

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА**

на диссертационную работу

Слободяненко Александра Александровича

«Реконструкция электромагнитного поля антенн на основе измерений в ближней зоне»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

### **Актуальность темы**

Создание антенн для современных радиолокационных и телекоммуникационных систем, обладающих предельными радиотехническими и уникальными функциональными возможностями, представляется едва ли возможным без использования измерительно-вычислительных комплексов ближнего поля, в которых посредством математических методов и алгоритмов измеренное ближнее поле антенны преобразуется в радиотехнические характеристики, требующие контроля. Применяемые на сегодняшний день методы и алгоритмы, основанные на разложении измеренного поля по собственным решениям волнового уравнения, имеют ряд существенных недостатков: необходимость канонических поверхностей измерения ближнего поля, ограничение на сектор достоверного определения диаграммы направленности и невозможность точного определения электромагнитного поля антенны в промежуточной и ближней зонах излучения. Поэтому важным является разработка реконструктивных методов, которые являются более сложными в математическом плане, однако лишены указанных недостатков, ограничивающих функциональные возможности измерительно-вычислительных комплексов ближнего поля.

### **Достоверность**

Достоверность исследования подтверждается согласованием численных и экспериментальных результатов, полученных автором.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы Слободяненко А.А. состоит в следующем.

В работе решена задача реконструкции электромагнитного поля антенны по результатам измерения ближнего поля, в рамках которой:

1. Разработан численный метод решения обратной задачи излучения (интегрального уравнения первого рода), корректное решение которой достигается введением априорной информации о гладкости решения, а также использованием проекционных алгоритмов.
2. Представлена методика коррекции измеренного распределения электромагнитного поля антенны в ближней зоне, которая позволяет устранить влияние

систематической составляющей ошибки измерения ближнего поля, обусловленной влиянием зондовой антенны.

3. Разработаны эффективные алгоритмы решения системы линейных алгебраических уравнений, обеспечивающие численное представление решения обратной задачи излучения, с пониженной вычислительной сложностью и затратами вычислительного времени.

### **Практическая значимость**

Предложенные автором методы могут применяться для полной реконструкции излученного электромагнитного поля антенн в существующих и новых измерительно-вычислительных комплексах ближнего поля, что подтверждается проведёнными Слободяненко А.А. экспериментами.

### **Обзор диссертационной работы**

Диссертация Слободяненко А.А. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения.

**Введение** диссертации содержит обоснование актуальности темы исследований, научной новизны, практической значимости результатов и их достоверности. Сформулированы цель и задачи работы. Приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации представлен обзор литературы по методам измерения характеристик антенн в ближней зоне. Кроме того, рассмотрены существующие методы и подходы, используемые для коррекции влияния зондовой антенны. Сформулирована общая постановка обратной задачи излучения.

**Во второй главе** формулировка обратной задачи излучения уточняется для случая измерения ближнего поля антенны в автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе. Изложены ключевые аспекты численного метода решения обратной задачи, разработанного автором, а также алгоритмы, обеспечивающие вычислительную сложность по памяти  $O(N)$ , некоторые из которых позволяют значительно сократить вычислительное время.

**В третьей главе** приводятся результаты численных исследований метода, подтверждающие его вычислительную эффективность, а также устойчивость решения при наличии случайной составляющей ошибки в данных ближнего поля антенн различного типа. Большое внимание уделено верификации метода, которая проводится путем подтверждения на численном эксперименте теоретической сходимости метода, а также путем сопоставления результатов восстановления электромагнитного поля антенн разработанным методом и широко используемым на сегодняшний день методом модального разложения.

**В четвертой главе** диссертации рассмотрен вопрос коррекции измерений, связанных с влиянием зонда. Предложена методика коррекции, заключающаяся в делении измеренного поля, представленного в спектральной области, на спектральный отклик зонда, полученный по результатам электродинамического моделирования калибровочной антенны и зонда. Представлены результаты численного исследования методики на предмет вносимых ошибок. Приведено сравнение результатов коррекции ближнего поля антенн различной геометрии с использованием аналитических формул, экспериментальных данных и предложенной методики.

**В пятой главе** представлены результаты реконструкции электромагнитного поля различных типов антенн на основе измерений ближнего поля, выполненных по планарной схеме сканирования, подтверждающие возможность определения электромагнитного поля антенны как в ближней, так и промежуточной зонах излучения. Представлены результаты, демонстрирующие возможность использования разработанного метода для определения диаграммы направленности крупноапертурных антенных решеток в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, сокращения и контроля числа выборок ближнего поля.

**В заключении** подведены итоги работы и предложены направления дальнейшего развития проведенных исследований.

**Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**  
Автореферат отражает основное содержание диссертации.

#### **Апробация результатов работы и публикаций по диссертации**

Основные результаты исследований автора опубликованы в двух статьях в рекомендованных ВАК РФ журналах и семи работах в сборниках конференций различных уровней.

#### **Общая оценка работы**

Диссертационная работа А.А. Слободяненко достаточно хорошо апробирована, структурирована, грамотно написана, представляет собой завершенное исследование, и в целом заслуживает положительной оценки. Особенно необходимо отметить, что в представленной работе сочетаются как серьезные теоретические изыскания, так и большой объем подтверждающих теорию практически значимых экспериментальных исследований. Тем не менее, по работе возникли следующие замечания.

1. С точки зрения практического применения метода представляет интерес его апробация не только на антеннах, у которых первичные источники поля расположены на плоской поверхности, но также, например, на зеркальных антеннах, у которых часть апертуры затенена облучающей системой, или на конформных

антеннах, у которых первичные источники расположены на поверхности сложной формы. Однако, эти случаи никак не упомянуты в работе.

2. Для наглядной верификации точности восстановления источников поля, представляет интерес их визуализация по данным экспериментальных измерений. Однако, в работе не приводится ни одной визуализации источников.
3. Из текста не вполне ясно, как получены эквивалентные уровни помех для рассчитанных диаграмм направленности, а также доверительные интервалы для измеренных диаграмм направленности.

Перечисленные замечания не снижают научную и практическую значимость работы и не умаляют ее общую положительную оценку.

### Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа А.А. Слободяненко «Реконструкция электромагнитного поля антенн на основе измерений в ближней зоне» соответствует пунктам 9-14 «Положения» о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 28.08.2017 №1024). Работа является завершенным самостоятельным научным исследованием, а её автор А.А. Слободяненко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации.

Официальный оппонент

Лемберг К.В.

### Сведения

Лемберг Константин Вячеславович, Кандидат физико-математических наук, 01.04.03 - «Радиофизика», лаборатория научного приборостроения, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. 660036 г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38. Телефон: +7(391) 243-26-35. E-mail: dir@iph.krasn.ru

Подпись	<u>Лемберг К.В.</u>	заверяю
Ученый секретарь	<u>К.Ф.И.И.</u>	
Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)		
« _____ »	20 _____	г.

