

возбуждения и распространения волн Лэмба при изменении геометрии пятна лазерного луча, угла приема волн  $\beta$  и высоты дефекта.

#### Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т.: под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение. – Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов [и др.] – 2003. – 864 с.

2. Мужикский В.Ф., Комаров В.А. Особенности электромагнито-акустического преобразования при наличии механических напряжений. I. Приложенные напряжения: экспериментальные данные. Дефектоскопия, №5, 2005. – С. 81–92.

3. Петров Ю.В., Гуревич С.Ю., Голубев Е.В. Экспериментальное определение параметров волн Лэмба при их лазерной генерации. Дефектоскопия, №3, 2010 – С. 45–49.

УДК 621.396.67

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

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

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

В лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП БГУ в рамках выполнения НИР разработан и реализован на практике универсальный компактный антенный полигон для измерения характеристик различных типов антенных систем.

При выполнении проекта впервые в республике Беларусь:

- поставлена задача, проведена разработка и создан реально действующий экспериментальный образец компактного антенного полигона, – универсальный инструмент для комплексного анализа полей излучения максимального количества типов антенных систем [1];

- образец компактного полигона включает в себя взаимно увязанные экспериментальные образцы радиоголографических измерительных комплексов с планарным и сферическим сканированием [2, 3];

- разработан алгоритм и создано специальное ПО для расчета структуры поля излучения антенной системы на сферической поверхности любого физически реализуемого радиуса (в том числе и в дальней зоне), по результатам измерения амплитудно – фазового распределения поля излучения на поверхности измерения с использованием процедуры БПФ.

Существенным преимуществом разработанного компактного полигона является его универсальность, поскольку в отличие от отдельных стендов, с его помощью могут измеряться характеристики любых типов антенн – слабонаправленных и апертурных антенн, формирующие узкие лепестки диаграмм направленности.

Кроме того в процессе выполнения проекта разработано универсальное программное обеспечение, позволяющее решать следующие задачи анализа структуры полей излучения:

- обрабатывать (вводить в компьютер и преобразовывать результаты измерения (ампли-

туда – фаза или квадратуры), визуализировать их как в одномерном (графики), так и двумерном формате (аксонометрия, картография);

- рассчитывать структуру поля излучения антенных систем на соответствующих поверхностях (плоскость – плоскость, сфера – сфера), расположенных на любом расстоянии от поверхности измерения, в том числе в промежуточной и дальней зонах (диаграмма направленности), а также решать задачу обратной дифракции, т.е. рассчитывать структуру поля в непосредственной близости от излучающего раскрытия, в том числе и в апертуре антенны;

- анализировать структуру полей сложных излучающих систем типа антенна – рассеиватель, антенна – обтекатель, антенна – укрытие (антенна – экран), локализовывать место расположения рассеивателей и определять степень влияния укрывающих конструкций на характеристики антенной системы по сравнению с характеристиками свободной антенны.

Также разработаны комплексные методики оценки погрешностей восстановления дальнезонных характеристик антенн по результатам измерения на изготовленных экспериментальных образцах радиоголографических измерительных комплексов, отличительной особенностью которой является использование только экспериментальных результатов, полученных на данном стенде, что не накладывает никаких предварительных ограничений на величины и законы распределения погрешностей. В предложенной оценке максимально учтены все механизмы формирования погрешностей, причем оценка дается в комплексе, а не по отдельным параметрам (например, погрешность позиционирования или отклонения от поверхности измерения). Предложенная оценка позволяет реально оценить динамический диапазон восстанавливаемых дальнезонных характеристик при заданной вели-

чине погрешностей измерения. Анализ большого количества экспериментальных результатов измерения и расчета характеристик различных типов антенн позволил объективно утверждать, что созданные экспериментальные образцы измерительных комплексов позволяют с приемлемой точностью восстанавливать характеристики антенн в динамическом диапазоне до  $-40$  дБ [4].

Поскольку компактный полигон включает два типа измерительных стендов, разработана методика комплексного тестирования такого полигона, позволяющая оценить его погрешности, как



Рисунок 1

Для практической реализации указанной методики в качестве испытательных антенн взяты классический рупор, имеющий размеры излучающей апертуры  $195 \times 145$  мм и фрагмент синфазной антенной решетки размером  $8 \times 8$  излучателей. В докладе последовательно представлены результаты измерений и расчетов в соответствии с приведенной методикой для каждой из антенн. Анализ результатов показывает, что структуры полей, измеренных на сфере и восстановленных из дальней зоны в целом совпадают как по амплитуде, так и по фазе. Более явно совпадение (или различие) проявляется при рассмотрении сечений. При сравнении результатов прямых измерений на сфере и восстановленных при расчетах из дальней зоны необходимо учитывать, что на степень совпадения влияют все возможные механизмы формирования погрешностей как случайного, так и систематического характера обоих измерительных стендов. Если при анализе погрешностей восстановления дальнезонных характеристик для каждого стенда рассматривались только случайные составляющие погрешностей, поскольку эталонных полей не существует, то при таком сравнительном анализе должно проявиться и влияние систематических погрешностей. На наш взгляд, указанные влияния могли бы проявиться в искажениях типа

единого измерительного комплекса. Структура методики приведена на рисунке 1.

Следует отметить, что методика в усеченном виде (на уровне сравнения диаграмм направленности) многократно использовалась в ходе сравнительных измерений. Добавление последних блоков существенно расширяет возможности методики и позволяет не только оценить влияние аппаратных частей комплексов, но и задействовать в единой вычислительной процедуре практически все алгоритмы и программы преобразования полей.

аббераций на периферийных участках поверхностей измерения. Возможно, такие проявления имеют место, однако для получения достоверных результатов необходимо проведение отдельного анализа, что требует выполнения большого объема экспериментальных измерений. По результатам проведенных экспериментов можно заключить, что в угловом секторе около  $90$  градусов в направлении главного прожекторного луча совпадение хорошее. Различия составляют не более  $3$  дБ на уровне  $-25$  дБ.

Главный результата применения разработанной методики состоит в том, что реализованный компактный полигон действительно представляет собой единый инструмент, адекватно измеряющий и анализирующий структуры полей излучения вне зависимости от способа их измерения и обработки.

#### Литература

1. Будаев А.Г. Разработка концепции построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будаев, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2017 – № 2 – С.151–159.
2. Будаев А.Г. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений

характеристик антенн в ближней зоне / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2017, № 4. – С. 334–343.

3. Будаи А.Г. Практическая реализация радиолокационного аппарата – программного комплекса со сферическим сканированием / А.Г.Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Материалы 11-й Международной

научно-технической конференции «Приборостроение – 2018», Минск, 14–16 ноября 2018. – С. 123–124.

4. Будаи А.Г. Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик голографических измерительных комплексов / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. 2018, т. 9, № 2. – С. 151–159.

УДК 621.317.7.089.68(476)

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕДИНИЦЫ  
ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
Гуревич В.Л.<sup>1</sup>, Серенков П.С.<sup>2</sup>, Волюнец А.С.<sup>1</sup>, Толочко Т.К.<sup>1</sup>, Ермакович А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Одной из измеряемых характеристик на высоких и сверхвысоких частотах является уровень потерь электромагнитной энергии, передаваемой через пассивные радиотехнические устройства, который характеризуется ослаблением.

Для обеспечения метрологического контроля средств измерений ослабления электромагнитных колебаний в Республике Беларусь в 2014 году был создан Исходный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний ИЭ РБ 24-18. После проведения исследований, в 2018 году этот эталон был утвержден в качестве Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 37,5 ГГц НЭ РБ 44-18.

Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний представляет собой программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят:

- управляющая ПЭВМ;
- генератор сигналов Agilent E8257D;
- установка эталонная единицы ослабления в диапазоне частот от 0 до 30 МГц ЭО-1;
- приемник измерительный VM7; частотные конверторы Tegal 8852 и Tegal 8853, используемые в диапазоне частот от 30,0 МГц до 18,0 ГГц и от 18,0 ГГц до 37,5 ГГц соответственно;
- комплекты коаксиальных переходов, прецизионных аттенуаторов, согласующих устройств, кабелей СВЧ и интерфейсных кабелей.

Эталон обеспечивает воспроизведение и передачу единицы ослабления в диапазоне частот от 0 до 37,5 ГГц, разбитых на три поддиапазона:

- 1-ый поддиапазон от 0 до 30 МГц;
- 2-ой поддиапазон от 30 МГц до 18 ГГц;
- 3-ий поддиапазон от 18 до 37,5 ГГц.

Для метрологического контроля эталона необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость результатов измерений до единиц Международной системы (СИ).

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений представляет собой ключевой вопрос для обеспечения доверия к результатам измерений и их сопоставимости, как на национальном, так и на международном уровне.

Обеспечить метрологическую прослеживаемость до единиц величин Международной системы единиц (СИ) можно несколькими способами.

Один из способов это поэлементное исследование эталона. Но в этом случае есть риск того, что либо появятся, либо не будут учтены некоторые влияющие факторы, которые приведут к увеличению неопределенности при калибровке.

Другой способ, это проведение калибровки на вышестоящем эталоне. Для осуществления данного способа необходимо оборудование, входящее в состав эталона, доставить в страну хранения вышестоящего эталона, что является процессом довольно затруднительным и экономически не выгодным, а также может привести к повреждению оборудования в процессе перевозки.

Третьим способом обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений является участие в межлабораторных сличениях. В рамках КООМЕТ в 2014 году БелГИМом была предложена тема «Дополнительные сличения эталонов единицы ослабления электромагнитных колебаний» (КООМЕТ 643/ВУ/14). Тема в качестве предлагаемой была включена в программу сличений, но из-за отсутствия заинтересованных участников не была реализована и аннулирована в 2019 году.

Для решения заданной задачи был выбран путь, который включал в себя анализ источников неопределенности, создание математической модели измерений, разработку методики калибровки.

Анализ показал, что среди источников неопределенности измерений при воспроизведении и передаче единицы ослабления электромагнит-