

Результаты применения электродинамического моделирования для оценки характеристик антенных измерительных комплексов на основе радиоколлиматоров

А.В. Кривов¹, Е.В. Коротецкий¹, М.А. Озеров², А.В. Титаренко²

¹ООО «Радиолайн», Москва, Россия,
krivov@radiorf.ru, ek@radiorf.ru

² ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
ozerov@vniiftri.ru, titarenko@vniiftri.ru

Проведена оценка эффективности электродинамического моделирования антенного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора. Показано влияние инженерного оборудования безэховой камеры на характеристики электромагнитного поля в рабочей зоне радиоколлиматора. Приведены результаты сертификационных испытаний, хорошо согласующиеся с результатами моделирования.

Ключевые слова: антенна, измерения, радиоколлиматор, эквивалентный уровень помех.

Введение

За последние 5 лет в России удвоилось количество антенных измерительных комплексов (АИК) на базе радиоколлиматоров. В создании таких комплексов обычно участвует кооперация изготовителей таких составных частей измерительного комплекса, как радиоколлиматор, устройства позиционирования антенн, помещение для размещения комплекса (обычно – экранированная камера), радиопоглощающий материал. Особенностью АИК на базе радиоколлиматоров является сильная зависимость метрологических характеристик от условий его размещения – свойств безэховой экранированной камеры (БЭК). Конечно, то же можно сказать и об АИК дальней зоны, но при их создании результирующие характеристики почти полностью определяются изготовителем БЭК. При проектировании АИК на базе радиоколлиматора задачей головного разработчика является недопущение значимой деградации характеристик радиоколлиматорной системы из-за влияния на формирование электромагнитного поля (ЭМП) безэховой камеры, опорно-поворотных устройств и других факторов.

В процессе проведения испытаний АИК осуществляется оценка метрологических и технических характеристик комплекса в целом, то есть совокупности всех его элементов. Зачастую сложно напрямую проследить степень влияния того или иного элемента АИК на достигнутые результаты, а также разрешить спорные ситуации при невыполнении задаваемых требований. Поэтому, способы локализации источников помех при измерениях и декомпозиции их погрешностей представляют большой интерес для разработчиков АИК.

ООО «Радиолайн» разрабатывает и производит [1] АИК, устанавливаемые в БЭК других производителей. В некоторых случаях, технологические особенности смонтированных БЭК приводят к существенной деградации метрологических характеристик АИК. Для анализа и предотвращения возможных проблем, связанных с влиянием конструкции БЭК, ООО «Радиолайн» использует методы электродинамического моделирования, а также элементы методики испытаний АИК на основе радиоколлиматоров, применяемой ФГУП «ВНИИФТРИ». Ниже показаны основные этапы анализа на примере результатов испытаний радиоколлиматора с размером тихой зоны 0,75 м.

Способ комплексной оценки качества радиоколлиматоров

Широко распространенным подходом [2] к оценке характеристик радиоколлиматорных стендов является измерение амплитудно-фазового распределения (АФР) ЭМП, сформированного на плоскости в центре тихой зоны. Строгие критерии оценки качества волнового фронта в тихой зоне отсутствуют. Обычно, плоским считают волновой фронт, соответствующий следующим критериям: неравномерность амплитуды $\pm 0,5$ дБ, неравномерность фазы $\pm 5^\circ$, уровень кроссполяризации менее минус 25 дБ. Указанные значения могут меняться в зависимости от частоты, конструкции и назначения радиоколлиматора. Проверка соответствия качества АФР лишь указанным параметрам даёт ограниченную информацию о влиянии на погрешности измерений диаграммы направленности (ДН). Характер неравномерности АФР связан с угловой зависимостью погрешности в измеряемой ДН – чем выше пространственная частота колебаний амплитуд и фаз, тем на большем угле будут наблюдаться искажения.

С точки зрения полноты результатов более универсальным является другой способ, предложенный в [3]. Авторы оценивают характеристики планируемых к измерениям на коллиматорном стенде изделий при помощи АФР, расположенного на сферической поверхности в пределах области тихой зоны. Используется представление напряженности поля в виде

суперпозиции сферических волн [4]. Существенным минусом этого подхода является трудоемкость с точки зрения организации и проведения измерений АФР. В то время как измерения на плоскости легко реализуемы и требуют меньших трудозатрат.

Оба подхода имеют общие недостатки. На этапе юстировки измерительного стенда по АФР невозможно определить направления на источники рассеяния, которые приводят к неравномерности ЭМП в тихой зоне. В этом случае вычисляется спектр плоских волн. Кроме того, по значениям результирующей неравномерности АФР в тихой зоне нельзя сделать вывод о погрешностях измерения ДН испытываемых антенн. Для устранения этого недостатка используется величина эквивалентного уровня помех (ЭУП) (англ. – ESS, «Equivalent Stray Signal» или ENL, «Equivalent Noise Level») [5, 6].

Угловые направления на источники помеховых сигналов определяются при помощи расчета спектра плоских волн (англ. – PWS, «Plane Wave Spectrum») из измеренного АФР [7]:

$$PWS(k_x) = \int_{x=0}^L W(x)E(x)e^{j\alpha k_x} dx, \quad (1)$$

где k_x – проекция волнового вектора на текущее сечение АФР;

$\alpha = \arcsin(k_x/k)$ – угол наблюдения;

L – длина измеренного сечения АФР;

$E(x)$ – комплексное измеренное сечение АФР;

$W(x)$ – оконная функция.

Вычисление ЭУП, представляющего помеховый сигнал как функцию угла, даёт возможность дифференцирования погрешности измерений ДН от её угла. Одновременно с этим, зная угловое направление прихода помехи, можно локализовать пространственное положение источника помех. Значение ЭУП для фиксированного угла связано с погрешностью измерений $\Delta_{об}$ [дБ] следующим соотношением:

$$\text{ЭУП} = 20 \lg(10^{0,05\Delta_{об}} - 1) + \text{УБЛ}, \quad (2)$$

где УБЛ – измеряемый уровень ДН (уровень бокового лепестка) в децибелах.

Погрешность измерений определяется как отношение уровней измеряемой ДН к соответствующим по углу уровням «опорной» ДН. В процессе анализа в качестве исходных данных для вычисления «опорной» ДН является плоское равномерное АФР, а для «измеренной» ДН – смоделированное или измеренное АФР в тихой зоне. Для преобразования АФР в ДН используется дискретное преобразование Фурье с

координатным преобразованием. Для уменьшения УБЛ опорной ДН должно выполняться умножение анализируемых АФР на оконную функцию, например, окно Кайзера ($\beta=6$) или \cos^2 . Расчет опорной и измеренной ДН происходит аналогично вычислению PWS в соответствии с (1), а в качестве оконной функции используется либо равномерное амплитудное распределение, либо амплитудное распределение типа «косинус на пьедестале». Вид используемой оконной функции влияет на ЭУП. Ввиду того, что в антенной технике активно используются «пьедестальные» распределения, при оценке погрешностей измерений в процессе испытаний АИК выбрано распределение «косинус на пьедестале 0,5». В приведённых далее результатах вычислений использовалась оконная функция с равномерным распределением.

Возможны два варианта использования ЭУП для оценки погрешности – определение максимального значения ЭУП или среднего квадратичного значения (СКО) ЭУП в секторе углов. Тогда погрешность можно вычислить по формуле (3). При использовании СКО ЭУП для вычисления границ погрешности с доверительной вероятностью 95% (2σ) к его значению нужно прибавить 6 дБ.

$$\Delta_{дБ} = 20 \lg \left(1 + 10^{0,05(\text{ЭУП} - \text{УБЛ})} \right). \quad (3)$$

Наряду с обработкой непосредственно измеренных АФР, для поиска узких мест при прототипировании и для анализа результатов испытаний в «Радиолайне» используется электродинамическое моделирование [8]. Применяется два подхода для моделирования ЭМП в тихой зоне: упрощенный и подробный. В первом случае рассчитывается напряженность поля для набора интересующих точек в пространстве. При этом перемещение антенны-зонда и её ДН не учитываются. Этот подход применяется для базового моделирования АФР в тихой зоне, а также при наличии стационарных удаленных источников рассеяния. Во втором случае рассчитывается комплексный коэффициент передачи между антенной-зондом и антенной-облучателем. Моделирование выполняется с учетом перемещения антенны-зонда и её ДН как при реальных измерениях. При таком подходе становится возможным учет влияния окружения зонда, в том числе источников рассеяния, перемещающихся вместе с ним. В обоих случаях направленные свойства антенн задаются в виде предварительно рассчитанных распределений электромагнитного поля в ближней зоне.

В процессе испытаний выполняются измерения АФР для каждого облучателя радиоколлиматора. Ввиду того, что измерения АФР на плоскости и, тем более, в объёме рабочей зоны являются очень продолжительными. На практике обычно выполняются измерения двух ортогональных сечений АФР в фокальной плоскости радиоколлиматора,

проходящих через центр рабочей зоны. Процедура вычислений ЭУП описана в [9], она отличается от описанной выше вычитанием «опорной» ДН из «измеренной», что избавляет от необходимости применения оконных функций для уменьшения уровней боковых лепестков пространственного спектра. Полученные угловые зависимости имеют характерную «гауссовидную» форму с максимумом в направлении на центр зеркала радиоколлиматора и резко спадающие вне его створа. Однако, при наличии в БЭК источников отражений на соответствующих им углах визирования могут наблюдаться гармоники пространственного спектра. Возможность локализации углового направления на источники помехи предоставила возможность дифференцирования погрешностей измерений формы ДН в зависимости от угла в соответствии с (3).

Анализ характеристик радиоколлиматора с консольной установкой осветительных ламп в БЭК

Осветительные лампы с консольным креплением часто являются доминирующими источниками многолучевых переотражений в отечественных безэховых камерах (наряду с датчиками дыма). В России БЭК имеют статус производственных помещений, из-за чего на них накладываются нормы по освещенности. К сожалению, при задании таких требований редко учитывается тот факт, что большая часть БЭК не требует присутствия персонала, что делает применение к ним строгих норм освещенности не только необязательным, но и вредным. Изготовители БЭК часто вынуждены вешать потолочные осветительные лампы ниже уровня кромок радиопоглощающего материала (РПМ). Примеры консольного крепления осветительных ламп на потолке БЭК показаны на рис. 1.

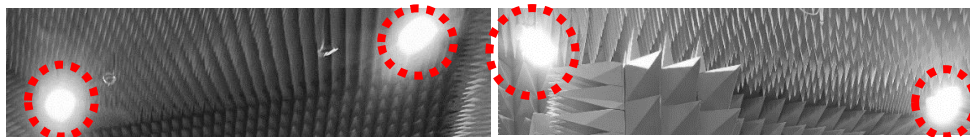


Рис. 1. Примеры консольного крепления осветительных ламп в БЭК

Применим представленные в разделе выше методы анализа для оценки многолучёвости в БЭК радиоколлиматора с симметричным расположением облучателя рефлектора и тихой зоной $\varnothing 0,75$ м. В БЭК этого АИК осветительные лампы были закреплены консольным способом. На рис. 2 пунктиром показаны горизонтальные сечения АФР через центр тихой зоны на частоте 15,2 ГГц, измеренные в сборочном цеху «Радиолайн» перед отправкой радиоколлиматора Заказчику, а сплошными

линиями – измеренные в БЭК на месте эксплуатации в процессе испытаний.

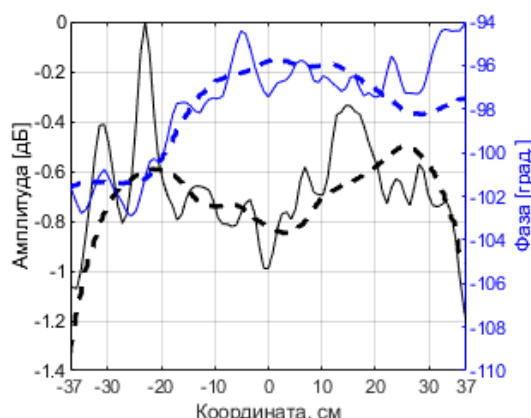
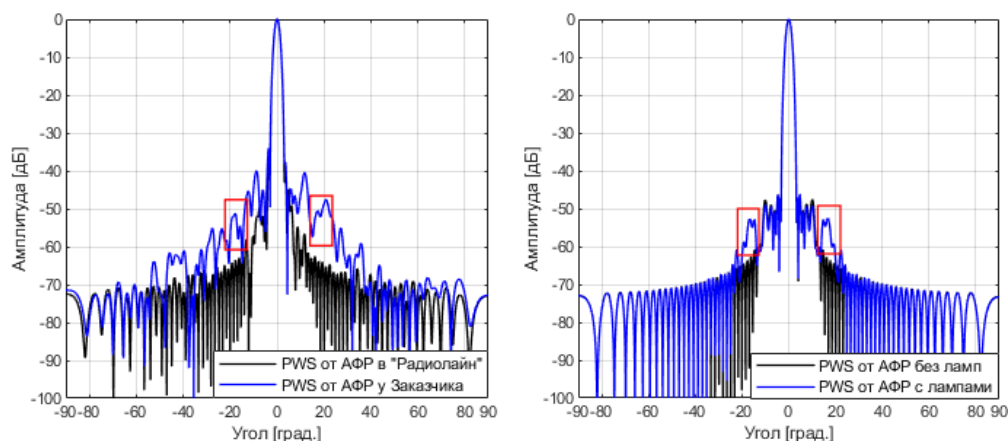


Рис. 2. Горизонтальные сечения АФР в тихой зоне на частоте 15,2 ГГц, измеренные в цеху «Радиолайна» (пунктирные линии) и на месте эксплуатации (сплошные линии) (чёрные кривые – амплитуда, синие – фаза)

Можно видеть, что при измерениях в БЭК в АФР появились дополнительные искажения – высокочастотные биения. Анализ измеренного АФР показал, что в БЭК Заказчика имеются нестандартные источники рассеяния, которые приводят к девиациям АФР от ожидаемого. Определим угловые направления на возможные источники рассеяния по АФР с рис. 2, воспользовавшись (1). Результат расчета спектра плоских волн показан на рис. 3а).

На рис. 3а) хорошо заметно изменение уровня помех в худшую сторону в БЭК Заказчика по сравнению с цехом «Радиолайна». Общим местом являются боковые лепестки в районе $\pm 10^\circ$ – результат рассеяния кромками рефлектора. Обращают на себя внимание сигналы с направлений около 20° в спектре из БЭК (выделены красными прямоугольниками на рис. 3а), которые отсутствовали ранее. Сопоставление полученных результатов с особенностями конструкции БЭК указывало, что источником переотражений являются светильники консольной установкой ниже уровня потолочного РПМ. Для подтверждения этой гипотезы было проведено электродинамическое моделирование АФР в тихой зоне АИК для случаев с отсутствием и наличием осветительных ламп без учета засветки тихой зоны облучателем. В качестве макета лампы использована усеченная призма без основания из идеального проводника. Углы наклона ламп примерно соответствовали смонтированным в БЭК.



а) по измеренным АФР

б) по модельным АФР

Рис. 3. Нормированные спектры плоских волн, рассчитанные из горизонтальных сечений АФР в тихой зоне на частоте 15,2 ГГц

Результат моделирования подтвердил верность гипотезы. Результаты расчетов спектров плоских волн по модельным АФР показаны на рис. 3б) где двумя красными прямоугольниками показаны гармоники спектра из-за наличия ламп. Смоделированные АФР на плоскости в тихой зоне наглядно демонстрируют искажения, возникающие из-за наличия ламп (рис. 4).

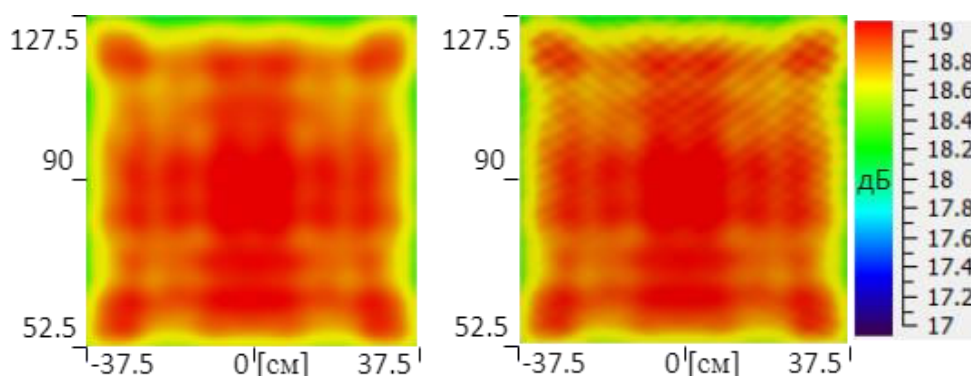


Рис. 4. Результаты моделирования амплитудного распределения на плоскости в центре тихой зоны на частоте 15,2 ГГц без ламп (слева) и с лампами (справа)

Для исследования влияния источников рассеяния в различных рабочих диапазонах частот, а также исключения ложных суждений из-за возможных интерференционных резонансов на отдельно взятой частоте, представленный выше анализ и расчеты проведены на нескольких частотах. Вклад светильников в погрешность измерений ДН в угловых направлениях около 20° оценим по уровню минус 30 дБ в соответствии с (3). Оценки для результатов моделирования и измерений представлены на рис. 5. Для

смоделированных АФР без ламп погрешности находятся, чем с ними на $\approx 0,2$ дБ. Оценки по измеренным АФР (рис. 5б) также демонстрируют разницу в значениях погрешностей на $\approx 0,4$ дБ.

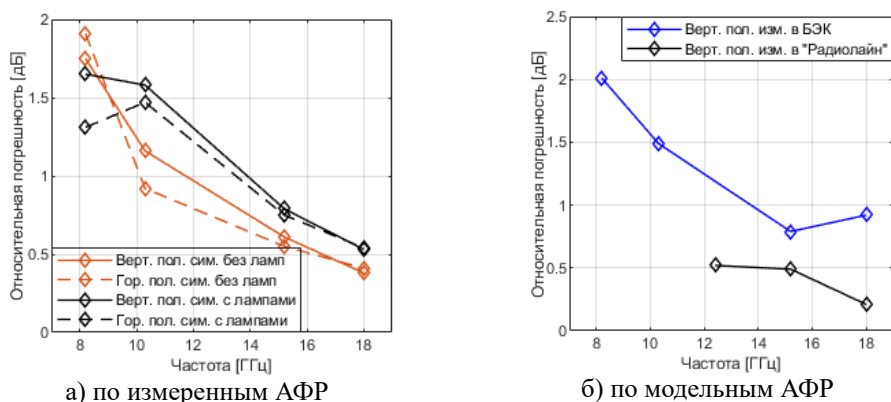


Рис. 5. Относительные погрешности измерений амплитудных ДН на уровне минус 30 дБ для углов около 20°

Полученные оценки погрешностей по результатам моделирования и измерений хорошо согласуются друг с другом. По полученным результатам можно однозначно определить наличие вклада внесённых источников переотражений в изменение АФР. Имеющиеся расхождения полученных результатов могут объясняться разными условиями измерений до и после монтажа радиоколлиматора на место эксплуатации, и главное, простотой используемой электродинамической модели. Использование более детальных электродинамических моделей влечёт за собой чрезвычайное увеличение требуемых вычислительных ресурсов. По этой причине, как и при проектировании антенных систем, на финальном этапе создания радиоколлиматора невозможно обойтись без экспериментальных проверок. Тем не менее, представленные результаты свидетельствуют о целесообразности применения электродинамического моделирования для исключения грубых ошибок проектирования.

Заключение

В работе показано, что результаты электродинамического моделирования АИК на базе радиоколлиматоров хорошо согласуются с результатами измерений. На примере радиоколлиматора с тихой зоной $\emptyset 0,75$ м дана оценка влияния установки осветительных ламп на погрешность измерений, что подчёркивает чувствительность метрологических характеристик АИК к расположению инженерного оборудования БЭК. Электродинамическое моделирование безэховой

камеры с АИК является чрезвычайно ресурсоёмкой задачей. Однако, предложенный подход, основанный на электродинамическом моделировании упрощённых моделей радиоколлиматоров позволяет получать оценки влияния основных конструктивных элементов внутри БЭК на метрологические характеристики комплекса и оптимизировать их конфигурацию.

Литература

1. Коротецкий Е.В., Тамарис И.Ю. Проектирование и измерения рефлектора коллиматора со скругленными кромками и габаритными размерами 6 x 6 м // *Антенны*. – 2023. – № 1(281). – С. 78-85.
2. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007. 51 с.
3. Parini C.G., Dubrovka R., Gregson S.F. CATR quiet zone modelling and the prediction of “measured” radiation pattern errors // *AMTA*. 2015.
4. Hansen J.E. Spherical near-field antenna measurements. London: IET, 2008. 48 p.
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. 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.
7. Liu X., Quan S. Spatial and angular domain simulation of the feed spillover in compact antenna test range // *9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*. IEEE. 2010. P. 159–162.
8. Коротецкий, Е. В. Оценка радиотехнических характеристик коллиматорных стендов для измерений антенн / Е. В. Коротецкий // *Антенны и распространение радиоволн: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года*. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2024. – С. 65-69.
9. Титаренко А.В., Озеров М.А. Особенности испытаний антенных измерительных комплексов коллиматорного типа // В книге: *Метрология в радиоэлектронике. Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции*. Менделеево, 2023. С. 99-104.