

И. М. Малай*,

доктор технических наук, доцент;

М. А. Озеров*,

А. В. Титаренко*,

кандидат технических наук

* ВНИИФТРИ, п. Менделеево Московской обл.

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО МОНОСТАТИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Изложены основные результаты проектирования и изготовления радиолокационного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора. Особенностью комплекса является моностатическая схема излучения и приема электромагнитного поля, функционирующая в широкой полосе частот. Приведено описание использованных технических и методических решений по обеспечению высокой точности измерений и чувствительности системы при измерениях низких значений ЭПР.

Ключевые слова: радиоколлиматор, радиолокационное изображение, эффективная площадь рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов создания объектов радиолокационного наблюдения является подтверждение задаваемых при проектировании характеристик радиолокационного рассеяния. Для решения этой задачи даже в настоящее время недостаточным является только вычислительных методов электродинамики и необходимо использование специализированных рефлектометров. Примером одного из наиболее универсальных решений для испытаний среднеразмерных объектов являются рефлектометры на основе радиоколлиматоров по сути представляющие из себя специализированные измерительные комплексы. Такие комплексы, несмотря на известные достоинства, имеют ряд функциональных и технических ограничений. В работе изложены результаты исследований особенностей радиоколлиматорных систем, оказывающих ключевое влияние на их метрологические характеристики.

Для радиолокационного измерительного комплекса можно выделить следующие основные технические и метрологические характеристики:

- диапазон рабочих частот;
- линейные размеры рабочей зоны;
- эквивалентный уровень помех;
- минимальная измеряемая ЭПР;
- погрешность измерений интегральной ЭПР и ЭПР локальных центров рассеяния.

Принципы и примеры проектирования радиоколлиматоров или компактных полигонов для антенных измерений широко описаны в литературе. Однако их применению для измерений характеристик рассеяния объектов уделено меньше внимания как более узкой области и ввиду их общей закрытости. Наиболее полно подходы к созданию компактных полигонов для измерений характеристик рассеяния изложены в [1]. Но достижение высокого уровня технических и метрологических характеристик требует детальной проработки каждого элемента измерительной системы.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ РАДИОКОЛЛИМАТОРА

При проектировании радиоколлиматорного комплекса ФГУП «ВНИИФТРИ» решалась задача создания прецизионного инструмента для антенных и радиолокационных измерений, обладающего широкими функциональными возможностями. Хотя известны примеры ис-

пользования радиоколлиматоров на основе диэлектрических линз, наибольшее распространение получили радиоколлиматоры на основе металлических зеркал следующих видов:

- однозеркальные со скругленными краями;
- однозеркальные с зубчатыми краями;
- двузеркальные с зубчатыми краями.

Все они отличаются только видом используемых коллиматорных зеркал. Характеристики радиоколлиматоров оцениваются по равномерности амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля в рабочей зоне и уровню кроссполяризации. Зеркало со скругленными краями при прочих равных позволяет получить более равномерное поле в рабочей зоне, что приводит к меньшим погрешностям измерений [2]. К сожалению, технология его изготовления сложнее, что обуславливает существенно большую стоимость в сравнении с аналогичным зеркалом с зубчатыми краями. Зеркала с зубчатыми краями проще в изготовлении, но обеспечивают несколько худшие характеристики. Эксплуатируемые в настоящее время в России коллиматорные комплексы используют в своем составе зеркала с зубчатыми краями и характеризуются достаточно высоким уровнем точностных характеристик. Большинство из них обеспечивает размеры рабочей зоны диаметром от 1,8 до 2,4 м. Поскольку задачей проектирования было создание комплекса, претендующего на роль «эталонного», был выбран вариант конструкции со скруглением кромок.

В качестве основы создаваемого измерительного комплекса было выбрано был выбран радиоколлиматор, имеющий зеркало со скругленными краями и обеспечивающий рабочую зону диаметром 3 м при габаритах вырезки параболоида 6×6 м (рис. 1). Зеркало имеет боковую схему облучения и фокусное расстояние 9,7 м. По результатам оптических измерений СКО отклонения профиля зеркала от заданного составило 30 мкм. Размеры специально спроектированной безэховой камеры соответствуют удвоенным габаритам зеркала. Совокупность указанных факторов обусловила хорошие параметры однородности поля в рабочей зоне.

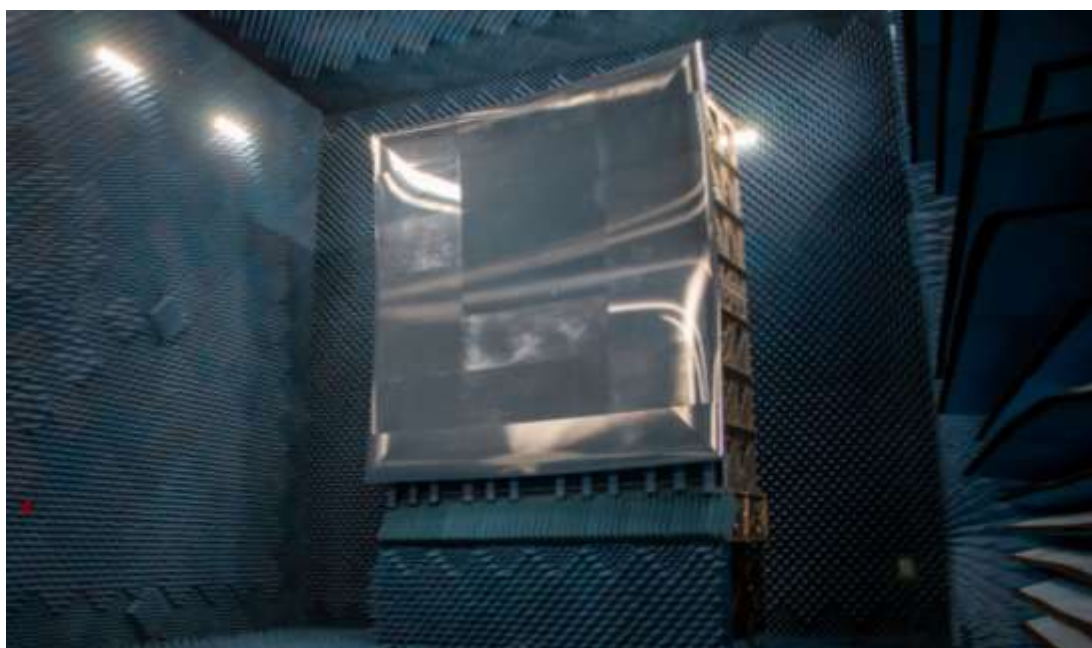


Рис. 1. Зеркало радиоколлиматора со скругленными краями

Результаты измерений АФР в рабочей зоне начиная с S -диапазона можно обобщить следующим образом:

- полная неравномерность амплитуды не более 1,0 дБ, амплитуда огибающей 0,6–0,8 дБ;
- амплитуда вариаций фазы (без учета единичных выбросов) составляет $1^\circ/10$ ГГц свыше 10 ГГц и не более 2° до 10 ГГц.
- уровень кроссполяризации не хуже минус 28 дБ.

Для оценки интегральных характеристик погрешностей измерений используется обобщенный критерий – эквивалентный уровень помех (ЭУП) [3]. Для оценки ЭУП исходя из полученных характеристик равномерности поля в рабочей зоне применяется Фурье-анализ [3]. На рис. 2 представлены результаты расчета ЭУП, полученные путем анализа АФР на плоскости с размерами 2,4×1,2 м. Отсчет направления на источник помехи осуществляется из центра рабочей зоны. Наибольшее значение помехи составило минус 67 дБ, что обуславливает превосходные точностные характеристики при исследованиях направленных свойств излучения антенн и рассеяния объектов.

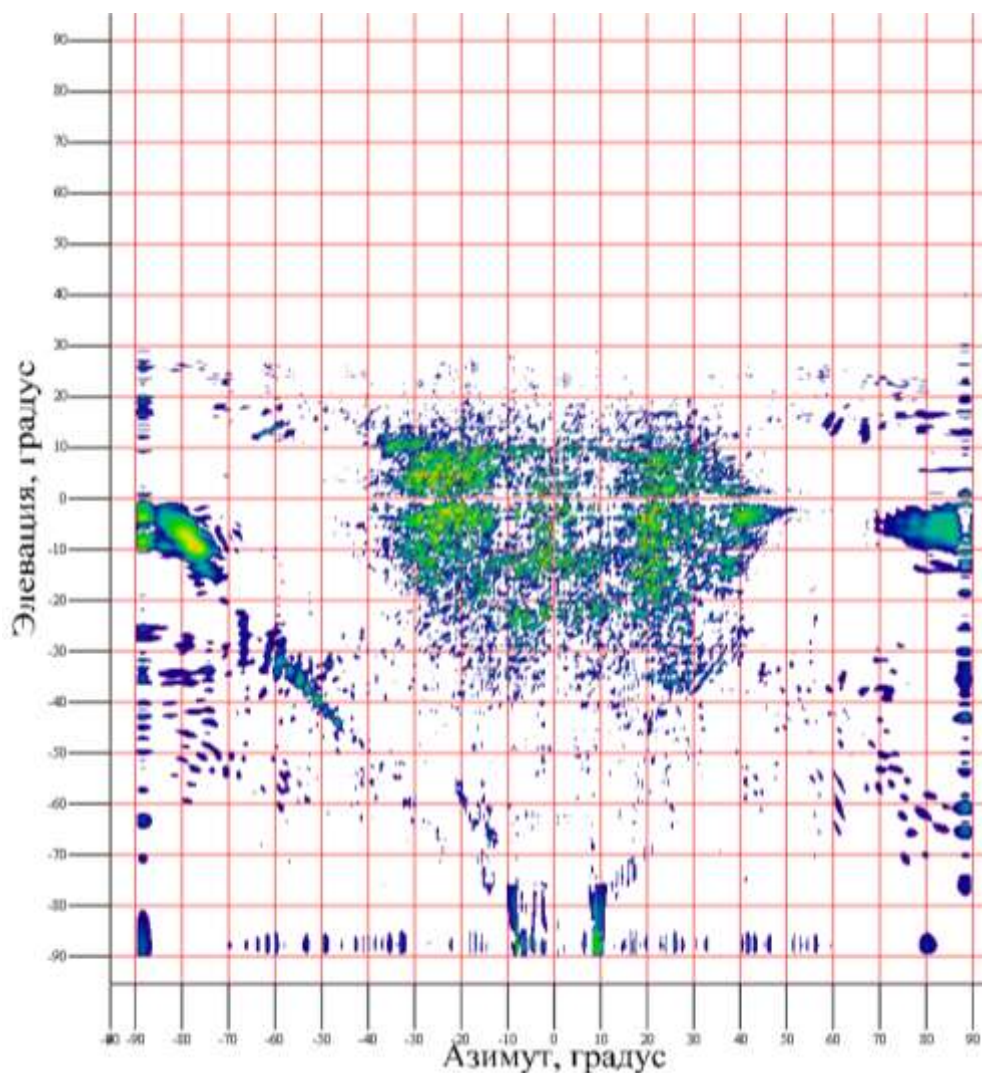


Рис. 2. Угловой спектр помеховых сигналов на частоте 10 ГГц в диапазоне от -65 до -95 дБ

Одной из ключевых особенностей комплекса в режиме измерений характеристик рассеяния объектов является применение моностатической схемы излучения и приема электромагнитных полей. Главным преимуществом данной схемы является отсутствие необходимости учета бистатического угла между приемной и передающей антеннами, а также отсутствие связанных с ним искажений АФР. Кроме того, возможно использование одного комплекта облучателей радиоколлиматора для измерений радиотехнических характеристик антенн и рассеивающих свойств объектов. Однако применению моностатической схемы препятствует сложность обеспечения высокого энергетического потенциала измерительной системы, недостаток которого может ограничивать нижнюю границу измеряемой ЭПР.

ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ШИРОКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ЭПР

Диапазон измерений ЭПР, в первую очередь, его нижняя граница определяется следующими основными факторами:

- свойствами используемой безэховой камеры;
- временной стабильностью характеристик приемо-передающей системы;
- энергетическим потенциалом приемо-передающей системы;
- применяемыми методами обработки сигналов.

При создании безэховой камеры был использован радиопоглощающий материал «Штиль-100х» плоской, пирамидальной и клиновидной формы. На большей части площади камеры использован пирамидальный поглотитель с высотой пирамид от 30 до 70 см. Для уменьшения уровня фоновых отражений в рабочей зоне часть стен облицована клиновидным РПМ с высотой от 40 до 70 см.

Основная часть фоновых отражений исключается за счет используемых методов обработки, включающих в себя:

- аппаратное стробирование сигналов;
- комплексное вычитание (компенсация) фоновых сигналов;
- математическое стробирование сигналов.

Аппаратное стробирование реализовано на базе встроенного в векторный анализатор цепей (ВАЦ) импульсного модулятора основная задача которого состоит в режекции сигналов передатчика, затекающих в приемный тракт минуя антенну и отраженных от тракта антенны. Эффективность затвора модулятора составляет более 80 дБ (рис. 3).

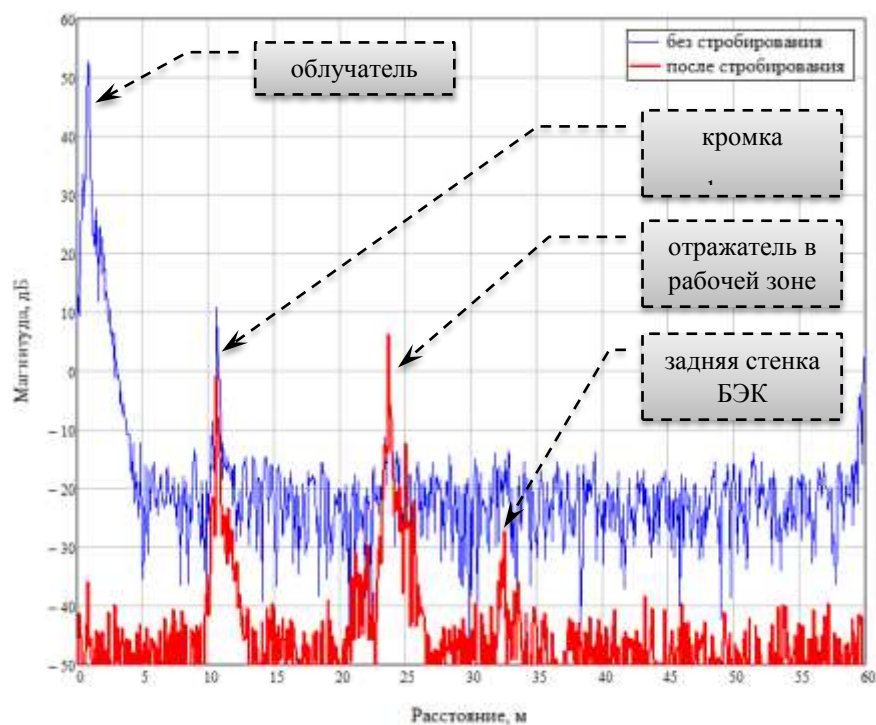


Рис. 3. Дальностной портрет комплекса в диапазоне частот 44–46 ГГц до компенсации фона (ЭПР отражателя в рабочей зоне около 10 м²)

Временная стабильность характеристик приемо-передающей системы обеспечивает возможность компенсации фоновых сигналов путем регистрации сигналов в «пустой» рабочей зоне для их вычитания из сигналов, зарегистрированных при наличии объекта испытаний. Комплексное вычитание обеспечивает уменьшение уровней фоновых сигналов на 40–60 дБ

в зависимости от частоты и характеристик используемого векторного анализатора цепей. В рассматриваемом комплексе стабильность ВАЦ обеспечивает эффективность компенсации 55–60 дБ, что обеспечивает подавление помеховых сигналов как от антенно-фидерного тракта, так и от окружающего пространства.

Математическое стробирование в зависимости от имеющегося набора исходных данных может быть выполнено в одно-, двух- или трехмерном пространстве для режекции оставшихся фоновых сигналов и вторичных переотражений из-за внесения объекта испытаний.

В миллиметровом диапазоне длин волн минимальная измеряемая ЭПР может быть обусловлена не остаточным уровнем фона, а энергетическим потенциалом приемо-передающей системы. Коэффициент отражения A на длине волны λ от объекта с ЭПР σ , размещенного на расстоянии R от фазового центра антенны с коэффициентом усиления G можно определить по формуле

$$A = \frac{\sigma}{(4\pi)^3} \left(\frac{G\lambda}{R^2} \right)^2.$$

Для компактного полигона расстояние R принимается равным фокусному расстоянию используемого рефлектора. На рис. 4 приведена расчетная зависимость ослабления сигнала для разработанного комплекса при измерении ЭПР равной -50 дБ [отн. 1 м²]. Как видно из графика, обеспечение такой фоновой ЭПР, обусловленной шумами измерительной системы, требует энергетического потенциала измерительной системы до 145 дБ.

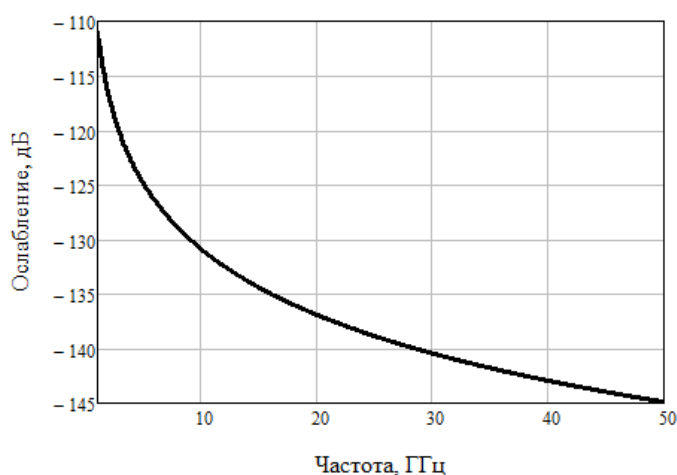


Рис. 4. Частотная зависимость ослабления сигнала при измерении ЭПР, равной -50 дБ [отн. 1 м²]

Характеристики самых совершенных из существующих ВАЦ не позволяют добиться таких значений при измерениях в «однопортовом» режиме уже на частотах в десятки гигагерц из-за совокупности факторов – снижения чувствительности приемников, уменьшения мощности передатчиков, малых значений направленности измерительных портов, собственных потерь в тракте. Поэтому для подключения облучателей была использована оригинальная схема выносных ответвителей сигнала, подключаемых непосредственно к приемникам и передатчикам ВАЦ. В каждом рабочем поддиапазоне частот используется комплект из двух выносных ответвителей для одновременной работы на ортогональных линейных поляризациях. Совокупность аппаратных и методических решений обеспечила чувствительность измерительной системы до уровня не хуже -50 дБ [отн. 1 м²] при работе в полосах частот облучателей радиоколлиматора с приемлемой скоростью измерений.

Широкий динамический диапазон измерений ЭПР и однородное электромагнитное поле в рабочей зоне комплекса обеспечивают возможность измерений характеристик рассеяния объектов с высокой точностью и пространственным разрешением. Программно-

алгоритмическое обеспечения, разработанное ФГУП «ВНИИФТРИ», обеспечивает возможность синтеза двумерных и трехмерных радиолокационных изображений, их анализ, а также приведение к единице ЭПР [4]. Пример синтезированного радиолокационного изображения тестового объекта для проверки разрешающей способности показан на рис. 5. Расстояние между цилиндрами на тестовом объекте в удаленных парах составляло примерно 15 и 30 мм.

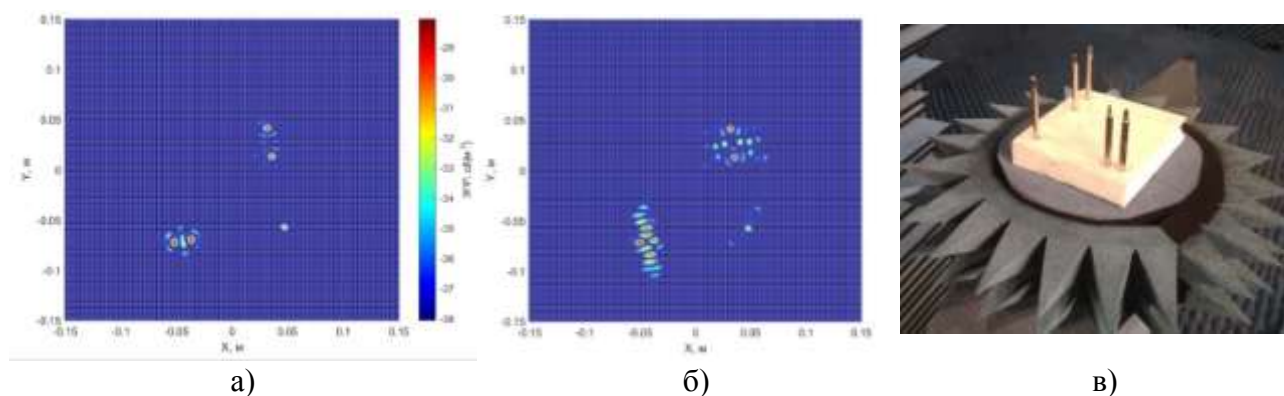


Рис. 5. Пример двумерного радиолокационного изображения тестового объекта для полосы частот 8–12 ГГц и кругового синтеза апертуры:
 а – вертикальная поляризация; б – горизонтальная поляризация;
 в – фотография тестового объекта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ создан широкополосный рефлектометр для измерений характеристик рассеяния объектов, обеспечивающий чувствительность не хуже -50 дБ [отн. 1 м²]. Впервые в известной практике применена моностатическая схема измерений, обеспечивающая высокую чувствительность в широкой полосе частот и одновременную работу на двух ортогональных линейных поляризациях. Разработанный рефлектометр обеспечивает возможность решения широкого спектра задач по исследованию рассеивающих свойств объектов с высокой точностью.

Список используемых источников

1. Балабуха Н. П., Зубов А. С., Солосин В. С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / под общ. ред. Н. П. Балабухи. – М.: Наука, 2007. – 266 с.
2. Lee T.-H., Burnside W. D. Performance Tradeoff Between Rolled and Serrated Edge // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 44, № 1.
3. Wayne D., Fordham J., McKenna J. Effects of a Non-Ideal Plane Wave on Compact Range Measurements // Antenna Measurements Techniques Association: Proceedings. – 2014.
4. Озеров М. А., Титаренко А. В. Градуирование радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния // Радиотехника. – 2014. – № 12. – С. 10–16.