

УДК 621.396

ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ НА МОБИЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

А. Н. Громов, В. А. Золотарев, В. М. Олейник, П. Н. Скоков

Центральный научно-исследовательский институт ВВКО Минобороны России,
141091, Москва

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2019 г.

Аннотация. Проведено исследование возможности использования мобильной широкополосной радиолокационной измерительной установки на базе векторного анализатора цепей для получения радиолокационных характеристик объектов и отработки алгоритмов формирования и фокусировки их двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений в полунатурных и натуральных условиях.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование, векторный анализатор цепей, радиолокационные характеристики, эффективная площадь рассеяния, инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения.

Abstract. This paper is devoted to the experimental research of using a wideband radar measuring set based on a vector network analyzer in order to provide radar cross section measurements and inverse synthetic aperture imaging in semi-naturals and naturals conditions. Modern vector network analyzers provides wideband measurements at the range 10 Mhz ... 67 Ghz in continuous and pulse modes with up to 32000 fixed frequency points. Electronic calibration module allows low error of magnitude (0.01 dB) and phase (0.1°) measurements with high dynamic range (up to 130 dBm) and noise level which does not exceed -120 dBm. Vector network analyzer has integrated operational system and obtain user to control experiment in real time. All this makes it possible to create a compact movable wideband radar measuring set based on VNA with the necessary options. The analyzer and control computer are located in a mobile cabin with power generator. Two parabolic antennas (transceiver 2.4 meters diameter and receiver 1.2 meters diameter) are mounting on the roof of the

cabin. Each of the antennas is equipped with the twin-polarized horn irradiator KIR 5800 DR, which operates at the frequency 4.5...7.5 GHz. The Dahua SD6AL240-HNI camera is mounting between two antennas for monitoring the object during an experiment time. The unmanned aerial vehicle is used to check antennas directional diagram. As the result, we define requirements and give recommendations of the radar measuring set parameters, and also propose a method of the experiment with an object moving along an arbitrary trajectory.

Key words: radar measuring set, vector network analyzer, radar cross section, inverse synthetic aperture, radar images.

В последние десятилетия разработчики различных радиотехнических устройств в качестве измерительной аппаратуры всё чаще стали использовать векторные анализаторы цепей [1,2]. Они работают в широкой полосе частот от 10 МГц до 67 ГГц в непрерывном и импульсном режимах, обеспечивая до 32000 измерительных точек. Модуль электронной калибровки обеспечивает точность измерения амплитуды поля до 0,01 дБ, фазы – до $0,1^{\circ}$. Динамический диапазон на измерительных портах достигает 130 дБ при уровне собственных шумов до -120 дБм. Анализаторы имеют интегрированную операционную систему, что обеспечивает пользователей средствами управления непосредственно в устройстве.

Разумное использование возможностей векторного анализатора позволяет на его базе, с добавлением необходимых блоков и устройств, создавать простые, компактные и мобильные радиолокационные измерительные комплексы, предназначенные для оценки в широкой полосе частот радиолокационных отражательных характеристик объектов исследования в полунатурных и натуральных условиях.

Целью данной работы было исследование возможностей использования радиолокационной измерительной установки на базе векторного анализатора цепей для получения радиолокационных характеристик объектов и отработки алгоритмов формирования и фокусировки двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений в полунатурных и натуральных условиях.

Для достижения цели была смонтирована мобильная широкополосная радиолокационная измерительная установка на базе векторного анализатора цепей, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Широкополосная радиолокационная измерительная установка на базе векторного анализатора цепей.

Векторный анализатор и дополнительная аппаратура установки размещены в передвижной кабине типа КУНГ, снабжённой автономным электрогенератором. На крыше кабины установлены две зеркальные антенны, передающая с раскрывом 2,4 м и приёмная с раскрывом 1,2 м. В качестве облучателей зеркальных антенн использованы два двухполяризационных рупорных облучателя KIR 5800 DR (рис.2), работающие в частотном диапазоне от 4,5 до 7,5 ГГц. В данном частотном диапазоне совместная работа этих антенн обеспечивает ширину диаграммы направленности (ДН) порядка 2^0 и создаёт на дальности 500 м измерительную зону размером 15...17 м по уровню 3 дБ. Поскольку выходная мощность векторного анализатора в штатном режиме работы не превышает 10 дБм, что не обеспечивает работу на расстоянии свыше 50 м, он был дополнен усилителем мощности с усилением 20 дБ. Это позволило получить в антенне мощность сигнала до 1 Вт и проводить измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов с уровнями порядка $0,01 \text{ м}^2$ и выше.

На установке реализован режим поимпульсной перестройки частоты

зондирующего сигнала в задаваемой полосе частот. При необходимости частотный диапазон мобильного комплекса может быть изменён оперативной установкой рупорных облучателей требуемого диапазона. При этом необходимо учитывать последующее изменение ширины ДН антенной системы и соответствующие изменения размера измерительной зоны и минимальных уровней измеряемой ЭПР.



Рис. 2. Двухполяризационные рупорные облучатели KIR 5800 DR и антенные системы.

Между антеннами на крыше кабины установлена видеочкамера Dahua SD6AL240-HNI (рис.3). Координатные данные камеры используются для наведения антенн в требуемую рабочую точку, а при проведении исследований камера обеспечивает визуальный контроль за положением и движением объекта.



Рис. 3. Видеочкамера Dahua SD6AL240-HNI.

Технические возможности векторного анализатора, при его использовании в качестве радиолокатора, требуют работы в квазинепрерывном режиме (для дальности 500 м, например, длительность излучаемого импульса должна быть не менее 3,4 мкс). В конкретных условиях измерений в сигнале, полученном от исследуемого объекта, присутствуют дополнительные составляющие – фон местности и шум приёмного устройства векторного анализатора. Для обеспечения возможности измерения минимальных уровней ЭПР желательно снизить уровень шума приёмного устройства векторного анализатора до значений, меньших уровня фона местности. Этого можно достичь увеличением длительности импульса и соответствующим уменьшением ширины полосы фильтра промежуточной частоты приёмного устройства векторного анализатора. Обычно фон местности становится доминирующим при длительностях импульса 50...100 мкс.

Для выделения полезного сигнала из импульса такой длины используется метод частотно-временных преобразований [2]. Принятый приёмным устройством спектр сигнала подвергается обратному преобразованию Фурье и переводится во временную область. Стробированием во временной области выделяется отражённый от объекта сигнал. Применив преобразование Фурье этого сигнала, получаем спектр отраженного от объекта сигнала.

При необходимости уточнения или контроля ширины диаграммы направленности антенной системы измерительной установки используется квадрокоптер, к которому на тонкой нити подвешивается и поднимается в предполагаемый рабочий объём металлическая сфера диаметром 20...30 см. Длина нити должна обеспечивать угловое разрешение квадрокоптера и сферы для данной антенной системы.

Последовательно перемещая сферу в рабочем объёме по азимуту с шагом 1...2 м и регистрируя сигнал в каждой точке, получают данные для построения ДН антенной системы по азимуту. Аналогично определяют ДН по углу места. По полученным данным определяют размеры рабочего объёма измерительной установки по уровню 3 дБ или 6 дБ. Вид получаемой ДН по азимуту

проиллюстрирован на рис.4.

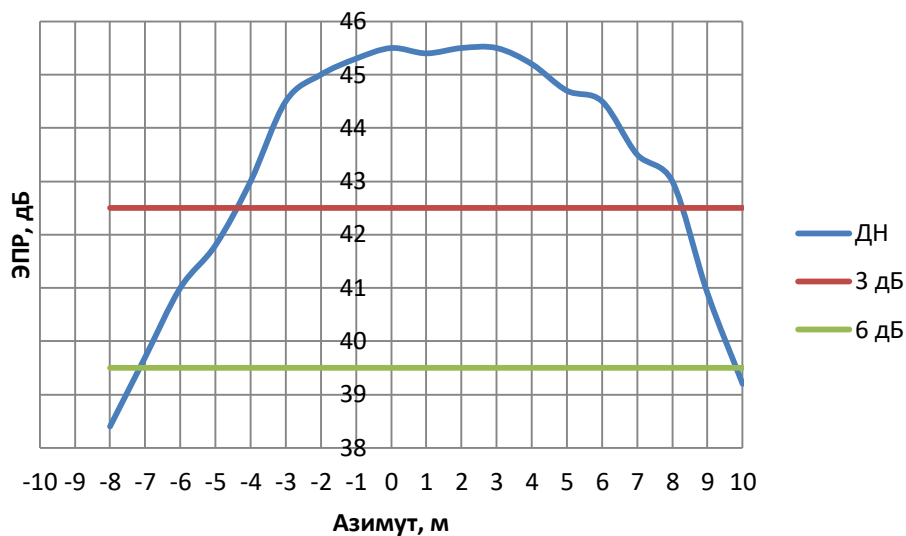


Рис. 4. Пример получаемой диаграммы направленности по азимуту.

Для получения ЭПР исследуемого объекта в м² необходимо выполнить операцию калибровки измерительного тракта. Для этого с помощью квадрокоптера в рабочий объём поднимают эталонный сферический отражатель с известным значением ЭПР в заданной полосе частот и по значению полученного отклика вычисляют калибровочный коэффициент.

Кроме получения характеристик ЭПР, мобильный комплекс позволяет накапливать данные для построения радиолокационных изображений (РЛИ) объектов. При этом векторный анализатор работает в режиме поимпульсной перестройки частоты зондирующего сигнала в полосе 5...7 ГГц.

На мобильном комплексе реализован алгоритм формирования двумерных РЛИ объектов методом инверсного синтезирования апертуры [3].

Оценим параметры, необходимые для корректной работы алгоритма при дальности до объекта $R = 500$ м, ширине полосы излучения зондирующего сигнала $B = 2$ ГГц и длительности импульса 50 мкс.

Условие однозначности по дальности выполняется при шаге по частоте зондирующего сигнала

$$\Delta f = \frac{c}{2R} = 0,3 \text{ МГц}.$$

Число дискрет частоты в указанной полосе $N = 6666$. Для применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье это число необходимо увеличить до кратного степени двойки, т.е. до 8192. При этом время записи одной пачки излучаемых импульсов при выбранной длительности импульса составит около 400 мс, а разрешение по дальности

$$\Delta_R = \frac{c}{2B} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2 \cdot 10^9} = 7,5 \text{ см}.$$

Разрешение в поперечном направлении для средней длины волны зондирования $\lambda_{cp} = 5 \text{ см}$ и ширины $\Delta\theta$ сектора углов поворота объекта за время синтезирования сигнала размером в половину круга и более составит

$$\Delta_\theta \approx \frac{\lambda_{cp}}{2\Delta\theta} = \frac{5}{2 \cdot \pi} = 0,8 \text{ см}.$$

Окно однозначности в поперечном направлении

$$\Delta r_{az} = \frac{\lambda_{\min}}{2N\omega\Delta t},$$

где λ_{\min} - минимальная длина волны зондирующего сигнала;

ω - скорость вращения объекта;

Δt - период повторения импульсов.

При построении двумерных РЛИ необходима точная привязка радиолокационных данных к углам поворота и единой относительной дальности, которая реализуется, как правило, с помощью использования дополнительного информационного канала, обеспечивающего синхронизированную с радаром передачу данных о параметрах движения объекта.

В стационарном измерительном комплексе координатное сопровождение объекта осуществляется системой датчиков, расположенных на механизме вращения объекта и отслеживающих положение закрепленных на объекте маркеров [4].

В мобильном комплексе, в реальных условиях наблюдения, реализовать точное координатное сопровождение объекта дополнительным

информационным каналом крайне проблематично. В этом случае для компенсации в регистрируемых отраженных от объекта радиолокационных сигналах дополнительных фазовых набегов, возникающих вследствие его относительного движения в процессе наблюдения, предлагается использовать известные алгоритмы итерационной автофокусировки изображений (по частным производным энтропии изображений, минимизации энтропии методом Ньютона, минимизации суррогатной функции, на основе фазового градиента по критериям несмещенного минимального различия, максимального правдоподобия, взвешенной оценки фазы и др. [5]). Однако все известные алгоритмы фокусировки успешно работают в небольших секторах углов наблюдения (несколько градусов) и с относительно малыми перемещениями объекта. Мобильный комплекс позволяет получать радиолокационную информацию, необходимую для совершенствования указанных алгоритмов в направлении расширения сектора углов синтезирования сигнала и компенсации имеющих место в реальных условиях наблюдения больших перемещений объекта за время синтезирования.

Для подтверждения расчётных характеристик мобильной установки был проведён эксперимент по получению РЛИ вращающегося объекта без координатной информации о его положении.

Для подъёма и вращения объекта (эталонного цилиндра с диаметром основания 0,3 м и длиной образующей 2 м) использована подъёмно-мачтовая система и механизм вращения открытого радиолокационного измерительного комплекса. На рис.5 приведено фото цилиндра на рабочей высоте в процессе измерений.

Недостаточность компенсации дополнительных фазовых набегов в силу отсутствия координатной информации о положении объекта приводит к невозможности построения его РЛИ в узких угловых секторах синтезирования (до 20°) вследствие низкого отношения сигнал/фон. При накоплении сигнала в широких угловых секторах отношение сигнал/фон увеличивается и формируемые РЛИ становятся наглядными. Полученные на мобильной

установке двумерные инверсно-синтезируемые РЛИ в секторе углов поворота шириной 180° представлены на рис.6. Палитра цветов от синего до красного иллюстрирует интенсивность откликов от минимума до максимума в единицах ЭПР.



Рис. 5. Объект исследований на подъемно-поворотной системе открытого радиолокационного измерительного полигона.

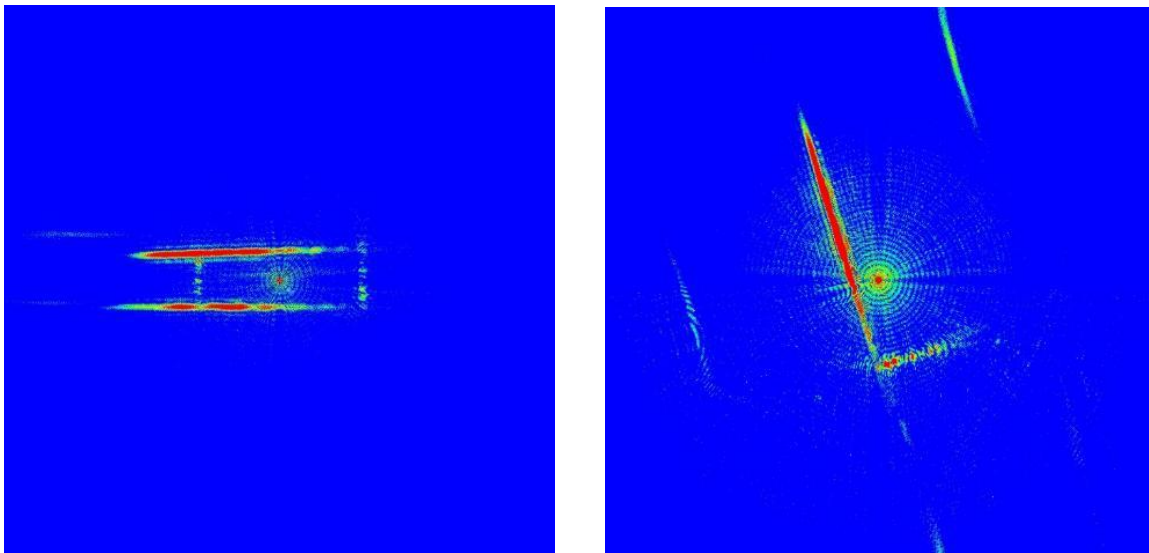


Рис. 6. Экспериментальные инверсно-синтезируемые двумерные радиолокационные изображения цилиндра.

Анализ полученной информации показывает, что формируемые РЛИ объектов имеют большие погрешности геометрической и энергетической метрик. Так, длина и диаметр изображённого на рис.6 объекта значительно отличаются от фактических значений, часть образующей цилиндра смещена за

его пределы, существенные погрешности имеют уровни ЭПР прорисованных центров рассеяния. Из-за отсутствия угловой привязки и выбранного большого количества частотных отсчетов в пачках импульсов сворачиваемый сигнальный массив «пространственных частот» заполняется большим количеством нулей, что после преобразования Фурье приводит к появлению паразитного отклика на «нулевой частоте анализа» (в центре кадра).

Несмотря на отмеченные погрешности, полученные изображения цилиндра подтверждают основные технические характеристики мобильной радиолокационной измерительной установки и возможность её использования для дальнейшей отработки и совершенствования алгоритмов автофокусировки двумерных инверсно-синтезируемых РЛИ объектов.

В тоже время мобильная установка имеет существенный недостаток - большое время записи одного оборота объекта – до 8 минут, что не позволяет набрать достаточного объёма информации для формирования РЛИ объектов с произвольных ракурсов их наблюдения в секторах углов синтезирования шириной до $20...30^{\circ}$.

Для устранения этого недостатка предлагается доработать установку с целью уменьшения времени записи: сократить расстояние до объекта до $70...80$ м, а также расширить ДН антенной системы до $20...30^{\circ}$ путём замены рупорных облучателей на рупорные антенны Пб-125 с использованием соответствующих коаксиальных переходов.

При дальности до объекта 75 м шаг по частоте, обеспечивающий выполнение условия однозначности по дальности, составит 2 МГц. Необходимое число частотных дискрет в полосе излучения составит 1024 , а время записи одной пачки зондирующих импульсов уменьшится до $10...15$ мс.

Для подъёма и перемещения объекта в секторе облучения на необходимой высоте с заданной угловой скоростью предполагается использовать квадрокоптер. Исследуемый объект поднимается в рабочий объём на двух нитях, закреплённых на концах объекта. Чтобы избежать

произвольного вращения объекта, вторые концы нитей крепятся к концам тонкого диэлектрического стержня длиной 1...2м, горизонтально закреплённого на квадрокоптере. Длина нитей должна обеспечивать угловое разрешение объекта с квадрокоптером. Предлагаемая конструкция подвеса позволяет задать произвольную траекторию и скорость движения объекта в рабочем объёме.

Под влиянием ветровых и динамических нагрузок траектория движения объекта будет непредсказуемо отличаться от заданной, искажая тем самым первичную радиолокационную информацию. На этом материале будет проводиться отработка алгоритмов формирования и автофокусировки двумерных инверсно-синтезируемых РЛИ в полунатурных и натуральных условиях.

Таким образом, в рамках данной работы определены требования и даны рекомендации по выбору параметров мобильной широкополосной радиолокационной измерительной установки на базе векторного анализатора цепей. Предложена методика проведения эксперимента с объектом, движущимся по произвольной траектории.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность использования установки для получения радиолокационных характеристик объектов и отработки алгоритмов формирования и фокусировки их двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений в полунатурных и натуральных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

Литература

1. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. Монография / Под ред. Н.П. Балабухи – М.: Наука, 2007.

2. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов. Монография / Под ред. С.В. Ягольников – М.: Радиотехника, 2012.
3. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова – М.: Радиотехника, 2015.
4. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Фокусировка инверсно-синтезированных радиолокационных изображений объектов при измерениях в условиях открытых полигонов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. №.6. [URL:http://jre.cplire.ru/jre/jun16/2/text.pdf](http://jre.cplire.ru/jre/jun16/2/text.pdf).
5. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2018. №.8. [URL:http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf](http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf).

Для цитирования:

Громов А.Н., Золотарев В.А., Олейник В.М., Скоков П.Н. Получение радиолокационных характеристик объектов на мобильной широкополосной измерительной установке. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/7/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.7