

## ОТЗЫВ

официального оппонента заведующего кафедрой прикладной электродинамики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, доктора физико-математических наук, профессора Горобца Николая Николаевича на диссертацию МАРЧЕНКО СЕРГЕЯ ВИКТОРОВИЧА «Применение метода интегрального уравнения пронизывающей области для расчета волноводных ФАР», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика

### Актуальность темы диссертации и её связь с государственными научными программами.

На современном этапе развития науки задачи дифракции электромагнитных волн на периодических СВЧ-структурах являются классическими задачами электродинамики СВЧ. Одними из таких задач являются задачи расчета бесконечных фазированных антенных решеток (ФАР) из прямоугольных волноводов с согласующей периодической структурой (СПС). Процесс проектирования волноводных ФАР громоздкий и затратный, что вынуждает прибегать к теоретическому исследованию таких устройств. Важный вопрос при проектировании ФАР — это согласование ФАР с внешним пространством. В диссертационной работе С. В. Марченко рассматривается согласующее устройство в виде периодической структуры, которое на данный момент является неизученным, и его анализ в полной мере не рассматривался.

Создание математических методов, адекватных широким классам реальных радиотехнических устройств, необходимо при проектировании САПР СВЧ. В диссертационной работе используется метод пронизывающей области, который показал свою эффективность как электродинамический метод расчета скалярных задач на примере численного анализа ФАР из плоскопараллельных волноводов.

В методе пронизывающей области (МПО), в котором выделяются пронизывающая область, связанная с источником возникновения волны, и частичные области, строят функцию Грина только одной пронизывающей области. В отличие от метода частичных соприкасающихся областей (МЧСО) и метода частичных пересекающихся областей (МЧПО) в МПО интегральное представление записывается относительно одной области, что позволяет упростить процедуру составления итогового интегрального уравнения. Этим методом (МПО) можно исследовать СВЧ структуры, в которых возможно выделение такой области определения электромагнитного поля, которая пронизывает остальные частичные области, что приводит к интегральному уравнению относительно пронизывающей области.

Применение МПО для электродинамического расчета на примере теоретического исследования плоских ФАР из прямоугольных волноводов с согласующими устройствами является **актуальным**, что обосновывает актуальность данной диссертационной работы.

Исследование и разработка материалов диссертационной работы связаны с основными положениями «Радіофізичні явища в структурах з імпедансними, нелінійними та фрактальними неоднорідними елементами», «Аналіз радіофізичних явищ в структурах з неоднорідними елементами частотно-

Харьков  
Вхідний № 01/24-991  
"15" 06 2016 р.

часовими методами», «Аналіз радіофізичних явищ в структурах з неоднорідними елементами на основі концепції узагальнених резонансів».

**В первом разделе** диссертационной работы проанализированы современные электродинамические методы расчета бесконечных волноводных ФАР на основе построения интегрального уравнения при использовании аппарата функции Грина. Рассмотрены способы согласования антенной решетки со свободным пространством и определены перспективные виды согласующих устройств. Обоснована корректность и эффективность использования МПО для исследования магнитоэлектрического заполнения в волноводно-резонаторных структурах и исследования ФАР из прямоугольных волноводов.

**Во втором разделе** диссертационной работы выполнен расчет бесконечной линейной ФАР из плоскопараллельных волноводов с согласующими элементами. Автором представлена методика построения функции Грина и функции стороннего источника с учетом плоскостойкого диэлектрического заполнения для получения корректного итогового интегрального уравнения. Численное исследование ФАР с согласующей периодической структурой показало эффективность предложенного согласующего устройства: модуль коэффициента отражения уменьшается в 3-4 раза в диапазоне углов сканирования от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . Диэлектрические включения в СПС целесообразно применять внутри структуры. Уменьшение модуля коэффициента отражения при использовании СПС и диэлектрического заполнения по сравнению с СПС без заполнения для некоторых размеров волноводов составляет 25-35%.

**В третьем разделе** диссертационной работы рассмотрено развитие метода пронизывающей области для численного решения трехмерных задач. Для тестирования данного метода выбрана задача электродинамического расчета плоской бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов с треугольной сеткой их расположения. Автором проведено исследование численной сходимости решения и оптимизация численного алгоритма. Сравнение численных результатов, полученных автором, с данными известных работ показало их удовлетворительное совпадение, что подтверждает корректность разработанного алгоритма на основе МПО и целесообразность использования предложенного метода для анализа плоской волноводной ФАР с плоскостойким диэлектрическим заполнением.

**В четвертом разделе** диссертационной работы выполнен расчет плоской ФАР из прямоугольных волноводов с диэлектрическими слоями покрытия, сканирующей в  $H$ -плоскости. Полученные численные результаты совпадают с известными результатами и с экспериментальными данными, что подтверждает корректность предложенного алгоритма расчета. При составлении алгоритма расчета представлены особенности построения тензорной функции Грина для трехмерной задачи и получения интегрального уравнения. При составлении алгоритма на основе МПО достаточно было построить аффинорную функцию Грина для одной области (волноводного канала), в отличие от МЧСО и МЧПО, где необходимо строить аффинорную функцию Грина для каждой частичной области. Эта особенность МПО при моделировании СВЧ устройств позволяет проще решать трехмерные задачи с учетом магнитоэлектрического заполнения

**Пятый раздел** диссертационной работы посвящен теоретическому исследованию плоской бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов с

согласующей периодической структурой для случая сканирования в  $H$ -плоскости. Для треугольной сетки расположения волноводов при малом расстоянии ( $z_1 \leq 0,1\lambda$ ) от апертурной плоскости до второй частичной области можно получить согласование ФАР с пространством излучения. Были определены размеры согласующей структуры: для треугольной сетки расположения волноводов, которая обеспечивала согласование в диапазоне частот от 5.45 до 5.9 ГГц и в секторе углов сканирования от  $0^\circ$  до  $40^\circ$ . При этом модуль коэффициента отражения уменьшается в два раза. Для прямоугольной сетки — определено несколько значений  $z_1$  ( $0,1\lambda, 0,6\lambda, 0,75\lambda, 0,85\lambda$ ), при которых происходит согласование в диапазоне частот от 5.45 до 5.85 ГГц и в секторе углов сканирования, ограниченном верхним значением  $80^\circ$ . При этом модуль коэффициента отражения уменьшается в 2,5 раза.

### **Научная новизна.**

При проведении исследований автором решен комплекс связанных между собой задач и получен ряд новых научных положений и результатов:

– Разработана методика построения функции Грина с учетом плоскостойкого диэлектрического заполнения волновода для метода пронизывающей области, а также предложен подход для получения корректного итогового интегрального уравнения при наличии диэлектрического заполнения. Это позволило развить метод пронизывающей области для решения электродинамических задач с магнитодиэлектрическим заполнением.

– Решена задача дифракции электромагнитной волны на бесконечной линейной ФАР из плоскопараллельных волноводов с согласующей периодической структурой и диэлектрическим заполнением. Это подтверждает целесообразность исследования плоской бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов с согласующей периодической структурой.

– Методом пронизывающей области решены трехмерные задачи дифракции электромагнитной волны на плоской бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов и бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов с диэлектрическими слоями, что подтверждает возможность использования метода пронизывающей области для решения трехмерных задач дифракции

– Теоретически исследована бесконечная плоская ФАР из прямоугольных волноводов с СПС. Определены размеры СПС для треугольной и прямоугольной сеток расположения волноводов, которые обеспечивают согласование ФАР (модуль коэффициента отражения уменьшается в два раза), что иллюстрирует эффективность предложенной согласующей структуры.

### **Практическая значимость полученных результатов:**

В работе представлено развитие метода пронизывающей области для решения задач дифракции электромагнитных волн на бесконечных ФАР из прямоугольных волноводов с согласующими устройствами. Разработана методика решения электродинамических задач и создан пакет прикладных программ, позволяющие анализировать бесконечные волноводные ФАР с плоскостойким диэлектрическим заполнением и согласующей периодической структурой.

Полученные результаты анализа подтвердили целесообразность использования ФАР из плоскопараллельных волноводов с СПС как с



диэлектрическими заполнениями, так и без них как эффективную согласующую структуру.

Использование согласующей периодической структуры для ФАР из прямоугольных волноводов позволяет получить согласование в широком секторе углов сканирования. Предложенная согласующая структура обладает простым конструктивным исполнением, поскольку не требует применения диэлектрических слоев и вставок, что уменьшает стоимость согласующей структуры.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

За счет корректного использования математических методов полученные результаты, научные положения, выводы и рекомендации, представленные автором диссертационной работы, являются достаточно обоснованными. Постановка задач исследования выполнена аргументировано и убедительно.

Автор использует известные и проверенные математические теории, модели и методы.

При решении поставленных задач использован метод интегрального уравнения, аппарат аффинорных функций Грина и методы численного анализа. Проведенное в диссертации сравнение результатов численного расчета для конкретных случаев с известными результатами подтверждают достоверность представленных в работе результатов и их непротиворечивость.

Все изложенные выше позволяет считать научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы достаточно обоснованными и достоверными.

### **Апробация и оформление работы.**

Проведенный анализ научных работ диссертанта показал, что основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, в том числе в 6-и статьях в журналах, которые входят в перечень ВАК Украины. Также две работы автора представлены в научной базе Scopus.

Анализ содержания статей и тезисов докладов позволяет сделать вывод о том, что все публикации имеют непосредственное отношение к теме и содержанию диссертационной работы, что они в совокупности раскрывают основные научные результаты, которые защищаются автором. Апробация теоретических результатов достаточная и представлена выступлениями на 4-х международных научно-технических конференциях высокого профессионального уровня.

Диссертация оформлена согласно требованиям, которые предъявляются к кандидатским диссертациям согласно «Порядку присуждения наукових ступенів та присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». Название диссертации соответствует её содержанию и отображает суть рассмотренных и решенных научных задач. Диссертант логично и аргументировано излагает содержание работы, что позволяет составить однозначное впечатление про основные результаты исследования. Автореферат в полной мере и правильно раскрывает содержание и результаты диссертации.

### **Недостатки работы.**

К недостаткам работы следует отнести:

- в разделе 2.3 не представлена физическая интерпретация влияния диэлектрического заполнения на согласование ФАР из плоскопараллельных волноводов с СПС;
- в 3 разделе при проведении оценки сходимости решения не представлена качественная оценка сходимости;
- в 3 и 4 разделах отсутствуют результаты сравнения предложенного метода с другими методами расчета на примере решения тестовых задач. Наглядным, например, было бы сравнение времени расчета методом пронизывающей области и известных САПР (HFSS, FEKO);
- в разделе 5 можно было бы привести результаты проверки закона сохранения энергии как подтверждение корректности разработанного алгоритма;

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки теоретического уровня диссертационной работы.

### **Выводы и общая оценка работы.**

В целом диссертационная работа Марченко Сергея Викторовича «Применение метода интегрального уравнения пронизывающей области для расчета волноводных ФАР» является законченной научно-исследовательской работой, в которой получены новые теоретические результаты, и соответствует специальности 01.04.03 - радиофизика.

- По содержанию, объему, апробациям, публикациям актуальности, новизне, теоретической и практической значимости диссертация соответствует требованиям п. 9, 11 «Порядку присуждения наукових ступенів» утвержденного постановлением Кабинета Министров Украины от 24 июля 2013 г. № 567 к кандидатским диссертациям.

Автор работы Марченко Сергей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

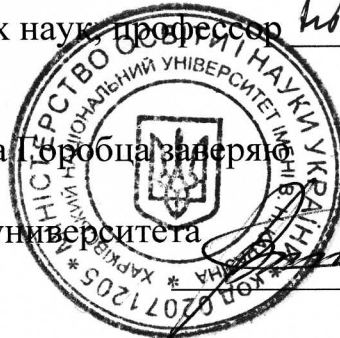
### **Официальный оппонент:**

Заведующий кафедрой прикладной электродинамики  
Харьковского национального университета  
имени В. Н. Каразина,

доктор физико-математических наук, профессор Н. Н. Горобец  
«14» 06 2016 г.

Подпись Николая Николаевича Горобца заверяю  
ученый секретарь  
Харьковского национального университета  
имени В.Н. Каразина

«14» 06 2016 г.



Н. А. Винникова