

УДК 621.396.677.49

М.О. КОНОВАЛЕНКО, Ю.И. БУЯНОВ*, А.В. ХРИСТЕНКО*****ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК X-ДИАПАЗОНА¹**

Представлено описание стенда, созданного для быстрого и точного измерения и настройки фазового распределения по апертуре антенных решёток речевого радиолокатора X-диапазона. Сформулированы требования на электродинамические параметры стенда для проведения корректных измерений с его помощью. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих его работоспособность.

Ключевые слова: антенная решётка, диаграмма направленности, измерение амплитудно-фазового распределения, фазовый набег, развязка, измерение, настройка.

В недавнее время появились новые современные радиолокационные системы (РЛС), аппаратная часть которых основана на твердотельных технологиях [1, 2]. Такие радары используют зондирующий непрерывный линейный частотно-модулируемый (ЛЧМ) сигнал в X-диапазоне с погрешностью до 5 %, что заметно повышает разрешающую способность. Для получения качественного радиолокационного изображения помимо сложной обработки в приёмном СВЧ и цифровом тракте необходимо обеспечить соответствующую полосу пропускания антенной системы – ширину и положение главного лепестка диаграммы направленности (ДН), уровень боковых лепестков (УБЛ), коэффициент отражения.

В работе [3] приведено описание узконаправленной микрополосковой синфазной антенной решётки (АР) с шириной ДН 1° и УБЛ не более –30 дБ. Для обеспечения таких характеристик направленности амплитудное распределение типа косинус на пьедестале должно быть реализовано с точностью 0.5 дБ, а разброс фазы не превышать 10°. Неизбежные при производстве погрешности изготовления и неточности сборки могут привести к отклонению амплитуды от заданного значения на 1 дБ и более, а разброс фазы может достигать 30°. В этой связи для обеспечения требуемых характеристик, особенно УБЛ ниже –30 дБ, необходимо проводить настройку антенны после её сборки. Процедура настройки заключается в том, что путём изменения электрической длины коаксиальной линии, соединяющей каждую секцию с соответствующим каналом сумматора, подбирается фаза излучения волны на каждом канале с разбросом в интервале не более 7–8°. Это сложная операция, требующая высокой точности измерений и самой настройки, так как на 1 мм длины коаксиальной линии набег фазы составляет 16°. Для серийного производства РЛС с такой антенной системой на базе ЗАО НПФ «Микран» был разработан и отлажен стенд, позволяющий быстро и точно проводить настройку АР, при этом сократив время настройки почти в 4 раза.

Структурная схема такого программно-аппаратного комплекса изображена на рис. 1.

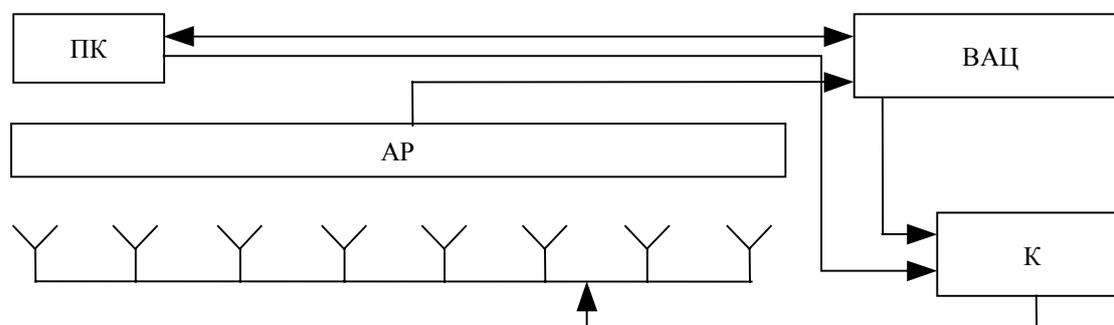


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для настройки антенных решёток: ПК – персональный компьютер, ВАЦ – векторный анализатор цепей, АР – настраиваемая антенная решётка, К – СВЧ-коммутатор

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по контракту № 02.G25.31.0091.

Пирамидальные рупора в количестве 8 единиц соединены параллельно через СВЧ-коммутатор, который состоит из управляемого 8-канального цифро-аналогового равновесного делителя и цифровой платы управления (ЦПУ). В основе делителя лежит 3-дБ мост Вилкинсона, но вместо развязывающего резистора впаяна монолитная интегральная схема (МИС) СВЧ-переключателя, управление которой осуществляется ЦПУ. В свою очередь, ПК управляет платой ЦПУ через интерфейс USB. При этом программное обеспечение ПК управляет СВЧ-коммутатором и считывает/отображает данные, измеренные векторным анализатором цепей. С его помощью поочередно фиксируется модуль амплитуды и значения фазы коэффициента передачи S_{1n} для каждого из n каналов на трёх частотах рабочего диапазона.

Каждый рупор находится напротив центра, образованного пересечением диагоналей соответствующей секции настраиваемой АР. Для исключения влияния на измеренные данные внешней среды пространство, занимаемое раскрывом АР и рупоров, окружено поглощающим материалом толщиной 10 мм, обеспечивающим затухание в X-диапазоне не менее -30 дБ/10 мм.

Основной проблемой при определении необходимого расстояния R между раскрывом АР и рупора является два противоречия. С одной стороны, требуется выполнить засветку каждым рупором всей апертуры секции АР для максимального усреднения измеряемой амплитуды и фазы – для этого нужно увеличивать R . С другой стороны, из-за наличия эффекта засветки рупором соседних секций АР необходимо сокращать R . Измерив фазовое распределение по раскрыву каждой секции в семи опорных точках для более чем 100 экземпляров, было определено, что осцилляции фазы – не более 5° . Такие осцилляции можно считать малозначительными, таким образом, расстояние R между раскрывом АР и рупора выбирается из условия развязки S по амплитуде между $n+1$ каналом АР и n рупором не менее -44 дБ (рис. 2).

Данная теоретическая оценка осложнена тем, что расстояние R попадает в промежуточную зону между ближней и дальней зоной рупора. В нашем случае справедливо соотношение $(R_d - R)100\% / R_d = 10\%$, где R_d – расстояние дальней зоны рупора. Таким образом, в теоретических расчётах можно опираться на приближения дальней зоны и не имеет смысла рассматривать методы ближней зоны [4]. Кроме того, данная работа носит преимущественно практический характер, поэтому все оценки и результаты всегда проверяются эмпирически.

Прямая монохроматическая волна, падающая из n рупора на n секцию, складывается с двумя волнами, пришедшими из соседних секций через сумматор АР в силу достаточно широкой ДН рупора (порядка 22° в E -плоскости). В результате комплексная амплитуда A_0 на выходе АР отличается от амплитуды на выходе секции. Помимо фазовой ошибки α , связанной с наличием засветки соседних секций АР, существуют ошибки вследствие: погрешности измерения векторным прибором; переотражения между рупором и противоположной секцией АР; точности калибровки стенда. С учётом наличия перечисленных ошибок, граничным значением фазовой ошибки принято $\alpha \leq 0.7-0.8^\circ$ (рис. 2). Построив каждый вектор излученной рупором волны на комплексной плоскости и проведя соответствующие вычисления, можно получить следующее выражение для необходимого уровня развязки, зная угол α . $(A_2 A_3) / |A_1| = 20 \log(\operatorname{tg} \alpha) = S$, при этом считается, что векторы A_2, A_3 синфазны (тем самым рассматривается наихудший возможный вариант).

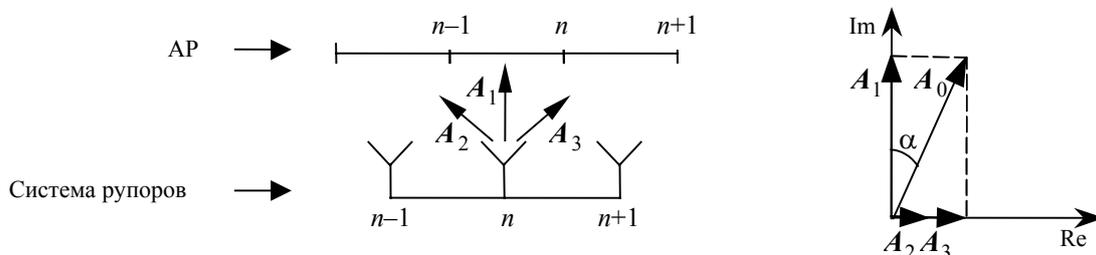


Рис. 2. Пояснение к расчёту необходимого уровня развязки между соседними каналами

При измерении развязки S стоит учитывать, что она изменяется в разных парах соседних каналов в силу того, что схема внутренних переключений СВЧ-коммутатора устроена так, что МИС всегда замыкает ножку на проход мощности в одно плечо делителя и размыкает на другое, направляя часть мощности в согласованную нагрузку. При этом существует 24 комбинации, каждая из которых даёт определённый уровень развязки на каждую пару соседних каналов. Измеренное

значение наихудшего значения развязки S приведено на рис. 3, при этом выбрана оптимальная схема переключений СВЧ-коммутатора. Оптимальной схема считается в том случае, когда развязка между центральными каналами максимальна, так как в силу амплитудного взвешивания в пассивном СВЧ-сумматоре АР мощность на крайних каналах падает на 10 дБ, поэтому априори значение S в паре крайних каналов будет больше, чем в центральных. Кроме того, наибольший вклад в формирование ДН АР вносят центральные каналы с максимальной амплитудой излучения волны, поэтому точность их настройки наиболее важна.

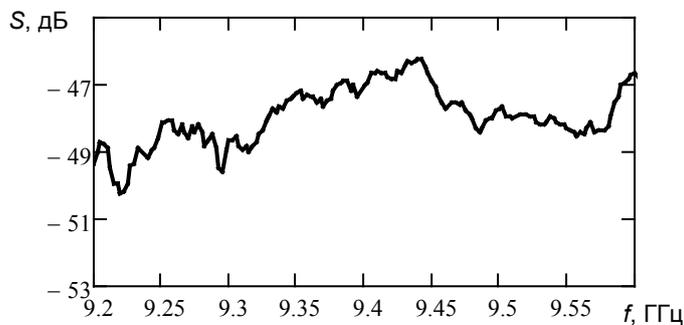


Рис. 3. Измеренный уровень развязки S

Внешний вид измерительного стенда показан на рис. 4. Для обеспечения максимальной точности измерений с помощью описанного стенда, необходимо провести его калибровку, так как несмотря на внешнюю идентичность используемых рупоров, каждый из них отличается по значению коэффициента отражения на входе, значению фазы волны излучения из-за кабельных соединений с СВЧ-коммутатором и прочих электродинамических параметров каждого узла стенда для соответствующего n канала.

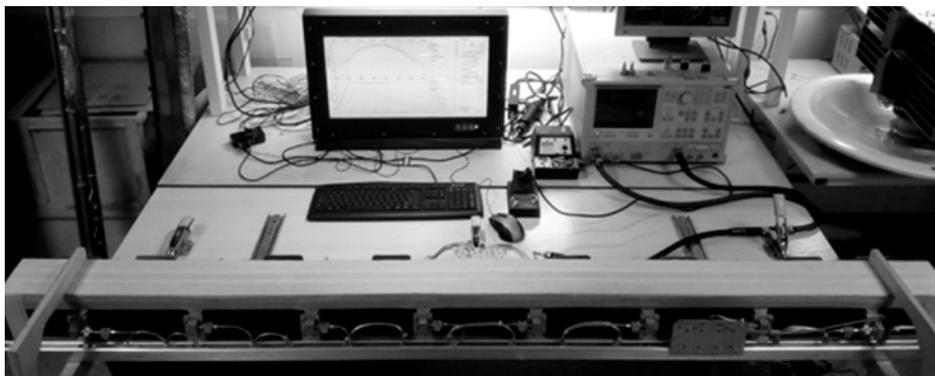


Рис. 4. Вид измерительного стенда (программно-аппаратного комплекса)

Калибровка производится путём измерения амплитуды и фазы волны, излученной каждым n рупором. Затем все полученные данные приводятся к одному выбранному значению амплитуды и фазы путём добавления необходимой разности. Эта разность добавляется в электронную калибровочную таблицу, которая загружается при запуске программы. Таким образом, в цифровом виде производится выравнивание амплитуд и фаз каждого канала. В качестве измерительного зонда выступает отдельно взятая секция АР без внутреннего амплитудного взвешивания. Преимущество такой антенны перед, например, открытым концом коаксиально-волноводного перехода, рупора или диполя с экраном заключается в том, что она полностью повторяет внешние условия, при которых производится непосредственная настройка АР. Любой внешний металлический элемент, расположенный вблизи стенда на расстоянии 20–25 длин волн вносит значительное влияние на измеренные калибровочные данные. В свою очередь, уровень заднего излучения секции составляет –30 дБ, что на 15–20 дБ меньше заднего лепестка ДН перечисленных выше измерительных антенн. Таким образом, отдельная секция АР является наиболее подходящим и простым вариантом измерительного зонда.

Итак, можно сделать следующее заключение: для обеспечения корректной работы программно-аппаратного комплекса необходимо обеспечить уровень развязки S между соседними каналами излучающего n рупора и $n+1$ секции АР не менее –44 дБ, при этом область засветки измеряемой

секции должна быть не менее половины площади её раскрыва. Это позволяет производить фазирование АР с предельной точностью не менее 2° . Весь объём, в котором располагается область распространения радиоволн, должен быть полностью ограничен поглотителем, с показателем затухания не менее -30 дБ, иначе нельзя достигнуть высокой повторяемости настройки с минимальной погрешностью. Важной особенностью при калибровке стенда является то, что следует использовать антенну-зонд с уровнем заднего излучения не более -30 дБ, а также все межмодульные соединения осуществлять с помощью фазостабилизированного коаксиального кабеля, так как в противном случае это приведёт к некорректным измеренным данным, которые в каждой своей реализации будут значительно отличаться друг от друга. Описанный стенд даёт реальную возможность в масштабах серийного производства быстро и точно фазировать линейные антенные решётки X-диапазона, при этом не требуется конечный контроль, при котором непосредственно измеряется ДН АР. Достаточно знать вид полученного амплитудно-фазового распределения по раскрытию АР, чтобы восстановить её ДН, используя преобразование Фурье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко В.В., Носов Д.М., Осипов М.В., Ровкин М.Е., Сурков А.С., Хлусов В.А. // Микроволновые и телекоммуникационные технологии. КрыМиКо 2010: сб. науч. статей. – Севастополь, 2010. – С. 1253–1254.
2. Гюнтер В.Я., Доценко В.В., Носов Д.М., Осипов М.В., Попова Т.Н., Сурков А.С., Хлусов В.А. // Наука и транспорт. – 2012. – № 2. – С. 60–61.
3. Коноваленко М.О., Буянов Ю.И. // Информационно-измерительная техника и технологии: сб. науч. статей. – Томск, 2011. – С. 96–97.
4. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Шифрин Я.С. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: konovalenko_m@sibmail.com

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

E-mail: alekseykhristenko@gmail.com

Поступила в редакцию 27.08.15.

Коноваленко Максим Олегович, аспирант;
Буянов Юрий Иннокентьевич, к.ф.-м.н., доцент каф. радиофизики;
Христенко Алексей Викторович, инженер.

M.O. KONOVALENKO*, Yu.I. BUYANOV*, A.V. KHRISTENKO**

A SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR MEASURING OF PARAMETERS OF THE LINEAR ANTENNA ARRAYS OF X-BAND

The paper describes the stand, designed for fast and accurate measurement and adjustment of the phase distribution over the aperture of the radar antenna arrays of X-band. The requirements for electro-dynamic parameters of the stand for correct measurements are represented. The results of experiments proving its efficiency are shown.

Keywords: antenna array, radiation pattern, measurement of the amplitude-phase distribution, phase shift, microwave isolation, measuring, setting.

REFERENCES

1. Dotsenko V. V., Nosov D. M., Osipov M. V., Rovkin M. E., Surkov A. S., Khlusov V. A. Sudovaya RLS blizhnego obzora s vysokim razresheniem po dalnosti. *Mikrovolnovye i telekommunikacionnye tehnologii. KryMiCo 2010*, sb. nauch. st. Sevastopol, 2010, pp. 1253–1254.
2. Gjunter V. Ya., Dotsenko V. V., Nosov D. M., Osipov M. V., Popova T. N., Surkov A. S., Khlusov V. A. Novye tehnologii v radiolokacii. *Nauka i transport*, 2012, no. 2, pp. 60–61.
3. Konovalenko M. O., Buyanov Yu. I. Mikropoloskovaya antennaya reshetka dlya radiolokatora rechnyh sudov. *Informacionno-izmeritel'naya tehnika i tehnologii*, sb. nauch. st. Tomsk, 2011, pp. 96–97.
4. Bahrah L. D., Kremeneckij S. D., Shifrin Ya. S. *Metody izmereniya parametrov izluchajushchih sistem v blizhney zone*. Leningrad, Nauka Publ., 1985, 272 p.

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

E-mail: alekseykhristenko@gmail.com

Konovalenko Maksim Olegovich, Postgraduate Student;
Buyanov Yuriy Innokent'evich, Ph.D., Ass. Prof.;
Khristenko Aleksey Viktorovich, Engineer.