежом, так и нашей стране (см., например, монографии F. Yang, Y. Rahmat-Samii "Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering", Cambridge University Press, 2009; С.Е. Банков "Электромагнитные кристаллы", М.: Физматлит, 2010). Однако количество решенных задач в данной области и разработанных на их основе антенн все еще невелико. Поэтому тема диссертации, направленной на расширение круга устройств, использующих композитные периодические структуры, и изучение и преодоление возникающих при этом трудностей, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение как для бортовых антенных систем, также и для других применений.

Диссертационная работа посвящена антеннам с использованием двух типов периодических структур: частотно-селективных структур (ЧСС), рассмотренных в 1 и 2 главе, и поверхностных структур с высоким импедансом (ПВИ), рассмотренных в 3 и 4 главе.

В первой главе выполнен аналитический обзор типов ЧСС, методов их проектирования, математического моделирования, выбору конструктивного решения ЧСС для использования в составе расположенной в крыле самолета антенной системы (АС) ОГП для уменьшения ее эффективной моностатической радиолокационной поверхности рассеяния (ЭПР) в диапазонах частот средств поражения (8-12 ГГц и 16-18 ГГц).

На основе сравни-  
Вх. № \_\_\_\_\_  
" 16 " 05 20 17. 1



тельного анализа описанных в литературе структур предложены две конструкции полосно-запирающих ЧСС для зеркального отражения падающих электромагнитных волн указанных диапазонов. Выполнен расчет и моделирование ЧСС. Выявлен новый эффект резонансного увеличения ЭПР при расположении ЧСС над проводящим экраном конечного размера. Найдено объяснение этого эффекта и предложено соотношение для расчета направлений в пространстве, в которых возникают резонансные лепестки ЭПР.

Во второй главе приведен обзор литературы по применению ЧСС в антенных решетках для уменьшения ЭПР. Рассмотрены варианты построения АС с ЧСС, предложены два варианта, подходящих для уменьшения моностатической ЭПР АС ОГП бортовой ФАР, выполнено их математическое моделирование и выявлен новый эффект не подавления или не полного подавления лепестков Брэгга (дифракционных лепестков диаграммы обратного рассеяния). Достоверность результатов проверена сравнением результатов моделирования различными методами. Найдено теоретическое объяснение эффекта на основе резонанса пространственных гармоник поля в пространстве между ЧСС и экраном ФАР, получены уравнения и графики на их основе, позволяющие предсказать направления неподавленных лепестков Брэгга на основе результатов моделирования только одной ЧСС без ФАР. На основе этих уравнений предложено для уменьшения данного эффекта уменьшать высоту расположения ЧСС над экраном ФАР, либо использовать поглощающий слой на экране. Выполнено моделирование конструкции АС с двухслойной ЧСС и поглощающим слоем на экране ФАР в виде периодической структуры резистивных рамок. Показано подавление всех лепестков Брэгга на 10-30 дБ. Получено среднее снижение моностатической ЭПР АС на 3-10 дБ в широком диапазоне частот 8-18 ГГц и секторе углов 10-60° при потерях в рабочем диапазоне частот ФАР не более 0,3 дБ.

Результаты моделирования подтверждены экспериментально для частного случая. Совокупность теоретических и экспериментальных результатов, приведенных в работе, позволяет рассматривать выводы как достаточно обоснованные и достоверные. Насколько известно оппоненту, подобные конструкции АС в виде ФАР низкочастотного диапазона с полосно-заграждающей ЧСС и поглощающим экраном для высокочастотного диапазона, ранее в технической литературе не описаны.

В главе 3 рассмотрено использование периодических структур с высоким поверхностным импедансом (ПВИ) в самолетных антенных системах диапазона частот 100-150 МГц для уменьшения высоты АС над экраном и создания невыступающих конформных АС, не нарушающих обтекаемость самолета. Показано, что полоса частот АС ограничивается со стороны нижних частот искажениями ДН вибратора, вызванными излучением



штырей периодической структуры типа "грибы". При размерах ПВИ меньших, чем размеры экрана, полоса частот АС ограничивается со стороны верхних частот искажениями ДН вибратора, вызванными краевыми волнами, образующимися при рассеянии поверхностной волны в ПВИ на ее границах. Предложено построение двухполяризационной АС из 4 низко расположенных над ПВИ вибраторов, 2 из которых вертикальны, а 2 – горизонтальны, в которых указанные эффекты устранены за счет применения ПВИ в виде периодической системы квадратных пластин (без штырей) и размещения вибраторов на расстоянии половины длины друг от друга, что позволило исключить возбуждение поверхностной волны. Выполнено математическое моделирование АС с учетом ее размещения на поверхности фюзеляжа, замененной в модели проводящим цилиндром. Подобраны размеры элементов АС, обеспечивающие согласование с  $K_{СВн} \leq 2$  и высокую развязку ортогональных подсистем более 35 дБ, устойчивую форму ДН и низкий уровень задних лепестков в диапазоне частот около 40% (103-153 МГц), а также высоту профиля АС  $0,07\lambda_0$ , что лежит на уровне или превосходит лучшие мировые достижения.

В главе 4 рассмотрено использование периодических (EBG) структур типа "грибы" с запрещенной зоной для создания низкопрофильной вибраторной ФАР X-диапазона с широкоугольным сканированием и невыступающей двухполяризационной АС из двух пар скрещенных вибраторов в Р-диапазоне частот 400-470 МГц с высокой развязкой всех 4 вибраторов между собой.

Использование EBG структуры позволило получить в результате моделирования излучающей системы ФАР X-диапазона согласование в коническом секторе сканирования до  $45^\circ$  от нормали и диапазоне частот около 10% без "ослепления" ФАР при высоте системы над экраном ФАР 3,3 мм ( $0,1\lambda_0$ ).

Для АС Р-диапазона частот на основе EBG структуры типа "грибы" получена высота АС над экраном 30 мм ( $0,055\lambda_0$ ) при полосе рабочих частот 14%,  $K_{СВн} \leq 2$ , развязке около 25 дБ между антеннами одной поляризации и не менее 30 дБ для ортогональных поляризаций. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.

Основным методом исследования в работе является 1) математическое моделирование с помощью пакета компьютерных программ для электродинамического моделирования устройств СВЧ и антенн методами КВРО, ММ, МКЭ; 2) известные аналитические соотношения теории фильтров, периодических однослойных и многослойных структур, теории резонаторов Фабри-Перро. Новым является использование соотношения из теории резонаторов Фабри-Перро (1.23) для приближенной оценки направления резонансных лепе-

стков диаграммы обратного рассеяния и в (2.11) для расчета направления неподавленных лепестков Брэгга.

Практическая значимость полученных автором результатов следует из того, что в результате работы создано определенное число практических конструкций бортовых антенн с улучшенными характеристиками, частично подтвержденными экспериментально.

Достоинством работы является большое число публикаций по теме диссертации (всего 24, из них 10 статей, 5 – в журналах рекомендуемых ВАК).

В целом диссертация является завершенной научно-исследовательской работой. Ее автор, несомненно, проявил себя научным работником, способным самостоятельно решать теоретические и практические задачи в области теории и техники антенн.

В то же время в работе могут быть отмечены и недостатки:

- из представленных в работе материалов не видно, чтобы эквивалентные параметры фильтра-прототипа (значения индуктивностей и емкостей) были использованы при переходе от фильтра-прототипа к ЧСС для расчета ее параметров;

- приведенные в главе 1 результаты эксперимента, относятся ЧСС без экрана, так что не подтверждают новый эффект, обнаруженный при моделировании конечной ЧСС с экраном;

- число угловых точек расчета действующего коэффициента отражения (рис. 4.8) не достаточно для того, чтобы судить об отсутствии "ослепления" ФАР при всех углах сканирования в заданном секторе до  $45^\circ$ ;

- изложение содержит ряд повторов одного и того же материала в разных разделах (см. например, формулы (1.13), (3.1), (3.3), (3.5), (3.6) и (4.11));

- некоторые из формул, приведенных из литературы, фактически не используются (формулы (1.7) - (1.12), приложение А);

- много описок и технических неточностей (ошибочные литературные ссылки; пропущены формулы (2.5) - (2.8), на одну из которых имеется две ссылки в тексте; ошибочная нумерация кривых на рис. 2.4, 2.6 и т.д.).

Отмеченные недостатки, хотя и снижают качество работы, тем не менее, не велики по сравнению с положительным содержанием работы.

Автореферат соответствует основным тезисам и выводам диссертации.

Таким образом, диссертация Волкова Александра Петровича на соискание ученой степени кандидата наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научно обоснованные технические решения задач снижения моно-статической ЭПР ФАР запросчика системы ОГП, создания низкопрофильных излучателей



ФАР X-диапазона частот и двухполяризационных антенных систем ОВЧ и Р-диапазона частот, имеющие существенное значение для бортовых радиолокационных систем, что соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент,  
начальник сектора, к.т.н., с.н.с.

тел. 916-188-22-31, E-mail mindenbom@mail.ru

  
Инденбом М.В.  
12.05.17

Подпись Инденбома М.В. заверяю

Заместитель генерального директора  
АО "Всероссийский НИИ радиотехники",  
д.т.н. Порсев В.И.

