

Способы эталонирования диаграмм направленности антенн для оценки точности измерений

И. М. Малай¹, М. А. Озеров², А. В. Титаренко³

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений

¹malay@vniiftri.ru, ²ozarov@vniiftri.ru, ³titarenko@vniiftri.ru

Аннотация. Одним из этапов создания радиотехнических систем является подтверждение задаваемых при проектировании характеристик используемых антенных систем с использованием антенных измерительных комплексов. Ключевым показателем антенных измерительных комплексов является погрешность измерений. Оценка погрешности измерений формы диаграммы направленности антенны, представляющей из себя многомерную функцию, является сложной задачей. В работе рассматривается возможность решения данной задачи, основанная на использовании эталонных диаграмм направленности. Рассмотрены различные способы получения эталонных диаграмм, проведена экспериментальная оценка их точности.

Ключевые слова: антенна, диаграмма направленности, радиоколлиматор

I. ВВЕДЕНИЕ

Антенные измерения СВЧ диапазона непрерывно развиваются с середины прошлого века. В России насчитывается более сотни современных автоматизированных измерительных комплексов (АИК) для измерений основных радиотехнических характеристик антенн СВЧ диапазона, прежде всего – коэффициента усиления (КУ) и формы амплитудной диаграммы направленности (АДН). Насыщение окружающего пространства источниками и приёмниками сигналов радиочастотного спектра способствует повышению требований к диапазону и точности измерений АДН, выполнение которых проверяется на этапе испытаний АИК.

Имеющиеся в настоящее время эталонные средства не обеспечивают решение задачи оценки погрешностей измерений характеристик антенн в полной мере. Для оценки погрешности измерений КУ могут быть использованы антенны, прошедшие высокоточную калибровку на эталонах ГЭТ-160, КВЭ-61 или П1-32. Перечисленные установки обеспечивают погрешность измерений КУ в пределах $\pm[0,2...0,5]$ дБ, но имеют ограничения по размерам калибруемых антенн. Поэтому, для небольших антенн, имеющих размеры апертуры, условно, до 10λ (где λ – длина волны электромагнитного излучения), может быть применён метод прямой оценки погрешности измерений КУ с использованием эталона. Оценка погрешности измерений характеристик антенн с большой апертурой может быть выполнена косвенным методом на основе оценок инструментальных и методических составляющих суммарной погрешности в соответствии с принятой моделью. Также возможно использовать комбинированный метод, сочетающий использование эталона и вычислений, учитывающих

разницу характеристик используемого эталона и исследуемых антенн.

Погрешность измерений АДН сейчас в виду отсутствия эталонов может быть оценена лишь косвенными методами вне зависимости от размеров исследуемой антенны. В данной ситуации корректность получаемых оценок будет определяться адекватностью принимаемой модели погрешности измерений. Само себе построение модели погрешности измерений АДН является нетривиальной задачей даже для ограниченных условий [1]. При оценке метрологических характеристик АИК такие ограничения обычно не вводятся, поэтому погрешности рассчитываются для широкого частотного диапазона и диапазона апертур испытываемых антенн, учёт влияния амплитудно-фазовых распределений поля на апертуре, тем более, не выполняется.

Практика показала необходимость детальной верификации, используемых моделей погрешности с использованием экспериментальных результатов. Наиболее эффективной представляется верификация путём непосредственного сравнения получаемых расчётных оценок погрешности с экспериментальными. Однако же, такой способ предполагает использование эталонов формы АДН. Если исключить из внимания требования к формальному статусу таких эталонов, то, очевидно, точность «эталонной» или же «опорной» АДН должна существенно превышать точность испытываемого АИК. Поэтому, требуется разработка такого АИК и методов измерений, точность которых будет превосходить уже имеющиеся с существенным запасом.

Отдельно стоит отметить постоянное ужесточение требований к погрешности измерений радиотехнических характеристик антенн. Их выполнение также может потребовать использования новых более точных методов и средств. Поэтому, в настоящей работе рассмотрены возможные способы получения АДН с высокой точностью, которые могут быть использованы в качестве эталонных как для оценки погрешности АИК, так и при испытаниях новых антенн и антенных систем.

II. Точность измерений АДН

Интерес к эталонированию пространственных характеристик излучения антенн возник достаточно давно. В нашей стране велись работы по созданию как эталонов КУ, так и АДН. Об этом свидетельствует серия стандартов ГОСТ 8.191-76 и ГОСТ 8.392-76, действующих и в настоящее время, несмотря на потерю актуальности. Данные стандарты устанавливают использование в качестве эталонов комплектов

измерительной аппаратуры (по сути, АИК) и эталонных антенн, размещённых и оставшихся с развалом СССР на территории Армении. Любопытно отметить, что указанные в приведённых документах точности измерений КУ (случайная погрешность 0,7 %, систематическая – 1,5 %) были достигнуты сравнительно недавно. В настоящий момент ведущие мировые лаборатории обеспечивают погрешность измерений КУ в пределах $\pm[0,04...0,1]$ дБ, то есть, не менее 1 %, но только для измерительных антенн с небольшой апертурой [2].

Погрешности измерений уровней АДН, установленные ГОСТ, не менее впечатляющие. Случайная и систематическая погрешности в сумме составляют 1 % для диапазона уровней от 0 до минус 30 дБ. Конечно, достижение таких значений затруднительно даже на текущем уровне развития антенных измерений. Эталоны формы АДН, как следует из [2], в настоящее время отсутствуют, что не исключает интереса к их созданию. В серии проведённых в ЕС межлабораторных сличений опорные диаграммы были получены путём усреднения всех результатов с весовыми коэффициентами, зависящими от заявленных каждой лабораторией погрешностей [3, 4]. Особенностью проведённых измерений являлось сравнение АДН, выраженных в единице КУ. Оценка погрешности сформированного в ходе сличений «эталона» КУ и АДН не проводилась. Создание эталона формы АДН на основе серии независимых равноточных измерений является альтернативой созданию специального высокоточного АИК, но при этом используемая выборка должна учитывать ограничения, присущие привлекаемым для этого измерительным комплексам. С одной стороны такой способ эталонирования обладает преимуществом децентрализации, с другой, его реализация невозможна без участия специального регулятора. Отечественная же традиция основана на работе в строгой иерархической структуре, вершину которой занимает эталонная аппаратура, превосходящая по точности другие средства.

Диаграмма направленности, в отличие от КУ, является пространственной характеристикой и помимо частоты и поляризации требует учёта двух угловых координат. Даже при фиксации частоты, поляризационного состояния и одной из угловых координат возникает сложность в оценке погрешности из-за неопределённости уровня АДН в заданном направлении. Одним из простых способов ухода от этой неопределённости является использование такого параметра как эквивалентный уровень помех (ЭУП). ЭУП – величина, характеризующая отношение суммарной погрешности измерений уровня АДН к значению измеряемого уровня. Она учитывает совокупное влияние всех источников суммарной погрешности, например: нелинейность шкалы приёмной аппаратуры и его шумов, дрейф измерительной аппаратуры, неплоскостность амплитудного и фазового распределений поля вблизи антенны, побочные переотражения сигналов, искажения при математической обработке и другие.

В случае сравнения измеренной АДН $F(\theta)$ с имеющейся опорной АДН $\bar{F}(\theta)$ для вычисления ЭУП может быть использовано следующее соотношение:

$$N(\theta) = 20 \lg \left[\frac{(\delta(\theta) - 1)}{(\delta(\theta) + 1)} \right] + 10 \lg |F(\theta)|, \quad (1)$$

где $\delta(\theta) \approx |F(\theta)/\bar{F}(\theta)|$, θ – угол.

В работе [5] для вычисления «Equivalent Stray Signal» используется несколько иное соотношение (2). Отличия в оценках ЭУП между (1) и (2) значительны лишь при больших значениях $\delta(\theta)$. В работах [3, 4] используется термин «Equivalent Noise Level», для получения обобщённых оценок качества измерений определяются статистические показатели данной характеристики.

$$N(\theta) = 20 \lg \left[\sqrt{\delta(\theta)} - 1 \right] + 10 \lg |F(\theta)|. \quad (2)$$

Удобство использования такого обобщённого параметра, как ЭУП, заключается в том, что его угловая зависимость вне области главного лепестка АДН в большей степени определяется свойствами используемого стенда, нежели исследуемой на нём антенны.

Пределы погрешности измерений уровней АДН на основе ЭУП оцениваются по формуле:

$$\delta F(\theta) = \pm 20 \lg \left[1 \pm 10^{0,05(N(\theta) - F_A(\theta))} \right], \quad (3)$$

где $F_A(\theta) = 10 \lg |F(\theta)|$ – уровни АДН, выраженные в децибелах.

Используя (2) легко оценить требования к ЭУП эталонной АДН или аппаратуре эталона формы АДН, которые неразрывно связаны. Так, для обеспечения значений погрешности, установленных в ГОСТ 8.191-76 и ГОСТ 8.392-76, ЭУП должен составлять минус 46 дБ в направлении максимума АДН и до минус 76 дБ в остальных направлениях в зависимости от уровня АДН. Для ряда эксплуатируемых в настоящее время АИК заявленные значения погрешностей измерений АДН на уровне минус 50 дБ составляют $\pm[2...3]$ дБ, тогда, с учётом трёхкратного запаса по точности, ЭУП эталонных средств для их контроля должен составлять около минус 70 дБ. Рассмотрим возможные способы достижения таких значений ЭУП.

III. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ АДН

В виду того, что доминирующие составляющие погрешностей измерений характеристик антенн имеют систематический характер, невозможно добиться высокой точности измерений только за счёт накопления измеряемых сигналов. Поэтому основные усилия по обеспечению высокой точности в антенных измерениях направлены на максимально качественное обеспечение условий дальней зоны и свободного пространства. В некоторых случаях достижение высокой точности обеспечивается за счёт избыточности выполняемых измерений. Сказанное в какой-то мере относится даже к электродинамическому моделированию, точность которого зависит от дискретности используемой модели.

A. Электродинамическое моделирование

Первые оценки характеристик эталонных антенн были получены путём аналитических расчётов. На тот момент они, вероятно, обеспечивали лучшую точность, нежели имевшиеся АИК. Расчётные методы активно развиваются наряду с методами и средствами измерений и вносят значительный вклад в исследование

характеристик антенн. Наибольшее применение получили системы автоматизированного проектирования FEKO, CST Microwave Studio, HFSS, ADS EMPro в которых применяются следующие основные математические методы электродинамического моделирования: метод интегральных уравнений (МИУ), метод конечных временных разностей (МКВР), метод конечных элементов (МКЭ), метод физической оптики.

Несмотря на постоянное совершенствование вычислительных методов электродинамического моделирования и рост производительности используемых вычислительных средств они не в состоянии в среднесрочной перспективе полностью заменить натурные эксперименты по оценке характеристик антенн. Обычно расчёт характеристик небольших антенн не представляет вычислительной сложности даже для уровней АДН минус 70 дБ. При решении данной задачи погрешность электродинамического моделирования обуславливается неполным соответствием используемых моделей антенн, как по геометрической форме, так и электрофизическим параметрам используемых материалов.

В качестве примера здесь и далее используются результаты электродинамического моделирования и измерений параметров антенны в виде пирамидального рупора П1-139/3 на частоте 10 ГГц, имеющего размеры раскрытия 200×150 мм и минимальное расстояние дальней зоны 2,67 м. В качестве опорной АДН приняты результаты усреднения нескольких диаграмм, измеренных в дальней зоне на расстоянии около 13 м.

Как видно из графиков, представленных на рис. 1, результаты моделирования тремя методами оказались сопоставимы по точности и обеспечили ЭУП около минус 60 дБ вне зоны максимума главного лепестка. Расхождение форм главных лепестков АДН, полученных разными способами, обусловило ЭУП до минус 30 дБ. Стоит отметить, что обеспечение корректного совмещения анализируемых сечений является достаточно чувствительным вопросом из-за большой крутизны АДН при её малом уровне. Несовпадение даже на сотые доли ширины главного лепестка АДН приводит существенному завышению ЭУП. В результате, для анализа приведённых в настоящей работе результатов использовалась аппроксимация АДН на такую сетку углов, которая обеспечивает минимальный ЭУП в направлении максимума.

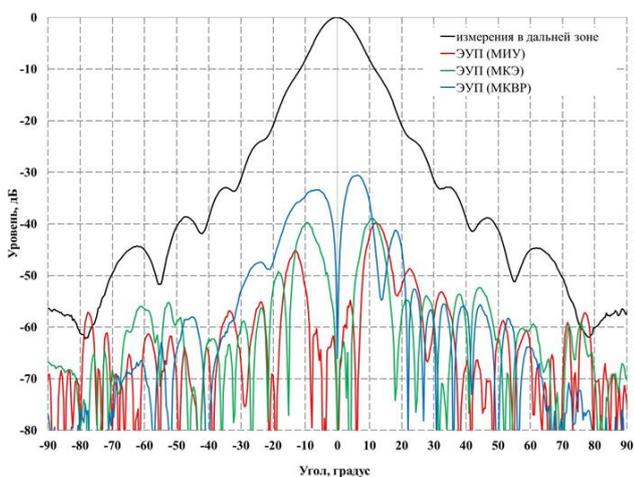


Рис. 1. Результаты электродинамического моделирования

Полученные результаты моделирования имеют, в целом, неплохую точность. Неточность вычислений может быть связана с недостаточно подробным описанием электродинамической модели антенны. Данный фактор будет усугубляться при моделировании антенн других типов с более сложной конструкцией, например, зеркальных, которые могут быть использованы в качестве эталонных.

В. Измерения в дальней зоне

Измерения в дальней зоне являются наиболее распространёнными и позволяют напрямую получать значения характеристик антенн. При измерениях предполагается, что сферичностью фазового фронта электромагнитного поля у апертуры приёмной антенны можно пренебречь. Это допущение изначально является источником погрешности измерений. Другим ключевым источником погрешности измерений являются многолучевые переотражения. Уменьшение интенсивности переотражений достигается использованием безэховых камер (БЭК), качество которых характеризуется коэффициентом безэховости – характеристикой близкой по смыслу ЭУП. При выполнении измерений возникает противоречие между одновременным уменьшением сферичности фазового фронта и многолучевых переотражений, поскольку уменьшение первое требует увеличения длины безэховой камеры, а второе – увеличение её ширины и высоты. Поскольку построение больших БЭК является крайне дорогостоящим, этот фактор серьёзно ограничивает номенклатуру антенн, характеристики которых могут быть измерены в дальней зоне с высокой точностью.

Для измерительных антенн СВЧ диапазона минимальное расстояние дальней зоны обычно составляет единицы метров и может быть кратно превышено во многих БЭК. Однако, моделирование показывает, что этого недостаточно для обеспечения требуемой для эталонирования АДН точности измерений. На рис. 2 показаны результаты математического моделирования влияния сферичности фазового фронта для нескольких расстояний до точечного излучателя.

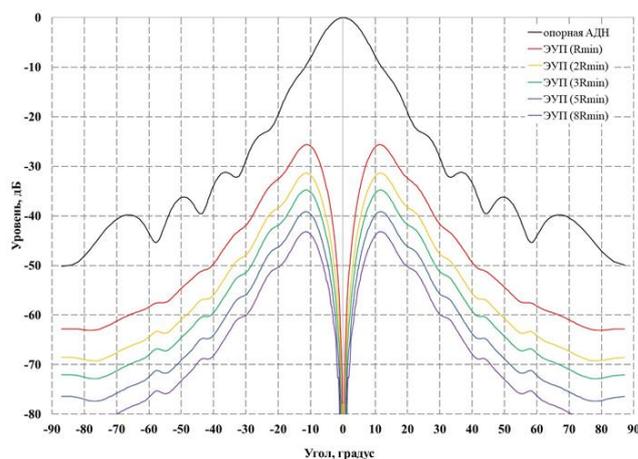


Рис. 2. Оценка ЭУП из-за сферичности фазового фронта (Rmin – минимальное расстояние дальней зоны)

Как видно из рис. 2, для достижения достаточно низких значений ЭУП расстояние между антеннами должно превышать минимальное расстояние дальней зоны не менее чем на порядок. В таком случае могут

возникнуть проблемы не только с обеспечением низкого уровня многолучевых переотражений, но и с обеспечением требуемого динамического диапазона измерительной системы. С другой стороны, рассматриваемый пример имеет особенности – рассматривается сечение АДН в Н-плоскости пирамидального рупора, выбранное из-за сильного падения уровней. Максимальные значения ЭУП наблюдаются вблизи максимума диаграммы, далее же он спадает по мере уменьшения её уровней. Это позволяет в ряде случаев использовать АДН, измеренные в дальней зоне. Примером может быть оценка точности измерений в ближней зоне с планарным сканированием, которая ухудшается по мере удаления от максимума АДН.

Проблема многолучевых переотражений может быть решена за счёт усреднения нескольких АДН, измеренных с определённым шагом или применения алгоритмов фильтрации. В целом же, при учёте области главного лепестка, сложно рассчитывать на получение ЭУП с максимальными значениями ниже минус 40 дБ. Тем не менее, в данной работе в качестве опорной была выбрана АДН, полученная в дальней зоне путём усреднения нескольких диаграмм.

С. Измерения с применением реконструктивных алгоритмов

Хорошую альтернативу прямым измерениям в дальней зоне представляют измерения с применением алгоритмов восстановления в дальнюю зону. При их реализации может потребоваться избыточность исходных данных и информация о расстоянии между фазовыми центрами антенн. Один из вариантов реализации таких измерений подробно описан в [6]. Он является развитием метода дискретного частотного синтеза для двух- и трёхмерных пространственных координат и позволяет уменьшать погрешности измерений, возникающие из-за сферичности фазового фронта и многолучевых переотражений. Суть метода заключается в синтезировании некоего аналога сглаженной импульсной характеристики (СИХ) антенны в двух- или трёхмерном пространстве. Пространственная СИХ соответствует набору эквивалентных источников импульсов электромагнитного поля или же усреднённой по частоте плотности эквивалентных полей в заданном объёме (или их проекции на плоскость), формирующей распределение поля по поверхности, на которой производятся измерения.

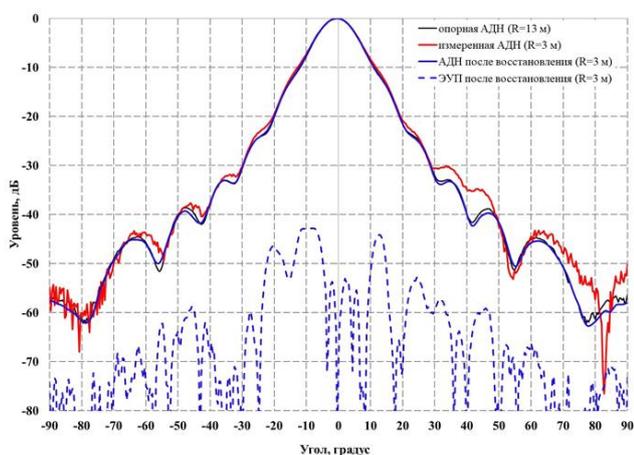


Рис. 3. Результаты применения двумерной фильтрации

Применение данного метода позволяет многократно снизить расстояние между антеннами и добиться меньшей погрешности из-за сферичности фазового фронта электромагнитного поля. На рис. 3 показаны результаты эксперимента, заключавшегося в измерениях АДН антенны П1-139/3 вблизи границы дальней зоны с последующим восстановлением на квазибесконечное расстояние. Восстановленная АДН хорошо сопоставима с опорной ДН, следовательно, применение метода обеспечило возможность уменьшения расстояния между антеннами по меньшей мере в четыре раза.

Д. Измерения в промежуточной зоне с применением метода экстраполяции

Возможным вариантом решения задачи эталонирования формы АДН является применение экстраполяционного метода, описанного в [7], для измерений угловой зависимости КУ, которая и является ненормированной АДН. Суть метода заключается в измерении продольного распределения поля $F(\theta, R)$ при взаимном перемещении антенн для каждого угла θ . Перемещение может осуществляться в пределах промежуточной зоны в которых главный лепесток АДН является сформированным [8].

Метод экстраполяции применительно к АДН требует детального исследования поскольку, в отличие от измерения КУ, сильнее подвержен влиянию многолучевых переотражений и шумов измерений. Также, в отличие измерений КУ, экстраполяционные кривые для разных углов могут как расти, так и снижаться. В целом, полученные в БЭК ВНИИФТРИ предварительные результаты характеризуются уровнями ЭУП, сопоставимыми с другими методами. Результаты измерений, представленные на рис. 4, проводились в диапазоне расстояний от 3 до 6 метров с шагом 7,5 мм.

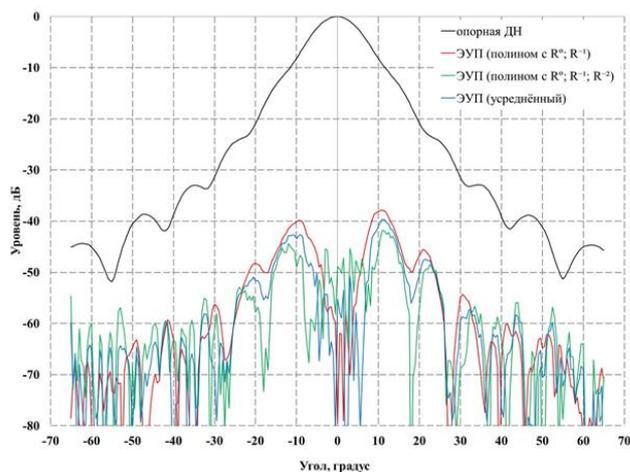


Рис. 4. Результаты применения метода экстраполяции

Е. Измерения в промежуточной зоне с применением реконструктивных алгоритмов

Приведённые ранее результаты показывают сложность анализа эффективности рассмотренных методов при отсутствии надёжных опорных значений. Полученные значения ЭУП находятся в диапазоне минус 40...минус 50 дБ, что примерно соответствует значениям, присущим используемой опорной АДН (рис. 2). Эта неопределённость может быть устранена за счёт использования эталонной аппаратуры с высокими точностными характеристиками. Образец такого АИК был создан во ВНИИФТРИ с целью обеспечения

возможности проведения высокоточных измерений для решения широкого спектра научных и прикладных задач [9].

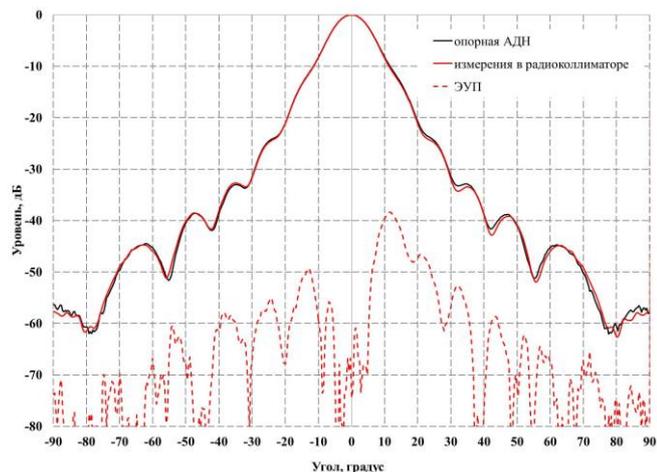


Рис. 5. Результаты измерений в поле радиоколлиматора

В качестве основы измерительного комплекса был выбран радиоколлиматор, имеющий рефлектор со скругленными краями и обеспечивающий рабочую зону Ø3 м при габаритах вырезки 6×6 м. Радиоколлиматор имеет боковую схему облучения и фокусное расстояние 9,7 м. По результатам оптических измерений СКО отклонения фактического профиля рефлектора от заданного составило 30 мкм. Размеры специально спроектированной безэховой камеры соответствуют удвоенным габаритам рефлектора. Совокупность указанных факторов обусловила хорошие параметры однородности поля в рабочей зоне. Результаты измерений амплитудно-фазового распределения поля в рабочей зоне радиоколлиматора, начиная с S-диапазона можно обобщить следующим образом:

- полная неравномерность амплитуды не более 1,0 дБ, амплитуда огибающей 0,6...0,8 дБ;
- амплитуда неравномерности фазы (без учёта единичных отклонений) 1°/10 ГГц свыше 10 ГГц и не более 2° до 10 ГГц.
- уровень кроссполаризации не хуже минус 28 дБ.

Указанные параметры поля относятся к полной рабочей зоне, при её ограничении до Ø1 м амплитуда огибающей уменьшается до 0,1 дБ. Такую же амплитуду в X-диапазоне имеют амплитудные вариации поля, а амплитуда вариаций фазы составляет 1°. Результаты расчёта ЭУП по сечению распределения поля радиоколлиматора даёт максимальные значения не более минус 50 дБ.

Для рупорных антенн имеющийся период вариаций амплитуды и фазы поля достаточно велик – на их апертуре может присутствовать и интегрироваться малое количество периодов, что является фактором, ограничивающим точность измерений. С другой стороны, точность можно повысить за счёт усреднения результатов, полученных в разных точках рабочей зоны. На рис. 5 представлены результаты измерений сечения АДН для одной пространственной точки. Необходимо отметить, что измерениям подвергалась однотипная с предыдущими антенна, но другой её экземпляр. Полученные результаты вновь согласуются с

используемыми опорными значениями, а степень совпадения близка с другими экспериментами. Это подтверждает возможность достижения таких значений ЭУП, которые получены путём гармонического анализа амплитудно-фазового распределения поля радиоколлиматора.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе представленных исследований были опробованы различные методы и средства измерений АДН, предназначенные для получения результатов с более высокой точностью, чем на обычных средствах или в штатных режимах работы. В качестве опорной использовалась диаграмма, измеренная в дальней зоне и имеющая ограничения по точности, выраженные в ЭУП, порядка минус 40 дБ. Соответствующие этому уровню погрешности показали все рассмотренные экспериментальные методы. На текущий момент это даёт основание рассматривать их как равноточные, а в ходе дальнейших исследований определить такой, который обеспечивает наивысшую точность в доступных условиях.

Из рассмотренных способов только использование высокоточного АИК на основе радиоколлиматора позволит обеспечить требуемую точность измерений характеристик антенн с большими размерами апертуры – десятки-сотни длин волн. Достигнутые во ВНИИФТРИ характеристики радиоколлиматора с рефлектором со скруглёнными краями позволяют использовать данный АИК при выполнении измерений, требующих высокую точность или же в качестве эталонного компаратора при измерениях радиотехнических характеристик апертурных антенн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Н.В. Аношин, И.М. Малай Математическая модель измерений характеристик антенн в ближней зоне // Альманах современной метрологии, vol 25, pp. 44-66. 2021.
- [2] <https://www.bipm.org/kcdb/cm/c/>
- [3] M. Alberica Saporetti, L. Foged, M. Sierra Castaner, S. Pivnenko, R. Cornelius and D. Heberling, "Description and Results: Antenna Measurement Facility Comparisons [Measurements Corner]," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 3, pp. 108-116, June 2017, doi: 10.1109/MAP.2017.2686097.
- [4] M. A. Saporetti et al., "International facility comparison campaign at L/C band frequencies," *2017 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, Atlanta, GA, USA, 2017, pp. 1-6, doi: 10.23919/AMTAP.2017.8123707.
- [5] A. C. Newell and G. E. Hindman, "Antenna pattern comparison using pattern subtraction and statistical analysis," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Rome, Italy, 2011, pp. 2537-2540.
- [6] Озеров М.А., Титаренко А.В. Многомерная пространственная фильтрация для повышения точности измерений электродинамических характеристик излучения антенн // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 46-54.
- [7] A.C. Newell, R.C. Baird P.F. Wacker. Accurate measurement of antenna gain and polarization at reduced distances by an extrapolation technique. *IEEE Trans. of Antennas Propagat.*, vol. AP-21 №4, pp.418-431, July 1973.
- [8] Озеров М.А., Титаренко А.В. Экстраполяционный метод для прецизионных измерений амплитудных диаграмм направленности антенн // Тезисы докладов X Всероссийской НТК «Метрология в радиоэлектронике». Выпуск 10, 2016. С. 221-224.
- [9] Описание уникальной научной установки УНУ-PTX [Online]. Сайт: <https://www.unu-rth.vniiftri.ru>.