

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.965

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-2-18-26>

Верификация измерений фазовращателей отражательной антенной решетки

М. Д. Парнес✉

ООО "Резонанс", Санкт-Петербург, Россия

✉info@antennas.spb.ru

Аннотация

Введение. В больших фазированных антенных решетках (ФАР) широко используются оптические схемы возбуждения, основными элементами которых являются облучатель и отражательная апертура, состоящая из нескольких десятков тысяч излучателей и фазовращателей. В отражательных ФАР основные искажения диаграммы направленности происходят за счет фазовых ошибок, приводящих к снижению усиления и росту боковых лепестков. В миллиметровом диапазоне длин волн ферритовые фазовращатели могут иметь начальную фазу от 0 до 360°, поэтому после сборки в решетку необходимо проводить их фазовые измерения.

Цель исследования. Создание способа оценки погрешности измерений параметров фазовращателей в составе антенной решетки на основе сопоставления теоретических положений с экспериментальными данными.

Материалы и методы. Удобным способом определения параметров фазовращателей является использование метода летающего пробника (flying probe), при котором подвижный пробник последовательно соединяется с каждым элементом решетки. Если элемент ФАР представляет собой единую конструкцию из ферритового отрезка и диэлектрического излучателя, то измерения проводят с помощью отрезка круглого волновода, надвигающегося на излучатель. Для проверки погрешности этой схемы измерений используется механически управляемый фазовращатель.

Результаты. Рассчитаны погрешности измерений конструкции с подвижным пробником, исходя из предположения о фазовой ошибке, возникающей из-за векторного сложения управляемого и неуправляемого отраженных сигналов на входе элемента ФАР. Измерены S-параметры стыковочной секции. По экстремумам функции ошибки определены максимальные погрешности измерения фазы и амплитуды.

Заключение. Проведенный анализ показал правомерность выбранного метода оценки погрешности измерений параметров фазовращателей в составе решетки, что определяет перспективы его дальнейшего использования. Погрешность измерений элементов ФАР по предложенной схеме составила около 3°, что соизмеримо с погрешностью регистрирующего прибора.

Ключевые слова: отражательная фазированная антенная решетка, фазовращатели, измерение амплитудно-фазового распределения, сканер

Для цитирования: Парнес М. Д. Верификация измерений фазовращателей отражательной антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 2. С. 18–26. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-18-26

Благодарности. Автор выражает благодарность профессору СПбГЭТУ "ЛЭТИ" И. Б. Вендик и главному метрологу ООО "Резонанс" А. С. Гарбаруку за оказанную помощь в работе над статьей и подготовке ее к печати.

Источник финансирования. Работа выполнена на предприятии ООО "Резонанс".

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.01.2021; принята к публикации после рецензирования 28.02.2021; опубликована онлайн 29.04.2021



Verification of Phase Shifter Measurements of a Reflective Array Antenna

Michael D. Parnes ✉

Company "Resonance Ltd", St Petersburg, Russia

✉info@antennas.spb.ru

Abstract

Introduction. Large-size phased antenna arrays (PAA) frequently incorporate optical excitation schemes, whose main elements include the feed and the reflective aperture. In turn, the reflective aperture consists of several tens of thousands of radiators and phase shifters. Major distortions of the radiation pattern in reflective arrays occur due to phase errors, leading to a decrease in the gain and an increase in the side lobes of the radiation pattern. In the millimeter wavelength range, ferrite phase shifters can have an initial phase from 0 to 360°, thus requiring measurements of the array elements following their assembly.

Aim. To develop a method for evaluating errors in measurements of the parameters of phase shifters incorporated in an antenna array by comparing theoretical and experimental data.

Materials and methods. A convenient method for determining the parameters of phase shifters is probing, in which a movable probe is connected in series with each array element. In cases where a PAA element represents a single structure consisting of a ferrite segment and a dielectric radiator, measurements are carried out using a probe in the form of a segment of a round waveguide moving towards the radiator. In order to evaluate the measurement error of such a scheme, a mechanically controlled reference phase shifter was used.

Results. Measurement errors for the probe structure used were calculated based on the assumption of the phase error arising from the vector addition of the controlled and uncontrolled reflected signals at the input of the PAA element, in the section of the reference plane at the input of the probe. In addition, the S-parameters of the superposition section were calculated. The extrema of the error function were used to determine the maximum errors in measuring the phase and amplitude.

Conclusion. The performed analysis confirmed the validity of the proposed method for measuring the parameters of phase shifters using a waveguide probe. The measurement error of the PAA elements according to the proposed scheme was found to be about 3°, which is commensurate with that of recording devices.

Keywords: phased reflective array antenna, phase shifters, amplitude-phase distribution measurement, measuring probe

For citation: Parnes M. D. Verification of Phase Shifter Measurements of a Reflective Array Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 18–26. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-18-26

Acknowledgments. The author is grateful to Professor ETU I. B. Vendik and chief metrologist of Resonance Ltd A. S. Garbaruk for their assistance in working on the article and preparing it for publication.

Source of financing. The work was carried out using the facilities of the Resonance Ltd enterprise.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Submitted 28.01.2021; accepted 28.02.2020; published online 29.04.2021

Введение. В больших фазированных антенных решетках (ФАР) при соотношениях размера к длине волны более 100 широко используются оптические схемы возбуждения [1–3]. Основными элементами оптической схемы ФАР в миллиметровом диапазоне волн являются облучатель и отражательная апертура, состоящая из нескольких десятков тысяч излучателей и фазовращателей (ФВ) (рис. 1).

После сборки антенных элементов в решетке из ферритовых ФВ необходимо измерить управляющую характеристику каждого ФВ, т. е. зависимость фазы отраженной волны от времени перемещения феррита $\varphi_{\text{изм}}(\tau)$. Вторым важным параметром – начальные фазы коэффициентов передачи элементов, которые могут значительно отличаться друг от друга из-за различий в длине фер-

ритового волновода, что объясняется высокой диэлектрической проницаемостью феррита и конечной точностью его механической обработки. Серийные ферритовые ФВ могут иметь начальную фазу от 0 до 360°. Кроме того, установка в решетку производится с точностью, составляющей заметную долю длины волны, линейные ошибки из-за механического крепления могут достигать 60° в миллиметровом диапазоне [4, 5]. Поэтому измерения фаз коэффициентов передачи элементов решетки нужно проводить после их размещения по месту в апертуре при полной сборке решетки.

Основные искажения диаграммы направленности в отражательных ФАР происходят за счет фазовых ошибок. В [4] показано снижение коэффициента усиления решетки круглой формы диаметром 136λ с фокусным расстоянием 96λ при фазовых ошибках различной величины. Кроме снижения усиления фазовые ошибки приводят к росту боковых лепестков диаграммы направленности и к расширению главного лепестка. Если случайные ошибки фазы во всех элементах большой решетки даже при среднеквадратическом отклонении, равном 45°, влияют незначительно, то систематические ошибки – различия начальных фаз в элементах – весьма существенны. Для большой решетки диаметром $D \geq 100\lambda$ рассчитанные зависимости уровня бокового излучения и ширины главного лепестка от фазовых ошибок приведены в [6–9].

Цель работы. Удобным способом определения параметров ФВ является использование лета-

ющего пробника (flying probe), при котором подвижный пробник последовательно соединяется с каждым элементом решетки. Для ФАР, имеющей несколько тысяч элементов, очень важно время проведения полного теста. Для последовательного обмера всех элементов решетки используется трехкоординатный сканер с компьютерным управлением перемещением. Точность взаимного позиционирования пробника и излучателя по трем координатам в современном сканере составляет не более 0.01λ [4].

Очевидной проблемой является взаимодействие между элементом решетки и пробником [6]. Целью настоящей статьи является создание способа оценки погрешности измерений параметров ФВ в составе антенной решетки путем сопоставления теоретических положений с экспериментальными данными.

Конструкция элемента решетки. В качестве управляемого элемента в миллиметровом диапазоне волн используется отражательный ферритовый ФВ круговой поляризации на эффекте Фарадея [5], совмещенный с диэлектрическим излучателем (рис. 1, 2–4).

Конструкция измерителя. Для управления углом поворота луча антенной решетки необходимо знать управляющую характеристику ФВ каждого элемента решетки [5, 10, 11], т. е. зависимость фазы коэффициента отражения от элемента ФАР падающего на него излучения $\Phi_{\text{изм}}$ от времени намагничивания феррита τ . Для этого необходимо измерить коэффициент отражения $S_{11} = |S_{11}|e^{i\Phi_{11}(\tau)}$

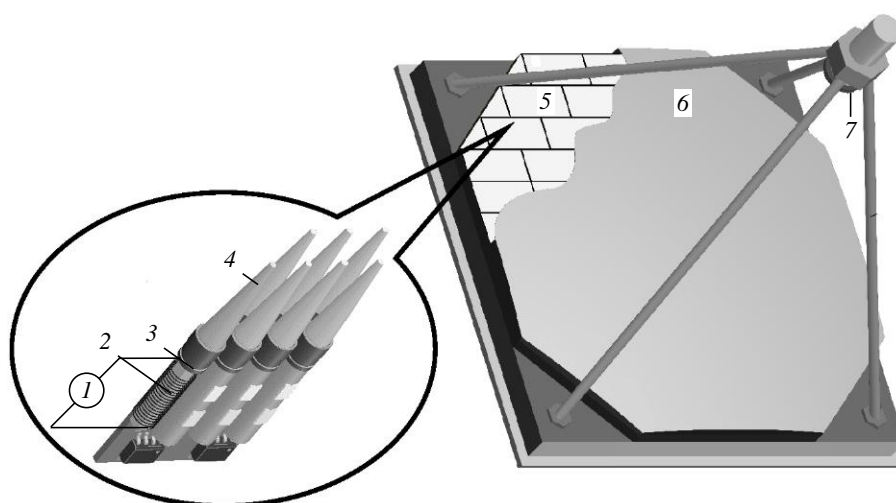


Рис. 1. Отражательная ФАР и ее элементы: 1 – генератор намагничивания феррита; 2 – обмотка управления; 3 – ферритовый волновод; 4 – диэлектрический излучатель; 5 – отражательная апертура; 6 – обтекатель; 7 – облучатель

Fig. 1. Phased reflect array and its elements: 1 – ferrite magnetization source; 2 – control winding; 3 – ferrite waveguide; 4 – dielectric radiator; 5 – reflective aperture; 6 – radome; 7 – antenna feed

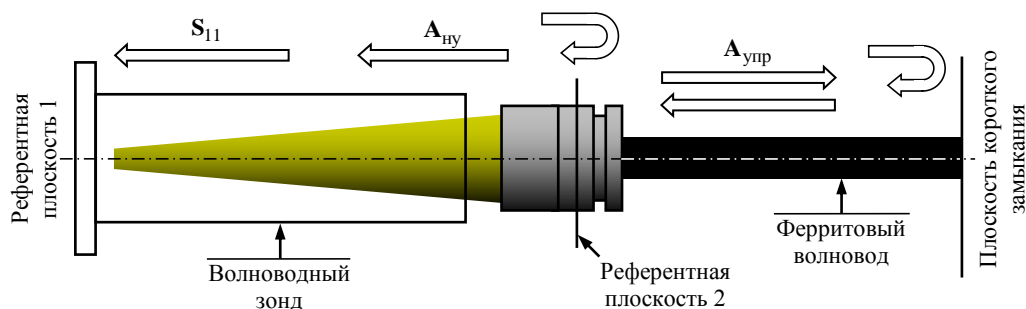


Рис. 2. Соотношение управляемой и неуправляемой волн в элементе ФАР

Fig. 2. Relationship between controlled and uncontrolled waves in a phased array element

в референтной плоскости 2 (рис. 2). Однако для элемента ФАР, объединяющего излучатель и ФВ в единой конструкции, это сделать невозможно из-за конструктивных ограничений. Поэтому измерения S_{11} проводятся в референтной плоскости 1.

Характеристики элемента ФАР, представляющего собой единую конструкцию из излучателя и ферритового ФВ круговой поляризации, можно измерить в волноводном тракте. Для измерения параметров ФВ, входящего в конструкцию элемента решетки, используется круглый волноводный зонд, соединяющий элемент с измерителем комплексных коэффициентов отражения и передачи (S-параметров). Поэтому измерения проводятся на волноводном типе волны TE₁₁.

Металлические стенки волновода, расположенные вблизи диэлектрического излучателя, изменяют структуру поля. Однако и в этих условиях сохраняется возможность автоматизированных высокопроизводительных измерений коэффициента отражения S_{11} .

Волна, падающая на элемент ФАР, частично отражается от излучателя в плоскости 2 (рис. 2). Фаза этой волны неизменна, поэтому она далее называется неуправляемой волной $A_{ну}$. Другая часть падающей волны проходит через плоскость 2, распространяется внутри ферритового волновода с управляемой намагниченностью, отражается от короткозамыкателя и направляется назад через излучатель в волноводный зонд к референтной плоскости 1. Фаза этой волны, называемой управляемой $A_{упр}$, меняется от 0 до 360° в зависимости от намагниченности ферритового волновода.

В референтной плоскости 1 фиксируется результат векторного сложения волн $A_{ну}$ и $A_{упр}$ (рис. 3). Наличие изменяющегося фазового сдвига между этими сигналами приводит к погрешностям измерения параметров ФВ.

Далее будем полагать, что фаза элемента ФАР определяется этим измерением $\varphi_{изм}(\tau) = \varphi_{11}(\tau)$.

Модель. В конструкции по рис. 2 в процессе измерений фиксируется значение $\varphi_{изм}(\tau)$, однако целью измерений является электрическая длина ферритового волновода $\Delta\varphi_{упр}$. Разница между этими величинами является систематической ошибкой, присущей рассматриваемому методу измерений [12, 13].

Погрешность (фазовая ошибка) измерений возникает из-за векторного сложения управляемой и неуправляемой отраженных волн на входе элемента ФАР в референтной плоскости 1. Она принимает максимальное значение при перпендикулярности векторов $A_{ну}$ и S_{11} [4] (рис. 3, а) и равна нулю при коллинеарности этих векторов (рис. 3, б).

Максимальная фазовая ошибка составляет [4]

$$\Delta\varphi_{max} = \pm \arcsin \frac{|A_{ну}|}{|A_{упр}|}. \quad (1)$$

Пренебрегая потерями в феррите, эту формулу можно упростить:

$$\Delta\varphi_{max} = \pm \arcsin \frac{|A_{ну}|}{|1 - A_{ну}|}. \quad (2)$$

С учетом соотношения, связывающего коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициент отражения:

$$КСВН = \frac{1 + |A_{ну}|}{1 - |A_{ну}|}, \quad (3)$$

выражение для максимальной фазовой ошибки (2) упрощается:

$$\Delta\varphi_{max} = \pm \arcsin \frac{КСВН - 1}{2} \quad (4)$$

и становится удобным для практических применений.

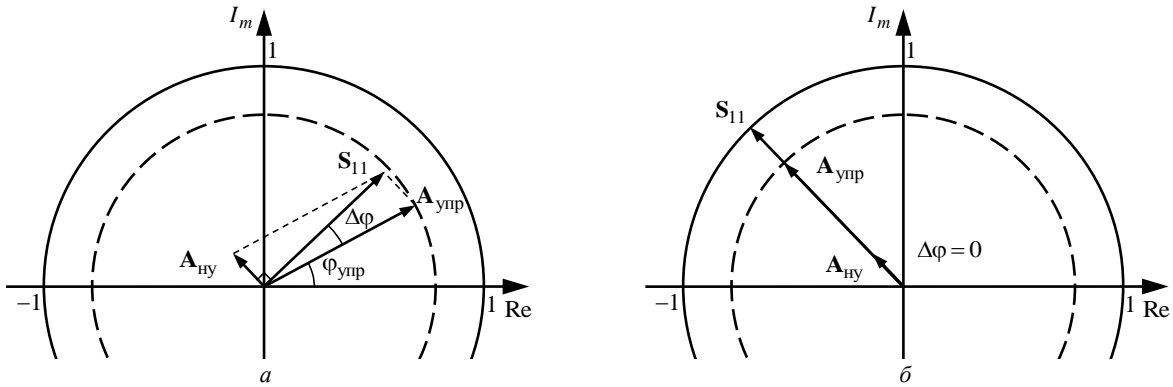


Рис. 3. Геометрическая интерпретация векторного сложения управляемого и неуправляемого сигналов:
 а – векторы $A_{ну}$ и S_{11} взаимно перпендикулярны – ошибка максимальная;
 б – векторы $A_{ну}$ и S_{11} коллинеарны – ошибка равна нулю

Fig. 3. Geometric interpretation of vector addition of controlled and uncontrolled signals:
 а – vectors $A_{ну}$ and S_{11} are mutually perpendicular – the error is maximum;
 б – vectors $A_{ну}$ and S_{11} are collinear – the error is zero

На рис. 4 показана зависимость максимальной фазовой ошибки от КСВН.

Из рис. 3, б следует, что если векторы $A_{упр}$ и $A_{ну}$ совпадают по направлению, то $\varphi_{изм} = \varphi_{упр}$ и ошибка измерения фазы будет нулевая, а модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ – максимальным или минимальным.

Показанный в (1)–(4) подход основан на рассмотрении двух схем включения ФВ. Первая схема (рис. 2) содержит короткое замыкание в конце ферритового волновода, а вторая схема в этой же плоскости имеет согласованную нагрузку (СН). При рассмотрении схемы с СН получатся следующие S-параметры:

$$S_{СН11} = A_{ну}; |S_{СН21}| = |A_{упр}|.$$

Приведенные соотношения позволяют построить геометрическую интерпретацию векторного

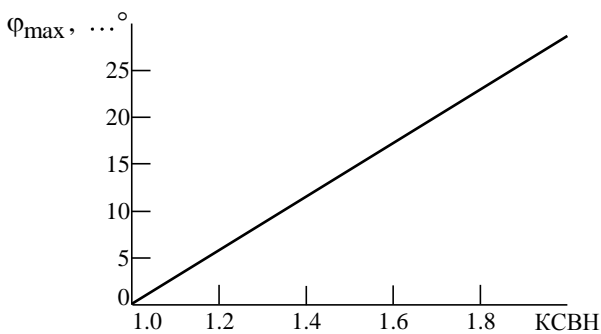


Рис. 4. Зависимость максимальной фазовой ошибки измерений от КСВН

Fig. 4. Maximum phase measurement error versus VSWR

сложения управляемого и неуправляемого сигналов (рис. 3) и качественно описывают процесс, происходящий в стыковочной секции. Проведенный анализ схемы в пакете Ansoft Designer, а также трехмерное моделирование в пакете Ansoft HFSS подтверждают правильность этого упрощенного подхода.

Методы работы. Для измерения параметров элемента ФАР измерения проводят с помощью пробника в виде отрезка круглого волновода, надвигающегося на излучатель ФАР [4, 6]. Далее эта композиция устройств называется секцией сопряжения (рис. 5).

В реализуемых на практике секциях сопряжения КСВН > 1. Учет этой неоднородности для уменьшения погрешности измерений может быть выполнен на основе процедуры "deembedding", имеющейся в современных анализаторах цепей [12, 14].

С учетом необходимости преобразования типа волны между измерителем и элементом ФАР формируется схема измерения, представленная на рис. 6. Секция сопряжения 5 подключена к порту 3 преобразователя поляризаций 4. Измерения проводятся векторным анализатором цепей 1, подключенным к портам 1 и 2 секции сопряжения через переходные устройства 2 и 3.

Для учета неоднородности на порт 3 преобразователя 4 последовательно устанавливаются отрезок волновода четвертьволновой длины, короткозамыкатель и согласованная нагрузка. Полученные анализатором 1 S-параметры запоминаются. При проведении измерений элемента ФАР стандартными алгоритмами, встроенными в анализатор цепей [14], с использованием этих параметров

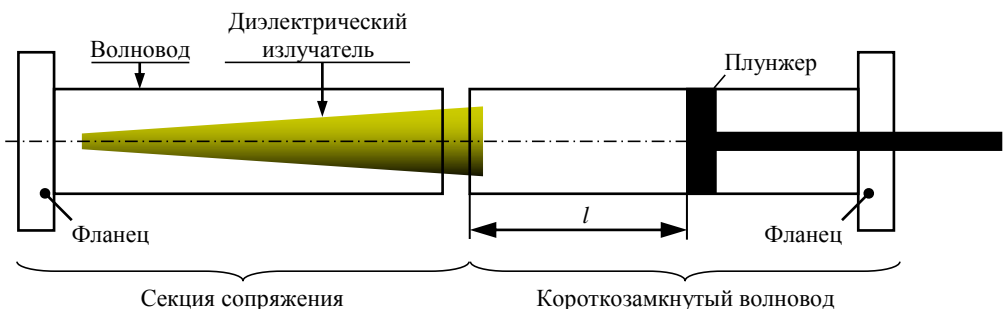


Рис. 5. Сечение измерительной конструкции
 Fig. 5. Cross section of the measuring structure

влияние переходных устройств 2, 3 и преобразователя поляризаций 4 исключается.

Поля волновода и диэлектрического излучателя, составляющих секцию сопряжения, образуют неизвестную суперпозицию. В результате процедура измерений состоит в измерении фазы исследуемого устройства – отражательного фазовращателя – через секцию сопряжения с неизвестными S-параметрами. Задача состоит в оценке точности этих измерений.

Предлагается измерить S-параметры секции сопряжения в режиме нагрузки механическим эквивалентом ФВ (рис. 6) и сопоставить предполагаемые характеристики, соответствующие теоретической модели, и экспериментальные данные. Для этого нужно измерять $|S_{11}(l)|e^{i\varphi_{11}(l)}$ вместо $|S_{11}(\tau)|e^{i\varphi_{11}(\tau)}$.

Предлагается следующая последовательность действий:

- задаем различные КСВН для секции совмещения, рассчитываем зависимость фазы и амплитуды от электрической длины;
- выполняем эксперимент по измерению этих параметров.

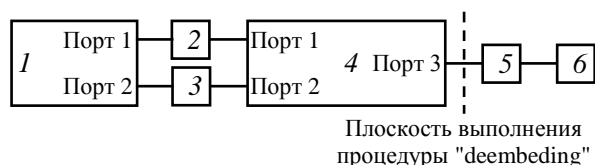


Рис. 6. Блок-схема измерений элемента ФАР:
 I – векторный анализатор цепей; 2, 3 – переходные устройства; 4 – преобразователь поляризаций;
 5 – секция сопряжения; 6 – механический эквивалент ФВ
 Fig. 6. Flow diagram of measurements of a phase array antenna element: I – network analyzer; 2, 3 – matching network; 4 – ortoplexer; 5 – superposition section; 6 – mechanical equivalent of the phase shifter

В идеальном случае $КСВН = 1$ и зависимость фазы коэффициента отражения от длины l – прямая линия:

$$\varphi_{11}(l) = K_T l,$$

где

$$K_T = 720^\circ / \lambda_{св}, \quad (5)$$

– теоретическая крутизна фазовой характеристики; $\lambda_{св}$ – длина волны в волноводе.

В реальном измерителе $КСВН > 1$ и зависимость $\varphi_{11}(l)$ носит волнообразный характер (рис. 7). При этом разность $\varphi_{11}(l) - K_T l$ представляет синусоиду, период которой равен длине волны в волноводе. Амплитуда синусоиды определяет точность измерений параметра ФВ.

Аналогично поведение и модуля коэффициента отражения. Период его изменения в зависимости от длины короткозамкнутой части также соответствует длине волны в волноводе, а позиции экстремумов совпадают с позициями нулевой ошибки фазовой характеристики. Это следует из модели сложения двух векторов (см. рис. 3): если

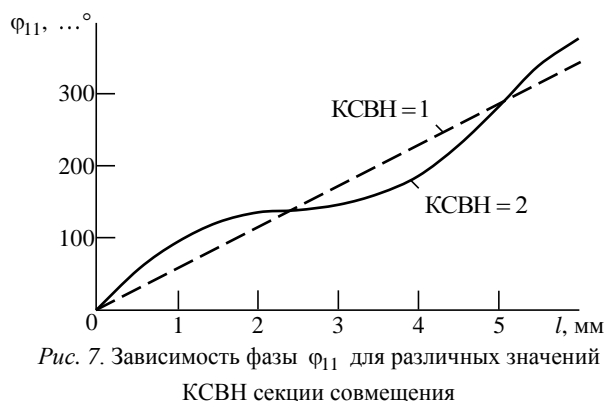


Рис. 7. Зависимость фазы φ_{11} для различных значений КСВН секции совмещения

Fig. 7. Dependence of the phase φ_{11} for different values of voltage standing wave ratio of the superposition section

векторы совпадают по углу, то амплитуда коэффициента отражения максимальная (или минимальная), а ошибка измерения фазы нулевая.

Результаты. Погрешность измерений параметров ФВ предлагается оценить сопоставлением теоретических и экспериментальных данных. Для верификации сверяются три величины:

- крутизна фазовой характеристики (K_T), теоретическое значение которой определяется по (5);
- фазовая ошибка φ_{11} , максимальное значение которой определяется по (4) и при КСВН = 1.05 составляет $\Delta\varphi_{\max} = 1.4^\circ$, а при КСВН = 1.1 $\Delta\varphi_{\max} = 3^\circ$;
- модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$.

Для проверки предложенной методики определялась зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ от длины l короткозамкнутой волноводной линии передачи, являющейся механическим эквивалентом ФВ. В качестве эквивалента использовалась волноводная секция круглого сечения, в котором возбуждалась волна TE₁₁. Волновод замкнут плунжером с микрометрическим винтом для точного отсчета длины (рис. 5). Исходя из условия задачи, величина $|S_{11}(l)|e^{i\varphi_{11}(l)}$ измеряется при изменении длины короткозамкнутого отрезка в пределах $l_0 \geq l \geq l_0 + \lambda_{\text{св}}/2$ (l_0 – константа).

Теоретическую зависимость $|S_{11}(l)|e^{i\varphi_{11}(l)}$ механического эквивалента ФВ можно описать, зная электрическую длину короткозамкнутого отрезка волновода круглого сечения. Длина волны типа TE₁₁ находится из соотношения [15]

$$\lambda_{\text{св}} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\sqrt{1 - (\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в вакууме; $\lambda_{\text{кр}} = \pi D / \text{SQR}_{11}$ – критическая длина волны (D – диаметр волновода; SQR_{11} – первый корень функции Бесселя первого рода первого порядка).

Электрическая длина короткозамкнутого отрезка составляет $\varphi_{\tau} = 720^\circ / \lambda_{\text{св}}$.

Проведя измерения с помощью механического эквивалента отражательного ФВ, можно выполнить

сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных и далее вычислить максимальную ошибку измерений фазы элемента ФАР.

Теоретическое значение длины волны отраженного сигнала $|S_{11}(l)|e^{i\varphi_{11}(l)}$ рассчитывается по (6).

Эксперимент. Экспериментальные данные для круглого волновода диаметром 7.2 мм с переменной длиной в диапазоне длин волн $\lambda = 8$ мм снимались с шагом 0.02λ . По этому ряду точек находилась аппроксимирующая прямая на интервале $l_0 \geq l \geq l_0 + \lambda_{\text{св}}/2$, тангенс угла наклона которой является измеренным значением крутизны ($K_{\text{изм}}$). Разница между K_T и $K_{\text{изм}}$ составила 0.3 %.

Из-за наличия неоднородностей в узле совмещения появляется ошибка измерения фазы, которая находится из соотношения

$$\Delta\varphi_{\text{изм}}(l) = \varphi_{11}(l) - K_{\text{изм}}l.$$

Экспериментальные данные получены в специально сконструированном фиксаторе с использованием четырех втулок, обеспечивающих взаимное позиционирование волноводных фланцев, показанных на рис. 5, с точностью 0.01λ по трем координатам. Результат измерений фазы коэффициента отражения механического эквивалента ФВ приведен на рис. 8. Из графика видно, что зависимость является гармонической функцией с периодом $\lambda_{\text{св}}/2$. Экстремумы функции фазовой ошибки определяют максимальную ошибку измерения фазы, которая составила $\Delta\varphi_{\max} \cong \pm 2.2^\circ$.

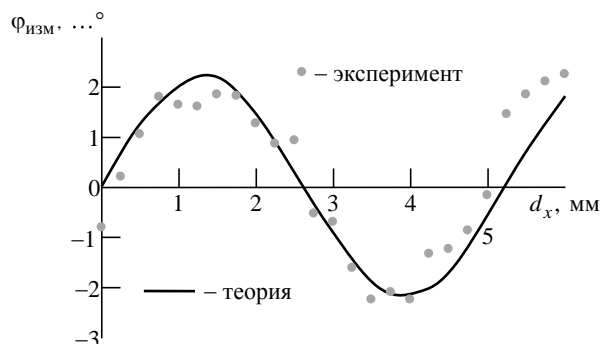


Рис. 8. Ошибка измерения фазы механического эквивалента ФВ

Fig. 8. The error of the measurements of the phase of the phase shifter mechanical equivalent



Рис. 9. Коэффициент отражения механического эквивалента ФВ

Fig. 9. Reflection coefficient of the phase shifter mechanical equivalent

На рис. 9 приведен результат измерения модуля коэффициента отражения механического эквивалента ФВ.

Сопоставление графиков амплитуды и фазы коэффициента отражения (рис. 8 и 9) посылает, что фазовая ошибка $\Delta\varphi = 0^\circ$ соответствует максимуму и минимуму амплитуды в точках $d_x \cong 2.6$ и 5 мм.

Обсуждение. Сопоставление полученных данных показывает следующее:

1. Отличие измеренной крутизны фазовой характеристики $K_{\text{изм}}$ от расчетной K_T составляет 0.3 %.

2. Зависимость ошибки фазы от длины носит гармонический характер с периодом $\lambda_{\text{св}}/2$. Из (4) следует, что секция совмещения имеет КСВН = 1.08, тогда максимальная ошибка составляет 2.2° .

3. Нулевая фазовая ошибка соответствует максимуму и минимуму амплитуды отраженного сигнала при положении короткозамыкателя, кратному четверти длины волны: $l = \lambda_{\text{св}}/4$ и $l = \lambda_{\text{св}}/2$. Это подтверждает правильность выбранной модели векторного сложения управляемого и неуправляемого сигналов в референтной плоскости 1 отражательного элемента ФАР (см. рис. 2).

Выводы. Проведенный анализ показал правомерность метода измерения для выбранного типа летающего пробника. Погрешность измерений элементов ФАР по рассмотренной схеме соизмерима с погрешностью регистрирующего прибора (для векторного анализатора цепей ZNB40 абсолютная погрешность 3°). Дальнейшее повышение точности требует использования анализатора цепей более высокого класса точности [14].

Список литературы

1. Mailloux R. J. Phased Array Antennas Handbook. 3rd ed. Boston–London: Artech House, 2017. 506 p.
2. Sturdivant R., Quan C., Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Boston–London: Artech House, 2019. 300 p.
3. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
4. Парнес М. Д. Отражательная антенная решетка с электронным сканированием // СВЧ-электроника, 2019. № 2. С. 24–31.
5. Обобщение результатов разработки интегрированных элементов фазированных антенных решеток с ферритовыми фазовращателями КВЧ-диапазона / А. И. Фирсенков, А. Б. Гуськов, Е. В. Комиссарова, В. М. Крехтунов, А. С. Смирнов // Сб. тр. VIII Всерос. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ". 2019. Т. 1, № 1. С. 4–9. URL: <http://mwelectronics.ru/2019/Papers/004-009.pdf> (дата обращения 03.04.2021)
6. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки / пер. с англ. под ред. А. И. Синани. М.: Техносфера, 2012. 558 с.
7. Программа расчета фазированных антенных решеток Fazar v.5. URL: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-Fazar-v.5> (дата обращения 03.04.2021)
8. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
9. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Сколник. М.: Техносфера, 2015. 1352 с.
10. Vendik O. G., Parnes M. A Phase Shifter with one tunable Component for a Reflect Array Antenna // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008. Vol. 50, iss. 4. P. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
11. Romanofsky R. Array Phase Shifters: Theory and Technology // National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080001449/downloads/20080001449.pdf> (дата обращения 03.04.2021)
12. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ. М.: Радиотехника, 2008. 184 с.
13. Near-Field Antenna Measurements, Calculations and Facility Design / V. S. Kalashnikov, M. Y. Ponomarev, O. Y. Platonov, V. V. Shubnikov, M. I. Rivkin, A. Y. Shatrakov, G. Y. Shatrakov, O. I. Zavalishin. Springer, 2021. 204 p.
14. Agilent De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer. Application Note 1364-1. URL: <https://www.testunlimited.com/pdf/an/5980-2784EN.pdf> (дата обращения 04.04.2021)
15. Balanis C. A. Antenna Theory. Analysis and Design. Hoboken: John Wiley & Sons Limited, 2012. 1136 p.

Информация об авторе

Парнес Михаил Давидович – д. т. н. (2011), главный конструктор ООО "Резонанс". Технический руководитель фирмы по производству антенн для безопасности воздушного движения. Автор более 75 научных публикаций. Сфера научных интересов: фазированные антенные решетки, СВЧ-электроника.
Адрес: ООО "Резонанс", ул. Академика Павлова, д. 14А, Санкт-Петербург, 194156, Россия
E-mail: info@antennas.spb.ru

References

1. Mailloux R. J. Phased Array Antennas Handbook. 3rd ed. Boston-London, Artech House, 2017, 506 p.
2. Sturdivant R., Quan C., Chang E. Systems Engineering of Phased Arrays. Boston-London, Artech House, 2019, 300 p.
3. Vendik O. G., Parnes M. D. Antennas with electric scanning. Introduction to Theory. M., SCIENCE PRESS, 2002, 232 p. (In Russ.)
4. Parnes M. D. Reflective antenna array with electronic scanning. Microwave electronics, 2019, no. 2, pp. 24–31. (In Russ.)
5. Firsenkov A. I., Guskov A. B., Komissarova E. V., Krekhtunov V. M., Smirnov A. S. Generalization of the results of the development of integrated elements of phased antenna arrays with ferrite phase shifters of the EHF range. Proc. of the VIII All-Russian Conf. "Electronics and microelectronics of the microwave". 2019, vol. 1, no. 1, pp. 4–9. Available at: <http://mwelectronics.ru/2019/Papers/004-009.pdf> (accessed 03.04.2021) (In Russ.)
6. Hansen R. S. Phased array antennas. Ed. by A. I. Sinani. M., Technosfera, 2012, 558 p. (In Russ.)
7. Program for calculating phased array arrays Fazar v.5. Available at: <http://www.ascorltd.com/ru/completed-projects/programma-dlya-rascheta-far-Fazar-v.5> (accessed 03.04.2021) (In Russ.)
8. Design of phased array antennas. Ed. by D. I. Voskresensky. M., Radiotekhnika, 2003, 632 p. (In Russ.)
9. Handbook of radar. Ed. by M. I. Skolnik. M., Technosfera, 2015, 1352 p. (In Russ.)
10. Vendik O. G., Parnes M. A Phase Shifter with one tunable Component for a Reflect Array Antenna. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008, vol. 50, iss. 4, pp. 53–65. doi: 10.1109/MAP.2008.4653662
11. Romanofsky R. Array Phase Shifters: Theory and Technology. National Aeronautics and Space Administration. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080001449/downloads/20080001449.pdf> (accessed 03.04.2021)
12. Danilin A. A. Measurements in the microwave technique. M., Radiotekhnika, 2008, 184 p. (In Russ.)
13. Kalashnikov V. S., Ponomarev M. Y., Platonov O. Y., Shubnikov V. V., Rivkin M. I., Shatrakov A. Y., Shatrakov G. Y., Zavalishin O. I. Near-Field Antenna Measurements, Calculations and Facility Design. Springer, 2021, 204 p.
14. Agilent De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer. Application Note 1364-1. Available at: <https://www.testunlimited.com/pdf/an/5980-2784EN.pdf> (accessed 04.04.2021)
15. Balanis C. A. Antenna Theory. Analysis and Design. Hoboken, John Wiley & Sons Ltd, 2012, 1136 p.

Information about the author

Michael D. Parnes, Dr. Sci. (Eng.) (2011), Chief Engineer of company "Resonance Ltd". Technical director of an air traffic safety antenna company. The author of more than 75 scientific publications. Area of expertise: electronic steering antennas, microwave devices.
Address: Company "Resonance Ltd", 14A Ak. Pavlova St., St Petersburg 194156, Russia
E-mail: info@antennas.spb.ru
