

( $L_1 = L_2$ ) и поперечное расстояние ( $\Delta Z$ ) между ними 15 мм.

Один из реализованных расчетных вариантов меры приведен на рис. 5 и имеет рабочий объем в форме куба с размерами сторон 40 мм при уровне погрешности от смещения преобразователя на расстояние  $\Delta$  менее 0,5 %. Из рис. 5 также видно, что в ряде случаев погрешность может не превышать 0,1 % при смещениях преобразователя относительно центра рабочего объема меры вплоть до 15 мм и более.

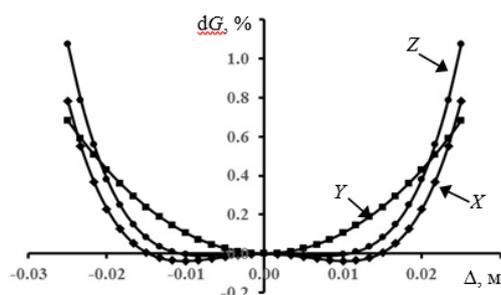


Рисунок 5

Таким образом, показана и реализована возможность создания меры для габаритных преобразователей приборов импульсно-локального типа, в которых используются градиентометры с несоосным расположением полупроводников. При сопоставимых размерах рассмотренных выше градиентометрических катушек и катушек меры М-101 в новой мере создаётся приемлемый объём для размещения преобразователей гораздо большего размера.

УДК 621.396.67

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА СИСТЕМЫ АНТЕННА-ОБТЕКАТЕЛЬ

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь.

Современные антенны для радиолокационных систем представляют собой весьма сложные и дорогостоящие изделия. Для защиты их от внешних воздействий, в первую очередь метеофакторов, используют различного рода радиопрозрачные укрытия. Особый класс таких укрытий представляют носовые обтекатели летательных аппаратов. Обтекатели выполняют двойную функцию – обеспечивают необходимую аэродинамику летательного аппарата (самолета, ракеты) и защищают антенну от внешних воздействий. Следует отметить, что, как правило, обтекатель не делается сам по себе, а в комплексе с антенной, устанавливаемой под обтекатель. В этой связи целесообразно рассматривать систему антенна-обтекатель. Поскольку внешние обводы обкателя и выбор материала его стенок определяется

Подобные расчеты и осуществленное моделирование при разумном сочетании конфигурации меры и обоснованном выборе размеров ее элементов позволяет осуществить и другие оптимальные варианты градиентометрических мер для вновь разрабатываемых габаритных преобразователей в магнитной структурографии.

### Литература

- 1 Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля. / Ю.В Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
- 2 Мельгуй, М.А. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля / М.А. Мельгуй, В.Д. Пиунов // В кн.: Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции – М.: МДНТП. – 1977. – С. 130–135.
- 3 Счастный, А.С. Механическая анизотропия и параметры петли магнитного гистерезиса листового проката низкоуглеродистых сталей / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 15–27.
- 4 Хорев, В.Н. Исходный рабочий эталон единицы градиента магнитной индукции / В.Н. Хорев, В.Я. Шифрин, С.А. Шубин // Измерительная техника. – 2012. – № 2. – С. 45–49.
- 5 Шифрин, В. Я. Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции / В. Я. Шифрин, С.Л. Воронов, В.Н. Калабин // Измерительная техника. – 2012. – № 7. – С. 3–7.
- 6 ГСИ ГОСТ 8.030-2013 Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции. – М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.

аэродинамикой, обеспечение высоких электродинамических характеристик обкателя является довольно сложной задачей. Кроме этапа математического моделирования с использованием стандартных пакетов программ, процесс оптимизации электродинамических параметров обкателей обязательно включает этап физического моделирования, неотъемлемой частью которого является измерение характеристик системы антенна-обтекатель и анализ результатов измерения.

Целью данной работы явилась разработка специальных методов обработки результатов измерения характеристик системы антенна – обтекатель для определения характера влияния параметров обкателя на характеристики антенны и определения механизмов минимизации этого влияния. В основу этих методов положена процедура срав-

нения характеристик свободной антенны и антенны под обтекателем. В качестве метрологической базы используется компактный полигон, изготовленный в лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП БГУ, включающий экспериментальные образцы радиолокационных измерительных комплексов с планарным и сферическим сканированием.

Очевидно, что характеристики системы антенна – обтекатель отличаются от характеристик свободной антенны. Влияние обтекателя проявляется следующим образом:

– уменьшение уровня излучения антенны в области прожекторного луча;

– появление у прошедшего поля дополнительного фазового сдвига за счет прохождения через стенки обтекателя;

– появлением отраженного поля за счет прямых и многократных отражений от стенок обтекателя.

Указанные механизмы приводят к изменениям диаграммы направленности в виде искажения формы главного лепестка (или равносигнальной зоны для моноимпульсного режима), его положения в пространстве, росту уровня боковых лепестков и т. д. Анализ показывает, что уменьшение излучаемой мощности в области главного лепестка ДН вызван главным образом не потерями в стенках обтекателя, а перераспределением излучаемой мощности между пространственными гармониками в спектре излучения. То есть, наличие отраженного поля в полости обтекателя приводит к появлению в спектре гармоник более высокого порядка, которых не было в спектре свободной антенны. Именно они уменьшают уровень излучения спектральных компонент системы антенна – обтекатель по сравнению с аналогичными для свободной антенны. В таком случае, поле излучения системы антенна – обтекатель на некоторой поверхности вне обтекателя можно представить следующим образом:

$$E_{\text{обт.}} = E_{\text{св.ант.}} + E_{\text{рас.}},$$

где  $E_{\text{обт.}}$  – поле излучения системы антенна – обтекатель,  $E_{\text{св.ант.}}$  – поле излучения свободной антенны. Назовем  $E_{\text{рас.}}$  полем рассеяния обтекателя. Задачей разрабатываемых методов является выявление этого поля и его анализ по результатам измерения. Поскольку структуры измеренного АФР полей на плоской и сферической поверхности различны, то и методы анализа будут отличаться.

В качестве объекта исследования взята система антенна и обтекатель, имеющие рабочие частоты в X диапазоне волн. Обтекатель имеет диаметр основания около 22 см и высоту около 50 см. Антенна располагается под обтекателем на расстоянии около 15 см от основания.

– измерения на стенде с планарным сканированием.

Были проведены измерения АФР на плоскости свободной антенны и системы антенна-обтекатель. Результаты показали что обтекатель имеет хорошие электродинамические параметры, поэтому амплитудное распределение поля свободной антенны и системы антенна – обтекатель отличаются незначительно, стенки обтекателя вносят существенный фазовый сдвиг, который практически постоянен по всему распределению и изменяется только на краях поля измерения, что позволяет скомпенсировать этот сдвиг путем добавления постоянной величины фазового сдвига к фазовому распределению системы антенна – обтекатель. После компенсации фазового сдвига путем вычитания комплексных значений полей возможно выделить поле рассеяния обтекателя, анализ которого позволяет более детально разобраться с механизмом и степенью влияния обтекателя. Более детальное рассмотрение возможно при анализе структуры поля, полученного при пересчете измеренных АФР полей из вынесенного раскрыва в область носика.

**Вывод:** Методика расчета поля рассеяния обтекателя (разностного поля) совместно с процедурой пересчета структуры поля на необходимое расстояние позволяет детально проанализировать характер влияния обтекателя на характеристики укрываемой антенны.

Основным недостатком использования стенда с планарным сканированием является значительное увеличение площади сканирования при измерениях АФР таких систем, поскольку расстояние от плоскости измерения до апертуры антенны определяется размерами обтекателя. Увеличения размеров площади сканирования ведет к существенному увеличению времени измерения, объемов обрабатываемой информации, увеличению влияния погрешностей и мешающих отражений.

– измерения на стенде со сферическим сканированием.

Измерения и алгоритмы расчета структуры полей с использованием сферического сканирования обладают существенным преимуществом, заключающимся в том, что при расчетах структуры полей можно использовать ограниченное число сферических гармоник. Анализ структуры поля свободной антенны показывает, что в его формировании участвуют 30 сферических гармоник, а в формировании поля системы антенна-обтекатель – 45. Появление в структуре поля системы антенна-обтекатель гармоник более высокого порядка объясняется его более неоднородной структурой, вызванной интерференцией поля антенны и полей рассеяния обтекателя. Таким образом, алгоритм обработки содержит возможность анализа влияния поля рассеяния при использовании в

расчетах различного количества сферических гармоник.

Последовательно решая задачу обратной дифракции путем пересчета структуры поля свободной антенны и системы антенна – обтекатель на сферы меньшего диаметра получаем, что основное рассеянное поле формируется в области носика обтекателя.

Как и ранее, на сферической поверхности радиусом 50 см были выполнены измерения АФР полей свободной антенны и системы антенна-обтекатель. Сравнение показало, что амплитудные распределения полей свободной антенны и системы антенна – обтекатель отличаются незначительно, стенки обтекателя вносят фазовый сдвиг. Далее была выполнена процедура пересчета полей с поверхности измерения на сферическую поверхность радиуса 30 см (в область носика обтекателя). При пересчете поля свободной антенны использовались 30 сферических гармоник, системы антенна – обтекатель – 45. Также была рассчитана структура поля, формируемого гармониками 31–45. Последняя представляет собой четкую интерференционную картину, в то время

как все остальные показывают плавную эволюцию структуры полей при изменении расстояния от поверхности измерения. Подобным образом ведет себя и структура поля на значительном удалении от антенной системы в дальней зоне.

#### **Выводы:**

– предложена методика вычисления разностного поля для анализа системы антенна - обтекатель, которая практически может быть использована для анализа влияния обтекателя на характеристики антенны;

– наиболее перспективной с точки зрения практического применения являются метод радиологических измерений на сферической поверхности и обработка результатов с использованием анализа по сферическим гармоникам.

*Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Электроника и фотоника 2.2.02» «Разработка и создание компактного полигона для измерения амплитудно – фазовых распределений и анализа характеристик излучения приема – передающих модулей в сантиметровом диапазоне волн».*

УДК 621.396.67

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

**Гринчук А.П., Громыко А.В., Кучинский П.В.**

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

В отличие от обычных антенных полигонов, где измерения диаграмм направленности (ДН) антенн проводятся в дальней зоне (на значительных расстояниях, связанных с электрическими размерами антенны следующим соотношением:

$$L_{дз} \geq 2(D/\lambda)D,$$

где  $L_{дз}$  – расстояние между зондовой и измеряемой антенной,  $D$  – максимальный линейный размер апертуры измеряемой антенны,  $\lambda$  – длина волны, на которой проводится измерение,  $D/\lambda$  – электрический размер антенны), компактный антенный полигон предназначен для измерения характеристик антенных систем на малых расстояниях. В этом случае используются специальные методы измерений, основанные на том, что интенсивность поля излучения антенной системы и его структура на различных расстояниях от излучающей апертуры однозначно математически связаны, то есть по измеренному полю на некотором расстоянии возможно расчетным путем восстановить структуру поля на любом расстоянии от антенны. При этом структура поля на значитель-

ном расстоянии от антенны (в дальней зоне) определяет ДН. Эти методы измерений называются ближнезонными или радиологическими.

Теоретически было показано, что измерения поля излучения антенн в ближней зоне возможно на нескольких типах поверхностей: плоской, цилиндрической и сферической. Для каждого типа поверхности были предложены уравнения, связывающие структуру полей в ближней и дальней зонах. При этом выбор той или иной поверхности определялся конструкцией антенны и структурой поля излучения.

Для выполнения измерений в ближней зоне необходимы механические сканирующие устройства, обеспечивающие перемещение зондовой антенны по выбранной поверхности, измерительный приемник для измерения амплитуды и фазы СВЧ поля в заданных точках указанной поверхности, обеспечивающий необходимый динамический диапазон и требуемые точности измерений в заданном частотном диапазоне, контроллер ввода цифровых данных в компьютер и программное обеспечение для проведения математических рас-