МИХАИЛ ПАРНЕС, д. т. н., info@antennas.spb.ru

ЗОНДОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Рассмотрен метод зондового тестирования фазовращателей в составе отражательной антенной решетки путем сопоставления теоретических положений с опытными данными. Для настройки ферритовых фазовращателей миллиметрового диапазона использован метод прямого зондирования апертуры.

ВВЕДЕНИЕ

В больших антенных решетках при соотношениях размера к длине волны более ста широко используются оптические схемы возбуждения [1]. Основными элементами оптической схемы антенной решетки в миллиметровом диапазоне волн является облучатель и рефлектор, состоящий из нескольких десятков тысяч излучателей и фазовращателей (ФВ) (рис. 1).

После сборки антенных элементов в решетке из ферритовых фазовращателей необходимо измерить управляющую характеристику каждого фазовращателя, то есть зависимость фазы отраженной волны от времени перемагничивания феррита $\varphi_{изм}(\tau)$. Второй важный параметр — это начальные фазы элементов, которые могут значительно отличаться друг от друга из-за различий в длине ферритового волновода, что объясняется высокой диэлектрической проницаемостью феррита и конечной точностью его механической обработки. Серийные ферритовые фазовращатели могут иметь начальную фазу 0–360°. Кроме того, установка в решетку производится с точностью, составляющей заметную долю длины волны, линейные ошибки из-за механического крепления могут достигать 60° [2]. Поэтому измерения элементов решетки нужно проводить после полной сборки в решетку, по месту их размещения в апертуре.

Основные искажения диаграммы направленности в отражательных ФАР происходят за счет фазовых ошибок. В работе [2] 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 расширению главного лепестка. Для большой решетки диаметром D > 100λ, рассчитанные зависимости уровня бокового излучения и ширины главного лепестка от фазовых ошибок приведены в работах [3, 4].

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕМЕНТА РЕШЕТКИ

В качестве управляемого элемента в миллиметровом диапазоне волн используется отражательный ферритовый фазовращатель круговой поляризации на эффекте Фарадея [5], совмещенный с диэлектрическим излучателем, показанный на рис. 1.

Удобным способом определения параметров фазовращателей является использование «летающего» пробника (*flying probe*), при котором подвижный пробник последовательно соединяется с каждым элементом решетки. Очевидной проблемой представляется взаимодействие между элементом решетки и пробником [3]. Для измерения параметров фазовращателя, входящего в конструкцию элемента решетки, применяется волноводный переход, который служит для соединения с измерителем комплексных коэффициентов отражения и передачи (S-параметров). Элемент ФАР, представляющий собой единую конструкцию из излучателя и ферритового ФВ круговой поляризации, можно измерить в волноводном тракте. Для этого используется круглый волновод и, соответственно, волноводный тип волны TE_{11}.

При этом наличие металлических стенок, расположенных вблизи диэлектрического излучателя, меняет структуру поля, однако и в этих условиях сохраняется возможность организовать автоматизированные высокопроизводительные измерения коэффициента отражения S11. Время проведения полного теста очень важно для ФАР, имеющей несколько тысяч элементов. 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 [2].

Для управления углом поворота луча в антенной решетке необходимо знать управляющую характеристику каждого фазовращателя [3], то есть зависимость фазы коэффициента отражения $\varphi_{изм}(\tau)$ от времени намагничивания феррита τ. Для этого в плоскости 1 (рис. 2) измеряется коэффициент отражения $\overrightarrow{S11}$:

$$\overrightarrow{S11} = |S11| e^{i\varphi_{11}(\tau)}.$$

Далее будем полагать, что фаза элемента ФАР определяется этим измерением:

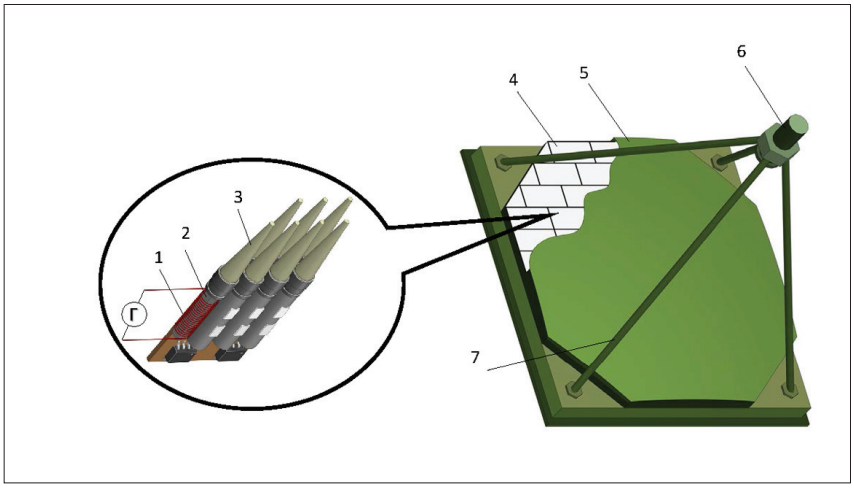

Рис. 1. Отражательная ФАР и ее элементы: 1 — обмотка управления, 2 — ферритовый волновод, 3 — диэлектрический излучатель, 4 — отражательная апертура, 5 — обтекатель, 6 — облучатель

$$\varphi_{ИЗМ}(\tau) = \varphi_{11}(\tau).$$

Важно отметить, что для элемента ФАР, объединяющего излучатель и фазовращатель в единой конструкции, определить параметры отражения в плоскости 2 невозможно из конструктивных ограничений, поэтому выполняем измерения $\overline{S11}$ в плоскости 1, что приводит к погрешностям измерения параметров фазовращателя.

МОДЕЛЬ

Рассчитать погрешность измерений для конструкции на рис. 2 можно исходя из предположения о фазовой ошибке, возникающей из-за векторного сложения управляемого и неуправляемого отраженных сигналов на входе элемента ФАР, в сечении референтной плоскости 1.

Результат векторного сложения показан на рис. 3, из которого следует, что в процессе измерений изменяется электрическая длина ферритового волновода $\Delta\varphi_{УПР}$, при этом регистрирующим прибором измеряется величина $\varphi_{ИЗМ}$. Разница между этими величинами является систематической ошибкой, присущей данному методу измерений.

Если в плоскости 1 (рис. 2) коэффициент отражения от излучателя обозначить как $\overline{A_{НУ}}$, то есть неуправляемая часть, а прошедшего через ферритовый волновод управляемого сигнала $\overline{A_{УПР}}$, то максимальное значение фазовой ошибки суммарного отраженного сигнала $|S11|e^{i\varphi_{11}(\tau)}$ будет в том случае, когда векторы $\overline{A_{НУ}}$ и $\overline{S11}$ перпендикулярны [2], как это показано на рис. 3а:

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

Без учета потерь в феррите формулу можно упростить:

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

С учетом соотношения, связывающего КСВН и коэффициент отражения:

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

С учетом (3) выражение для максимальной фазовой ошибки (2) упрощается, становится удобным для практических применений:

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

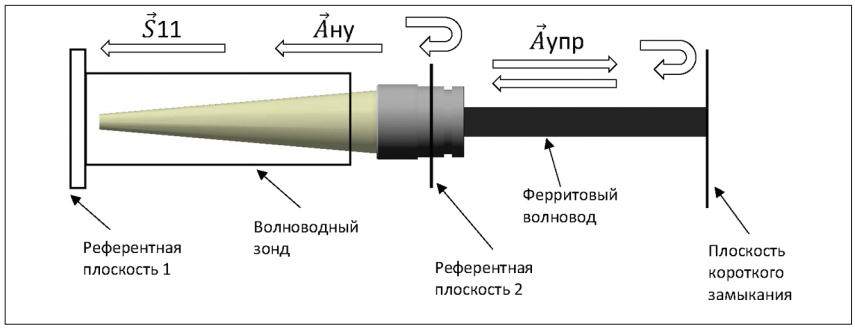

Рис. 2. Взаимное соотношение управляемой и неуправляемой волн в элементе ФАР

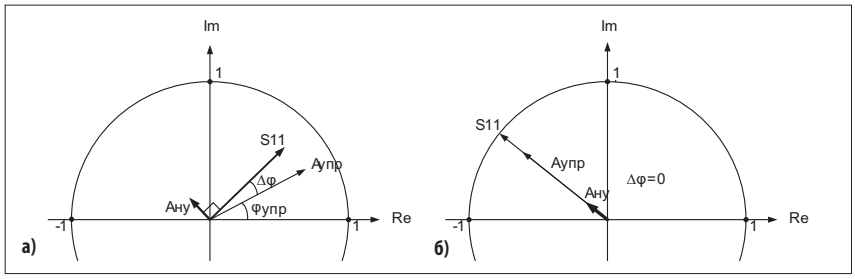

Рис. 3. Геометрическая интерпретация векторного сложения управляемого и неуправляемого сигналов: а) вектора $\overline{A_{НУ}}$ и $\overline{S11}$ взаимно перпендикулярны — ошибка максимальная; б) вектора $\overline{A_{НУ}}$ и $\overline{A_{УПР}}$ коллинеарны — ошибка равна нулю

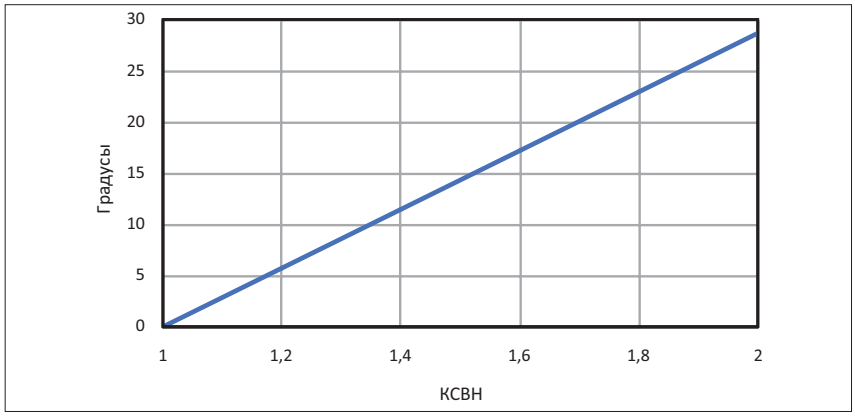

Рис. 4. Зависимость максимальной фазовой ошибки измерений от КСВН

На рис. 3б видно, если векторы $\overline{A_{УПР}}$ и $\overline{A_{НУ}}$ совпадают по направлению, то $\varphi_{ИЗМ} = \varphi_{УПР}$ и ошибка измерения фазы будет нулевая, а модуль коэффициент отражения $\overline{S11}$ будет максимальным или минимальным.

На рис. 4 показано поведение максимальной фазовой ошибки в зависимости от величины КСВН.

МЕТОДЫ РАБОТЫ

Для измерения элемента ФАР на основе ферритового фазовращателя с круговой поляризацией используют волноводный преобразователь поляризаций, имеющий три порта. Выходной порт соединен с пробником, в качестве которого используется круглый волновод. Полная измерительная схема показана на рис. 5.

Большую сложность представляет ситуация, когда отражательный фазовращатель не имеет разъема на входе. Элемент ФАР представляет собой единую конструкцию из ферритового отрезка и диэлектрического излучателя (рис. 1). При такой конструкции измерения проводят с помощью пробника в виде отрезка круглого волновода, надвигающегося на излучатель ФАР (рис. 6).

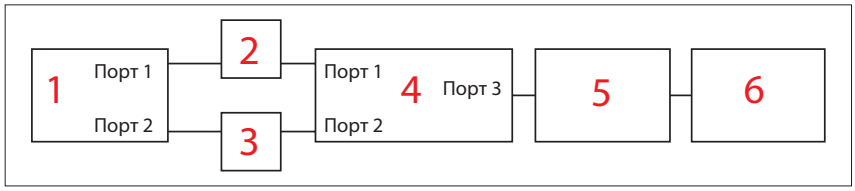

Рис. 5. Блок-схема измерений элемента ФАР: 1 — векторный анализатор цепей; 2, 3 — переходное устройство; 4 — преобразователь поляризаций; 5 — секция совмещения, 6 — механический эквивалент фазовращателя

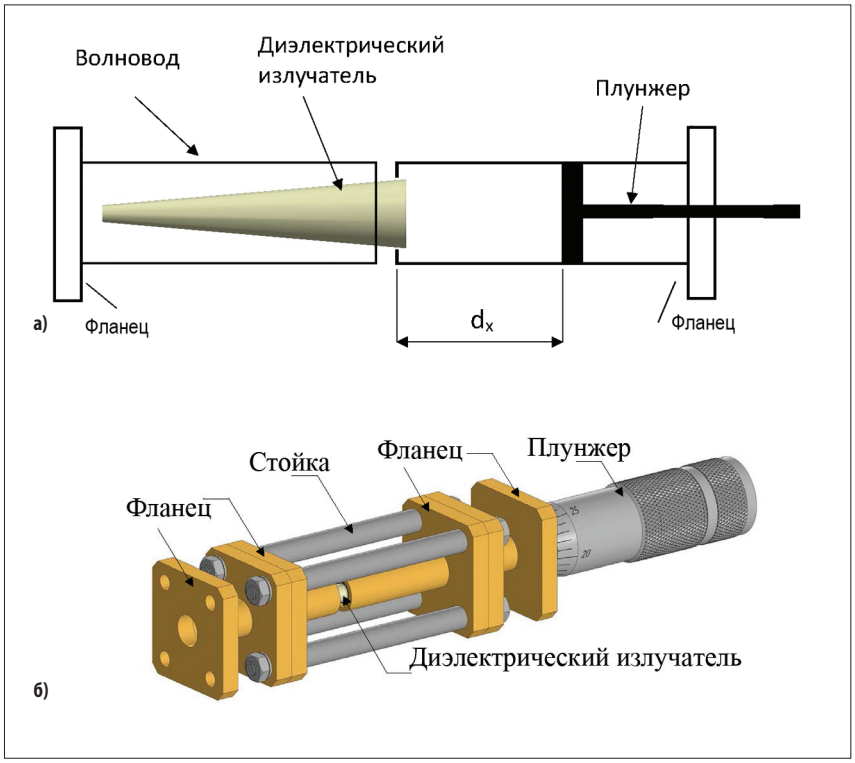

Рис. 6. а) Поперечное сечение секции совмещения; б) Внешний вид секции совмещения

Излучатель элемента ФАР вставляется в волноводный пробник, и поля этих двух устройств — волновода и излучателя — образуют неизвестную нам суперпозицию. На рис. 6 этот четырехполюсник назван секцией совмещения, его S-параметры нам неизвестны. Через этот неизвестный четырехполюсник мы измеряем фазу исследуемого устройства — отражательного фазовращателя. Как оценить точность таких измерений?

Предлагается измерить S-параметры неизвестного четырехполюсника, соединенного с отрезком короткозамкнутой линии с изменяемой геометрической длиной рис. 6, и сопоставить предполагаемые характеристики, соответствующие теоретической модели, и экспериментальные данные. Для этого предлагается использовать механический эквивалент фазовращателя и измерять $|S11(l)|e^{i\varphi_{11}(l)}$ вместо $|S11|e^{i\varphi_{11}(x)}$.

Предлагается следующая последовательность действий:

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

В идеальном случае КСВН = 1, и зависимость фазы коэффициента отражения от длины d_x — это прямая линия:

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

где K_T — теоретическая крутизна фазовой характеристики; d_x — длина короткозамкнутого отрезка.

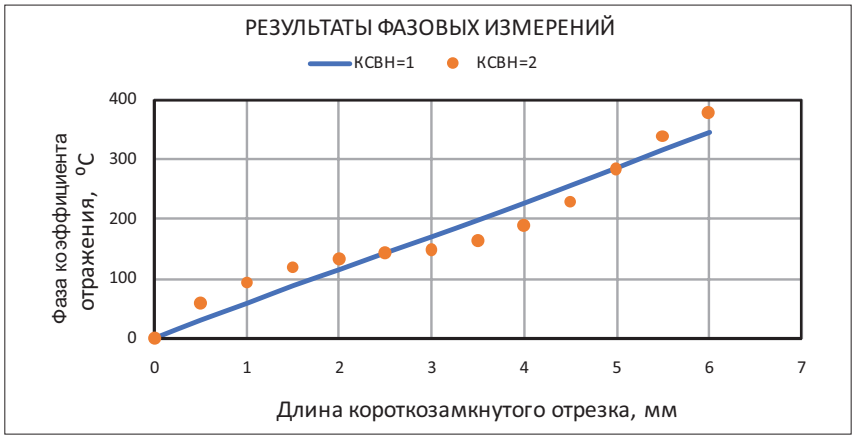

Рис. 7. Зависимость фазы $\varphi_{11}(l)$ для различных значений КСВН секции совмещения

$$K_T = \frac{720°}{\lambda_{CW}}, (5)$$

где λ_{CW} — длина волны в волноводе.

Если КСВН > 1, то это уже волнообразная линия (рис. 7), причем если взять разность $\varphi_{11}(l) - K_T d_x$, то получится синусоида, период которой равен длине волны в волноводе, а амплитуда синусоиды определяет точность измерений ФВ. Третий параметр для сопоставления — это модуль коэффициента отражения, его период также должен соответствовать длине волны в волноводе, а максимум должен соответствовать нулевой ошибке в фазовой характеристике. Это следует из модели сложения двух векторов. Если векторы совпадают по углу, то амплитуда коэффициента отражения максимальная (или минимальная), а ошибка измерения фазы нулевая.

Таким образом, величину погрешности измерений параметров фазовращателя предлагается оценить сопоставлением теоретических и экспериментальных данных. Для верификации сверяются три величины:

- крутизна фазовой характеристики;
- фазовая ошибка;
- модуль коэффициента отражения $|S11(l)|$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки предложенной методики измерялся коэффициент отражения $|S11(l)|$ в зависимости от длины короткозамкнутой волноводной линии передачи, являющейся механическим эквивалентом фазовращателя. В качестве эквивалента предлагается использовать волноводную секцию круглого сечения с плунжером и микрометрическим винтом для точного отсчета длины. Исходя из условия задачи такую проверку следует проводить, измеряя значения с при изменении длины короткозамкнутого отрезка в пределах расстояний от l_0 до $l_0 + (\lambda_{CW}/2)$, где λ_{CW} — длина волны TE_{11} в круглом волноводе.

Теоретическую зависимость $|S11|e^{i\varphi_{11}(l)}$ механического эквивалента фазовращателя можно описать, зная электрическую длину короткозамкнутого отрезка волновода круглого сечения. Длина волны типа TE_{11} находится из соотношения (6):

$$\lambda_{CW} = \frac{\lambda_V}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_V}{\lambda_{KP}}\right)^2}}, (6)$$

где λ_V — длина волны в вакууме; λ_{KP} — критическая длина волны, которая определяется соотношением (7):

$$\lambda_{кр} = \frac{\pi D}{SQR11}, \quad (7)$$

где D — диаметр волновода; SQR11 — первый корень функции Бесселя $J_m(x)$ первого рода, первого порядка.

Искомая электрическая длина короткозамкнутого отрезка составляет:

$$\varphi_T = \frac{720° d_x}{\lambda_{CW}}.$$

Проведя измерения с помощью механического эквивалента отражательного фазовращателя, можно выполнить сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных и далее вычислить максимальную ошибку измерений фазы элемента ФАР.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные данные для круглого волновода диаметром 7,2 мм с переменной длиной в диапазоне длин волн λ = 8 мм снимались с шагом 0,02λ. По этому ряду точек находилась аппроксимирующая прямая на интервале от l_0 до $l_0 + (\lambda_{CW}/2)$, тангенс угла наклона которой является измеренным значением крутизны $K_{ИЗМ}$. Разница между K_T и $K_{ИЗМ}$ составила 0,3%.

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

$$\Delta\varphi_{ИЗМ}(d_x) = \varphi_{11}(d_x) - K_{ИЗМ} d_x. \quad (8)$$

Экспериментальные данные были получены в специально сконструированном фиксаторе, с использованием четырех стоек, обеспечивающих взаимное позиционирование волноводных фланцев, показанных на рис. 6, с точностью 0,01λ по трем координатам. Результат измерений фазы коэффициента отражения механического эквивалента фазовращателя приведен на рис. 8. Из графика видно, что зависимость является гармонической функцией с периодом $\lambda_{CW}/2$. Экстремумы функции фазовой ошибки (рис. 8) определяют максимальную ошибку измерения фазы $\Delta\varphi_{max}$, которая составила:

$$\Delta\varphi_{max} \cong \pm 2,2°. \quad (9)$$

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

Сопоставление графиков амплитуды и фазы коэффициента отражения (рис. 8 и 9) позывает, что фазовая ошибка Δφ = 0° соответствует максимуму и минимуму амплитуды в точках $d_x \cong 2,6$ мм и 5 мм.

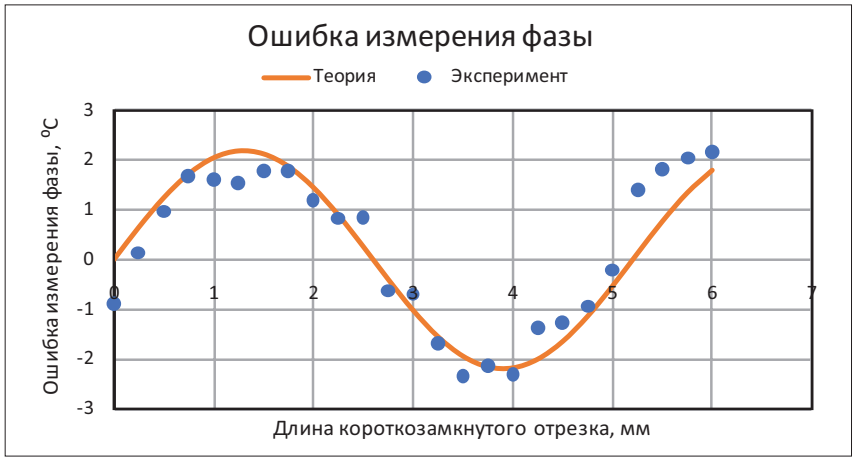

Рис. 8. Ошибка измерения фазы, $\Delta\varphi_{ИЗМ}(d_x)$

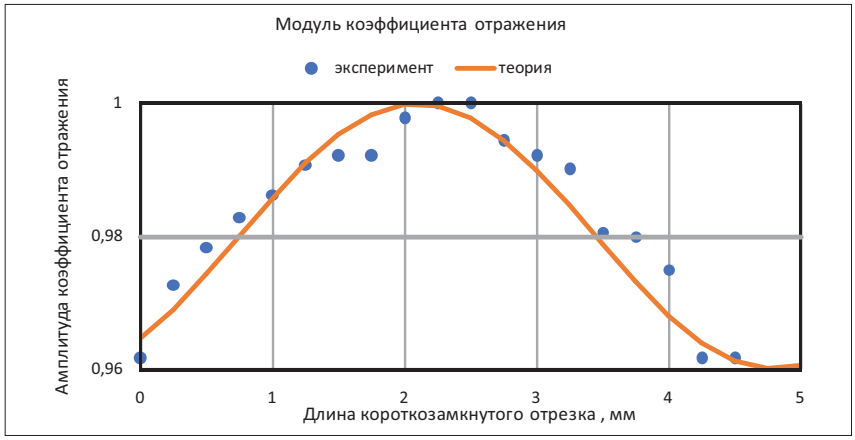

Рис. 9. Измеренная амплитуда отраженного сигнала в сравнении с рассчитанной

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление полученных данных показывает, что:

1. Отличие измеренной крутизны фазовой характеристики $K_{ИЗМ}$ от расчетной K_T составляет 0,3%.
2. Зависимость ошибки фазы от длины носит гармонический характер с периодом $\lambda_{CW}/2$, и максимальная ошибка составляет 2,2°.
3. Нулевая фазовая ошибка соответствует максимуму и минимуму амплитуды отраженного сигнала, при положении короткозамыкателя кратному четверти длины волны $d_x = \lambda_{CW}/4$ и $d_x = \lambda_{CW}/2$. Это подтверждает правильность выбранной модели векторного сложения управляемого и неуправляемого сигналов в референтной плоскости 1 отражательного элемента ФАР.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал правомерность метода измерения для выбранного типа «летающего» пробника. Погрешность измерений элементов ФАР по данной схеме соизмерима с погрешностью регистрирующего прибора — для векторного анализатора цепей ZNB40 абсолютная погрешность 3° и дальнейшее повышение точности потребует использования анализатора цепей более высокого класса точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002.*
2. *Парнес М. Д. Отражательная антенная решетка с электронным сканированием//СВЧ-электроника. 2019. № 2.*
3. *Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. Пер. с англ. под ред. Синани А. И. М.: Техносфера, 2012.*
4. *Парнес М. Д., Драк О. Т., Задорожный А. И. Программа расчета фазированных антенных решеток Fazar v.5. www.ascorltd.com*
5. *Фирсенков А. И., Гуськов А. Б., Комиссарова Е. В. и др. Обобщение результатов разработки интегрированных элементов фазированных антенных решеток с ферритовыми фазовращателями КВЧ диапазона//Сб. трудов Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2019. Т. 1. № 1. www.mwelectronics.ru/2019/Papers/004–009.pdf*
6. *Balanis C. A. Antenna Theory. Analysis and Design. John Wiley & Sons Limited, 2012.*