

УДК 621.396.67

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ И МЕТОДОВ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СОВРЕМЕННЫХ АНТЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ**

**К.И. Курбатов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
kurbatov@vniiftri.ru*

*Аннотация. Статья посвящена разработке средств и методов метрологического обеспечения современных антенных измерительных комплексов ближней зоны. Проводится анализ метрологического обеспечения антенных измерительных комплексов ближней зоны (АИК БЗ). Делаются выводы на примере экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова: антенные измерительные комплексы ближней зоны, анализ, исследования.*

**DEVELOPMENT OF MEANS AND METHODS  
OF METROLOGICAL SUPPORT OF MODERN ANTENNA  
MEASURING COMPLEXES IN THE NEAR ZONE**

**K.I. Kurbatov**

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
kurbatov@vniiftri.ru*

*Annotation. The article is devoted to the development of means and methods for metrological support of modern antenna measuring complexes of the near zone. The analysis of metrological support of antenna measuring complexes of the near field (AMC NF) is carried out. Conclusions are made based on the example of experimental studies.*

*Key words: antenna measuring complexes of the near zone, analysis, study.*

**Введение**

Многообразие антенных систем, особенности их физических и метрологических характеристик определяют большое количество методов измерений. Основной характеристикой антенны, определяющей её свойства направленности, является комплексная векторная диаграмма направленности (ДН). Данная характеристика измеряется на специальных антенных измерительных комплексах и описывает амплитудные, фазовые, поляризационные свойства формируемого или принимаемого антенной электромагнитного поля. При этом особый интерес представляет именно амплитудная диаграмма направленности (АДН). Она определяет эффективность антенны, участвует в энергетических расчётах приёмного и передающего трактов, по уровням боковых лепестков определяется степень помехозащищённости системы.

В настоящее время появились новые комплексы, использующие современные анализаторы цепей с большим динамическим диапазоном, для проведения измерений на высоких частотах используются оптические преобразователи, появились устройства позиционирования, позволяющие установить объекты с точностью несколько десятков микрон, разработаны новые алгоритмы обработки и фильтрации результатов измерений. А эталонная база давно не совершенствовалась, установки, которые были созданы в СССР, утрачены. Таким образом, метрологическое обеспечение антенных измерительных комплексов характеризуется отсутствием прямой прослеживаемости измерений относительных уровней амплитудных диаграмм направленности до эталонов. Особенно остро эта проблема стоит при испытаниях в целях утверждения типа антенных измерительных комплексов ближней зоны, реализующих косвенный метод измерений. Существующий подход к оценке метрологических характеристик АИК БЗ предусматривает оценку основных частных составляющих суммарной погрешности измерений амплитудно-фазового распределения (АФР) для дальнейшего определения погрешностей измерений уровней ДН на основании результатов математического моделирования [1]. При применении данного подхода оказываются учтены не все инструментальные и методические составляющие погрешности, а также отсутствует быстрая сквозная проверка корректности работы комплекса в связке с программным обеспечением.

Таким образом, с целью повышения эффективности и достоверности испытаний новых антенных измерительных комплексов ближней зоны предлагается новый комплектный подход к определению их метрологических характеристик. Условием применения данного метода является наличие антенны (меры) с измеренными относительными уровнями АДН с погрешностью, не выходящей за пределы  $\pm 0,03D$ , где  $D$  — измеряемый уровень АДН, дБ.

Возможным вариантом решения данной задачи является измерение антенны (меры АДН) на компактном антенном полигоне или на экстраполяционном полигоне. В работе рассчитаны потенциально достижимые точности таких измерений и рассмотрена возможность применения антенных измерительных комплексов в качестве установки высшей точности.

### **Потенциально достижимая точность измерений АДН на компактном антенном полигоне**

Определение погрешности измерений уровней боковых лепестков ДН ( $\delta$ ) на компактном антенном полигоне выполняется на основе оценки инструментальных погрешностей и методической погрешности из-за переотражений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.736-2011 [2]:

$$\delta_{\text{лин}} = \frac{\varepsilon + \Theta_{\text{Н}} + \Theta_{\text{КБ}}}{\frac{\varepsilon}{2,56} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\Theta_{\text{Н}} + \Theta_{\text{КБ}})} \sqrt{\frac{1}{3}(\Theta_{\text{Н}} + \Theta_{\text{КБ}})^2 + \frac{\varepsilon^2}{6,56}},$$

где  $\varepsilon$  — доверительные границы ( $p = 0,99$ ) случайной погрешности, обусловленной влиянием собственных шумов измерительной системы;  $\Theta_{\text{Н}}$  — систематическая погрешность измерений отношений уровней сигналов, обусловленная нелинейностью амплитудной характеристики;  $\Theta_{\text{КБ}}$  — систематическая погрешность измерений из-за наличия помеховых сигналов (определяется неравномерностью АФР в рабочей зоне коллиматора и диаграммой направленности измеряемой антенны).

Данная погрешность может быть выражена в дБ по формуле:

$$\delta_{\text{лог}} = \pm 10 \lg(1 + \delta_{\text{лин}}).$$

По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования потенциально достижимая точность измерений АДН на компактном антенном полигоне составляет:

- минус 5 дБ  $\pm 0,1$  дБ;
- минус 10 дБ  $\pm 0,2$  дБ;
- минус 15 дБ  $\pm 0,2$  дБ;
- минус 20 дБ  $\pm 0,3$  дБ;
- минус 25 дБ  $\pm 0,5$  дБ;
- минус 30 дБ  $\pm 0,7$  дБ;
- минус 35 дБ  $\pm 1,1$  дБ;
- минус 40 дБ  $\pm 1,9$  дБ;
- минус 45 дБ  $\pm 2,4$  дБ.

При этом современные АИК БЗ обладают сопоставимыми показателями точности [3]. Таким образом, не выполняется условие о необходимом запасе по точности при измерениях меры на компактных антенных полигонах. В связи с этим представляется необходимым использовать другие методы измерений характеристик меры.

### **Экстраполяционный метод измерения характеристик направленности антенн**

Суть метода заключается в измерении продольного распределения поля  $D(\Theta, R)$  при взаимном перемещении антенн для каждого угла  $\Theta$ . Перемещение может осуществляться в пределах промежуточной зоны, в которых главный лепесток ДН является сформированным. Полученная зависимость аппроксимируется полиномом  $W$  отрицательных степеней расстояния [5]. Для уменьшения погрешности измерений уровней ДН, возникающих из-за многолучевых перетражений, применена фильтрация частотных зависимостей коэффициента передачи в синтезированной временной области для каждого измерения расстояния. Результаты измерений представлены на рис. 1.

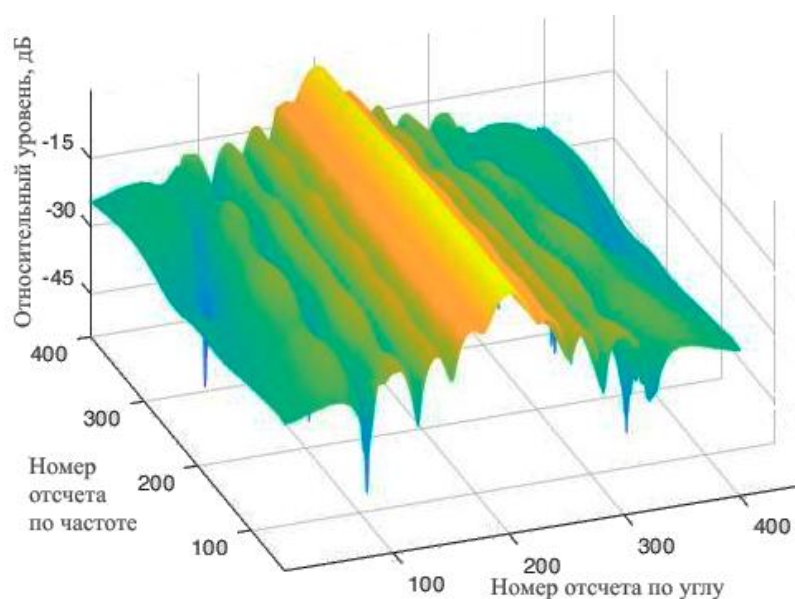


Рис. 1. Результаты измерений ДН рупорной антенны в одной из пространственных точек

Исходными данными для «экстраполяционной» обработки являются:

- векторы ослабления сигнала (коэффициента передачи) по напряжению между антеннами  $K = (P_{пр}/P_T)^{0,5}$  для каждой пары антенн, где  $n \in 0 \dots N$ , а  $N$  — количество пространственных точек, в которых произведены измерения;
- векторы расстояний между апертурами антенн  $R_n$ , соответствующих пространственным точкам в которых произведены измерения;
- аппроксимирующие полиномы 0–3-й степени.

При этом необходимо осуществлять аппроксимацию с выбором соответствующего полинома для каждого пространственного угла  $\Theta$  и соответствующего коэффициента передачи между антеннами. Наиболее устойчивые решения, при измерениях КУ, наблюдаются при аппроксимации полиномом 2-й степени  $W_2$ .

### Результаты эксперимента

Сравнение результатов, полученных на комплексе ближней зоны и на экстраполяционном полигоне ФГУП «ВНИИФТРИ», приведены на рис. 2. Качественным показателем точности выступает эквивалентный уровень помехи. Экспериментальные исследования показывают возможность применения экстраполяционного метода измерений характеристик меры АДН в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц для реализации комплектного подхода.

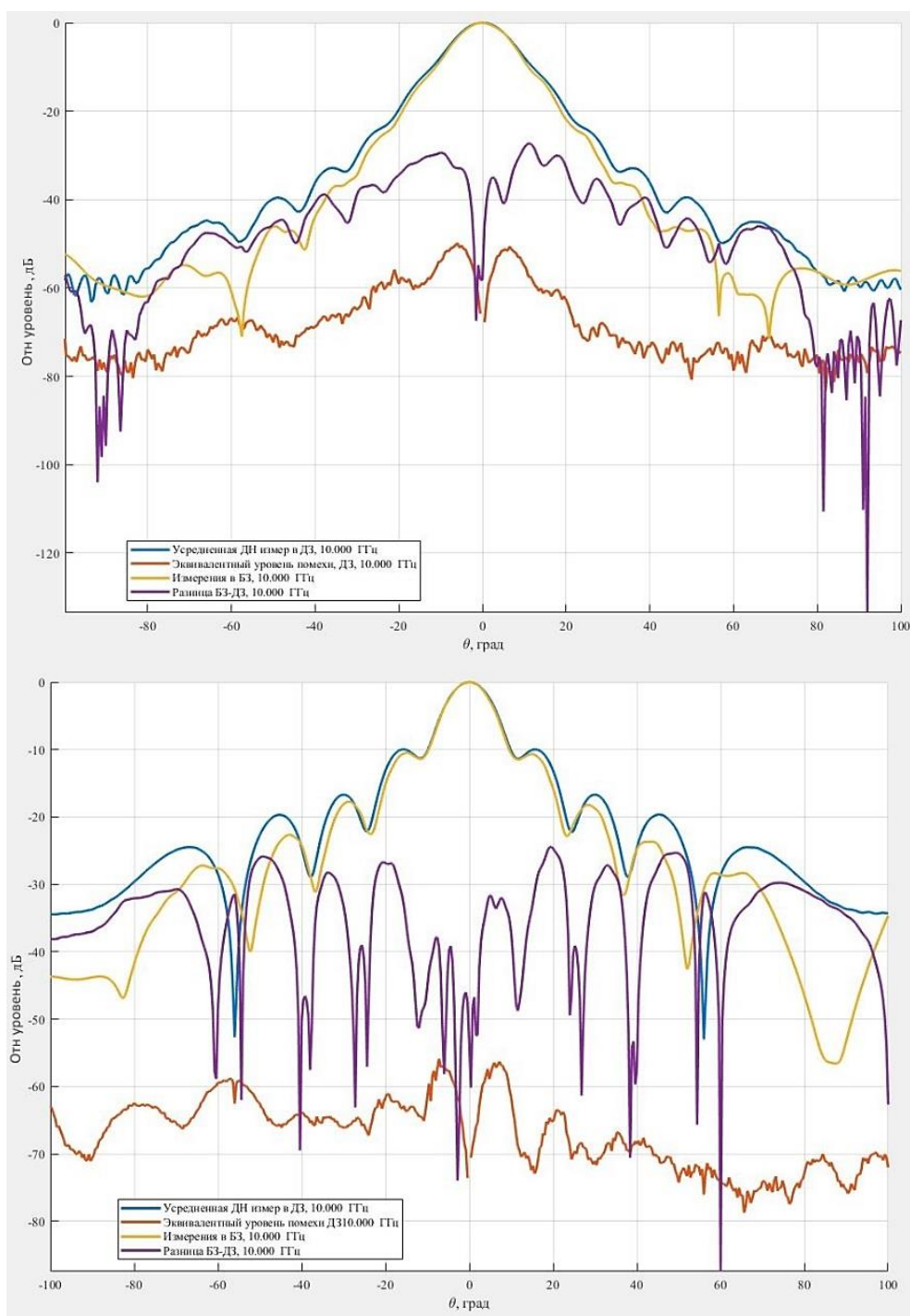


Рис. 2. АДН рупорной антенны, измеренная в дальней зоне с использованием экстраполяционного метода и в ближней зоне на частоте 10 ГГц, показан эквивалентный уровень помех для соответствующих измерений

### Области применения результатов исследований

Возможность использования меры с известной амплитудной диаграммой направленности окажет влияние на достоверность результатов испытаний антенных измерительных комплексов ближней зоны и значительно уменьшит трудоёмкость выполняемых работ при периодических поверках комплексов. Ниже приведено сравнение поэлементного и комплектного подходов к испытаниям АИК БЗ.

#### *Поэлементный подход [1]*

1. Определение погрешности измерений АФР на основе экспериментальных данных:
  - о погрешности измерений модуля комплексного коэффициента передачи (ККП) и фазы ККП векторным анализатором цепей из состава комплекса;
  - погрешности измерений, обусловленной неидеальной поляризационной развязкой антенн-зондов из состава комплекса;
  - погрешности измерений фазы, обусловленной неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования;
  - погрешности измерений фазы, обусловленной случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса;
  - СКО результатов измерений АФР вспомогательной антенны.
2. Определение погрешности измерений относительных уровней АДН методом математического моделирования (с учётом определённых погрешностей измерений АФР) путём сравнения невозмущённых амплитудных диаграмм направленности, определённых для линейно поляризованной антенны с равномерным синфазным распределением токов на апертуре, и тех же диаграмм направленности этой же антенны, но с учётом погрешности измерений АФР.



Рис. 3. Диаграмма определения метрологических характеристик АИК БЗ поэлементным подходом

### Комплектный подход

С использованием антенны с «эталонной» ДН становится возможным применение комплектного подхода.

При испытаниях в целях утверждения типа СИ, с применением комплектного подхода, можно выделить следующие основные пункты.

1. Измерение антенны с эталонной АДН на комплексе ближней зоны (шаг сканирования, частоты, зона сканирования определены и фиксированы для всех испытываемых АИК БЗ).
2. Нормировка погрешности измерений АДН для максимальной зоны сканирования комплекса, а она может значительно превышать зону сканирования, необходимую для измерения меры, требует определения влияния частных составляющих погрешности на результат измерений ДН и внесения соответствующих поправок на определяемые погрешности измерений ДН. А именно:

- погрешность измерений фазы, обусловленную неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования;
- погрешность измерений фазы, обусловленную случайными перегибами тракта;
- погрешность измерений модуля комплексного коэффициента передачи и фазы векторным анализатором цепей для заявленного динамического диапазона комплекса;
- погрешность измерений для разной поляризационной развязки испытываемых антенн и используемых зондов;
- оценить среднее квадратическое отклонение результатов измерений ДН.

При периодической поверке комплекса представляется достаточным ограничиться измерением антенны с эталонной АДН.

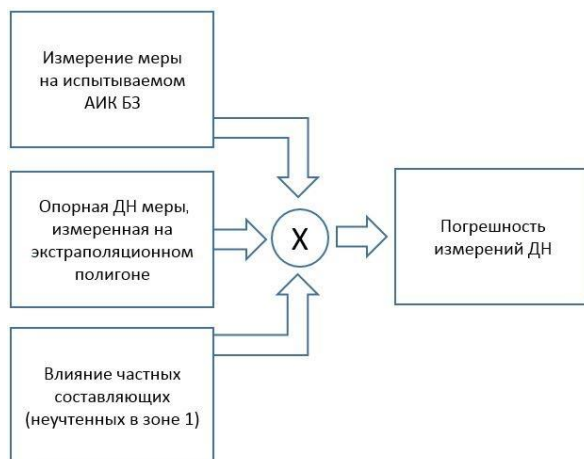


Рис. 4. Диаграмма определения метрологических характеристик АИК БЗ комплектным подходом

### **Заключение**

Полученные результаты носят исследовательский характер и в дальнейшем могут быть использованы для создания комплекта мер АДН. Обоснованы требования к метрологическим характеристикам мер АДН и разработаны методы и средства воспроизведения и передачи формы диаграммы направленности в различных плоскостях в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц. Исследования позволят обеспечить единство и требуемую точность измерений и более эффективно подойти к испытаниям в целях утверждения типа АИК БЗ, существенно снизив трудоёмкость проводимых метрологических работ.

### **Список литературы**

1. Малай И.М., Шкуркин М.С. Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны // Антенны. — 2014. — № 12 (211). — С. 50–55.
2. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — Введ.: 2013-01-01. — М.: Стандартинформ, 2013.
3. Шкуркин М.С. Определение требований к точностным характеристикам комплексов ближней зоны для измерений диаграмм направленности апертурных антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2012. — № 3 (128). — С. 101–107.
4. Озеров М.А. Титаренко А.В. Экстраполяционный метод для прецизионных измерений амплитудных диаграмм направленности антенн // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 221–224.

*Статья поступила в редакцию: 01.09.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 10.09.2021 г.*

*Статья принята в работу: 14.09.2021 г.*