

УДК 621. 317. 744

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ЭКСТРАПОЛЯЦИИ СВЧ МЕР ОСЛАБЛЕНИЯ ПО МОДУЛЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

*Светлана Владимировна Ромасько*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: s\_romasko@mail.ru

Актуальность поставленной задачи заключается в том, что разработка методов и математических моделей измерений S-параметров в коаксиальных трактах как в научном, так и в практическом аспектах обеспечивает повышение точности и адекватности измерения S-параметров активных СВЧ-цепей для усовершенствования работы техники СВЧ на диапазоне сверхвысоких частот, что, в свою очередь, повышает экономическую эффективность их производства.

Задача обеспечения непрерывности параметров эталонных мер в пределах их рабочего диапазона частот в наши дни является одной из важных задач в области метрологического обеспечения единства измерений комплексных параметров отражения и передачи фазы и модуля в коаксиальных трактах. Эта проблема обусловлена тем, что при аттестации эталонных мер имеется конечное множество определенных экспериментально параметров этих мер, а потребителю требуется знание параметров мер в любых точках их частотного диапазона. Для решения данной задачи была использована spline-интерполяция.

Серьезным недостатком используемых ранее методов поддержания единства измерения параметров радиочастот являлась их некоторая обособленность от методов измерения и имеющихся методов анализа погрешностей измерения, что не позволяло использовать возможности высокоточных методов и алгоритмов измерения для повышения точности устройств, поддерживающих единство измерений, и наоборот.

Цель данной статьи – создание новых методов и математических моделей высокоточных измерений S-параметров, обеспечивающих их использование в любых точках частотного диапазона, обладающих высокой точностью на основе использования сплайн-функций.

**Ключевые слова:** S-параметры, математическая модель, аттенюатор, ослабление, комплексные коэффициенты передачи и отражения, метод наименьших квадратов, ряд Фурье.

Экспериментальные исследования проводились для различных аттенюаторов из комплектов ДК2-70 № 001 (3 дБ), ДК2-70 № 037(3дБ), Д<sub>2</sub>-65 10 дБ № 001, ДК2-70 № 037(30 дБ). Набор мер комплексного коэффициента передачи предназначен для поверки и калибровки анализаторов цепей по ослаблению и фазе коэффициента передачи [1].

Набор мер состоит из аттенюаторов резисторных, отрезков фазосдвигающих, короткозамыкателей коаксиальных.

Аттенюаторы используются как меры ослабления и меры фазы коэффициента передачи, отрезки – как меры фазы коэффициента передачи, короткозамыкатели – как меры комплексного коэффициента отражения.

Набор мер комплексного коэффициента передачи ДК2-70 представлен на рис. 1.



Рис. 1. Набор мер комплексного коэффициента передачи ДК2-70

Матрицы рассеяния устанавливают связь между входящими и выходящими (отраженными) волнами и для четырехполюсника могут быть записаны в виде [2]

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Далее про гармоническому разложению параметров четырехполюсника  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  в ряд Фурье берутся 1-й, 2-й, 3-й члены ряда, в котором в последующем подбираются подходящие параметры [3]

$$A(f) = af + b; \quad (2)$$

$$A(f) = af + b + c \sin\left(\frac{360}{12 \cdot m} f + \varphi_0\right), \quad (3)$$

где  $f$  – частота в пределах рабочего диапазона частот (0–12 ГГц) в ГГц;  
 $m$  – коэффициент сжатия.

Из измерительных уравнений (2) и (3) определялись параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $\varphi_0$ , а коэффициент сжатия  $m$  варьируется. Задача заключается в получении параметров функции, которая будет использоваться для аппроксимации и экстраполяции  $S$ -параметров мер на всем частотном диапазоне [4].

В табл. 1 и 2 представлены экспериментальные данные по модулю и фазе коэффициентов отражения и передачи аттенюатора из комплекта ДК2-70 № 001, полученные ОАО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева (поверка 19.12.2008, тип аттенюатора Д<sub>2</sub>-65 3 дБ № 001) [4, 5].

Таблица 1

Экспериментальные данные

$f$ частота, ГГц	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
$K_{вх.}$	1,01	1,05	1,05	1,15	1,28	1,12	1,05

Таблица 2

Экспериментальные данные

$F$ частота, ГГц	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
$\gamma(f)$ , дБ	-2,99	-3,09	-3,12	-3,20	-3,40	-3,56	-3,71

На основании данных табл. 1 и 2 методом наименьших квадратов были определены параметры сплайна и рассчитан доверительный интервал для каждой функции [6].

Графиком линейной функции служит прямая линия. Коэффициент  $a$  называется угловым коэффициентом этой прямой; чем больше  $|a|$ , тем прямая идет круче.

Если аргумент изменился от некоторого значения  $f_0$  до значения  $f$ , получив приращение  $\Delta f$ , а функция получила  $\Delta k$ , то из равенств  $k_0 = af_0 + b$ ,  $k = af + b$  следует  $k - k_0 = a(f - f_0)$ ,  $\Delta k = a\Delta f$   $a = \frac{\Delta k}{\Delta f}$  [6–15].

На свойстве приращения линейной функции основана линейная интерполяция.

Известно, что при  $f = f_0$  и  $f = f_0 + 6h$  (где  $h$  – шаг, равный 2)

$$F(f_0) = k_0 \quad (0; 0,01);$$

$$F(f_0 + 6h) = k_1 \quad (12; 1,05),$$

но неизвестны при промежуточных значениях  $f$ .

Тогда мы приближенно заменяем данную функцию линейной, принимающей те же значения при  $f = f_0$  и  $f = f_0 + 6h$ . Получаем

$$\frac{k - k_0}{f - f_0} = \frac{k_1 - k_0}{6h}; \quad k(f) = k_0 + \frac{k_1 - k_0}{6h}(f - f_0);$$

$$k(f) = 1,01 + \frac{1,05 - 1,01}{12}(f - 0);$$

$$k(f) = 1,01 + 0,003f,$$

из этого следует, что коэффициент  $a = 0,003$  и  $b = 1,01$  [7].

Пусть при проведении  $k$  раз измерений при одинаковых условиях и тем же самым прибором получены результаты [17]:

$$a_1, a_2, a_3, \dots, a_k.$$

Найдем наиболее вероятное значение из величин  $a_i$ . Пусть это значение есть  $x$ , тогда погрешности измерений будут находиться по формуле:

$$\varepsilon_1 = x - a_1;$$

$$\varepsilon_2 = x - a_2;$$

.....

$$\varepsilon_k = x - a_k. \tag{4}$$

Вероятность совместного появления этих  $k$  погрешностей, предполагаемых, что они попарно независимы, будет пропорциональна величине [17]

$$\left(\frac{1}{h\sqrt{\pi}}\right)^k \cdot e^{-\frac{1}{h^2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_k^2)}. \tag{5}$$

Следовательно, то значение  $x$  будет вероятнейшим, при котором величина (5) будет наибольшей [18], т. е. сумма квадратов погрешностей будет наименьшей

$$\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \dots + \varepsilon_k^2.$$

Заменяя величины  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$  их выражениями (4), видим, что определение  $x$  сводится к нахождению такого его значения, при котором величина [19]

$$V = (x - a_1)^2 + (x - a_2)^2 + \dots + (x - a_k)^2$$

становится наименьшей.

Отсюда получим следующее уравнение для определения  $x$ :

$$0 = \frac{dV}{dx} = 2[(x - a_1) + (x - a_2) + \dots + (x - a_k)],$$

из которого

$$x = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_k}{k}. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что вероятнейшее значение измеренной величины есть среднее арифметическое из значений  $a_i$  [20].

Тогда на основе данных, приведенных в табл. 1, по формуле (6) получим вероятнейшее значение параметра  $y(f)_p$

$$\begin{aligned} y(f)_p &= \frac{-2,99 + (-3,09) + (-3,12) + (-3,20) + (-3,40) + (-3,56) + (-3,71)}{7} = \\ &= -3,30 \text{ (дБ)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что значение функций (2) и (3)  $y(f)_p = -3,30$  дБ будет вероятнейшее [21].

Найдем погрешность параметра  $y(f)$  по формуле  $\varepsilon_i = y(f)_p - y(f)_i$  в дБ.

Тогда получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -3,30 - (-2,99) = -0,31 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_2 &= -3,30 - (-3,09) = -0,21 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_3 &= -3,30 - (-3,12) = -0,18 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_4 &= -3,30 - (-3,20) = -0,10 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_5 &= -3,30 - (-3,40) = 0,10 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_6 &= -3,30 - (-3,56) = 0,26 \text{ (дБ)}; \\ \varepsilon_7 &= -3,30 - (-3,71) = 0,41 \text{ (дБ)}. \end{aligned}$$

Средняя квадратичная погрешность величины  $y(f)$  будет равна

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_k^2}{k}}$$

и составит

$$\begin{aligned} \varepsilon_{y(f)} &= \sqrt{\frac{(-0,31)^2 + (-0,21)^2 + (-0,18)^2 + (-0,10)^2 + (0,10)^2 + (0,26)^2 + (0,41)^2}{7}} = \\ &= 0,25 \text{ (дБ)}. \end{aligned}$$

Аналогично найдем вероятнейшее значение частоты в пределах рабочего диапазона частот (от 0 до 12 ГГц)  $f_p$

$$f_p = \frac{0,00 + 2,00 + 4,00 + 6,00 + 8,00 + 10,00 + 12,00}{7} = 6,00(\text{ГГц})$$

и погрешность параметра  $f$  по формуле  $\varepsilon_i = f_p - f_i$

$$\varepsilon_1 = 6,00 - 0,00 = 6,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_2 = 6,00 - 2,00 = 4,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_3 = 6,00 - 4,00 = 2,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_4 = 6,00 - 6,00 = 0,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_5 = 6,00 - 8,00 = -2,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_6 = 6,00 - 10,00 = -4,00 \text{ (ГГц);}$$

$$\varepsilon_7 = 6,00 - 12,00 = -6,00 \text{ (ГГц).}$$

Тогда средняя квадратичная погрешность величины  $f$  составит [22]

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{(6,00)^2 + (4,00)^2 + (2,00)^2 + (0,00)^2 + (-2,00)^2 + (-4,00)^2 + (-6,00)^2}{7}} = 4,00 \text{ (ГГц).}$$

Далее с учетом погрешностей  $\varepsilon_{y(f)}$  и  $\varepsilon_f$  и принимая  $m = 1$ , получим систему уравнений

$$\begin{cases} -3,30 + 0,25 = a(6 + 4) + b + c \sin\left(\frac{360}{12 \cdot 1}(6 + 4) + \varphi_0\right), \\ -3,30 - 0,25 = a(6 - 4) + b + c \sin\left(\frac{360}{12 \cdot 1}(6 - 4) + \varphi_0\right); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} -3,30 + 0,25 = a(6 - 4) + b + c \sin\left(\frac{360}{12 \cdot 1}(6 - 4) + \varphi_0\right), \\ -3,30 - 0,25 = a(6 + 4) + b + c \sin\left(\frac{360}{12 \cdot 1}(6 + 4) + \varphi_0\right). \end{cases} \quad (9)$$

После решения систем (8) и (9) в программе MathCAD будем иметь функцию (3) следующего вида:

$$y(f) = 0,097 f - 3,535 + 0,489 \sin(30 f + 0,132); \quad (10)$$

$$y(f) = -0,034f - 2,815 + 0,399 \sin(30f + 0,124). \quad (11)$$

Далее на основании проведенных расчетов и нахождения подходящих параметров были построены графики экспериментальной зависимости значения функции ослабления аттенюатора от частоты в пределах рабочего диапазона (рис. 2, 3) [23, 24].

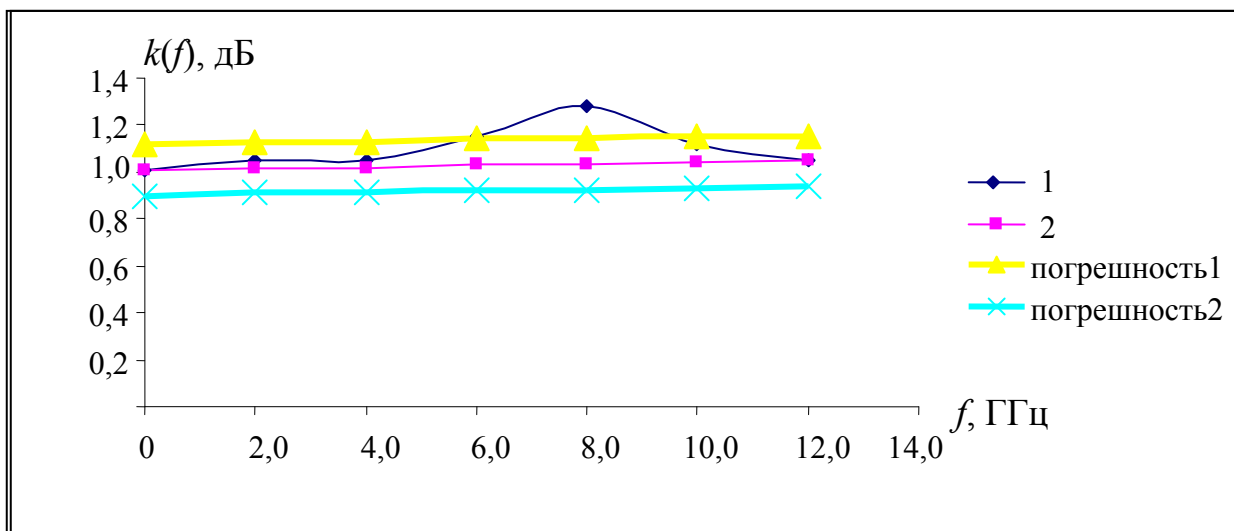


Рис. 2. Зависимость ослабления от частоты по прямой

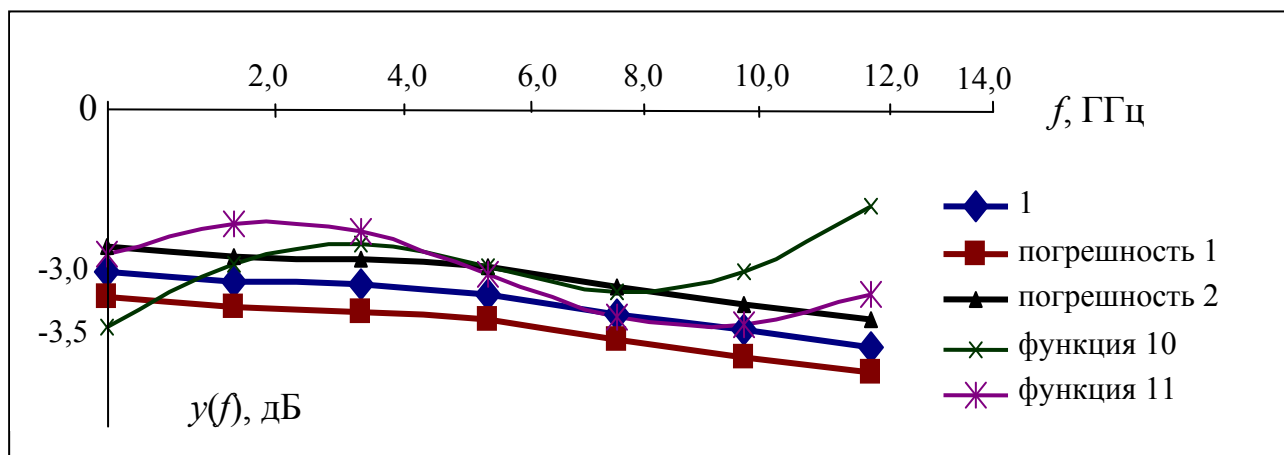


Рис. 3. Зависимость ослабления от частоты с синусоидальной составляющей

В результате проведенного анализа видно, что графики достаточно точно описывают (погрешность 0,005) результаты интерполяции S-параметров эталонных мер на всем частотном диапазоне.

В заключение сформулируем основные результаты работы:

- по результатам анализа существующих методов и средств высокоточных измерений S-параметров предложена, разработана и исследована математическая модель их расчета, позволяющая находить параметры мер в любых точках их частотного диапазона;
- проведено теоретическое и экспериментальное исследование предложенного метода;
- рассчитан доверительный интервал.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А., Колпаков А. В. Использование интерполирующих и экстраполирующих функций для определения межповерочного интервала коаксиальных мер // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 5, ч. 2. – С. 127–129.
2. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А. Алгоритмические методы определения функции поправки по модулю при измерении параметров отражения // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 261–263.
3. Ромасько С. В. Определение коэффициентов СВЧ мер ослабления по фазе коэффициента отражения // Сибресурс-2014. XV Междунар. практич. конф. : Междунар. науч. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» : сб. материалов (Кемерово, 6–7 ноября 2014 г.). – Кемерово : КузГТУ, 2014.
4. Ромасько С. В. Методика определения коэффициентов интерполяции и экстраполяции СВЧ мер ослабления по модулю коэффициента отражения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 50–52.
5. Теоретические основы построения имитаторов-анализаторов активных СВЧ цепей / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 175–178.
6. Метод анализа устойчивости активных СВЧ цепей / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 224–228.
7. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S-параметров // Метрология. – 2005. – № 4. – С. 19–28.
8. Савелькаев С. В. Двухсигнальный метод измерения S-параметров активных СВЧ-цепей в режиме большого сигнала // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 5 (439). – С. 30–32.
9. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Трехсекционная дейфодиффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером Шоттки // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, Вып. 1. – С. 57–62.
10. Полупроводниковые входные устройства СВЧ / Под ред. В. С. Эткина. – М. : Сов. радио. – 1975, Т. 1. – 344 с.
11. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 164–171.
12. Каганов В. И. СВЧ полупроводниковые радиопередатчики. – М. : Радио и связь, 1985. – 192 с.



13. Савелькаев С. В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2005. – № 5. – С. 65–68.
14. Савелькаев С. В. Теоретические основы построения двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей // Измерительная техника. – 2005. – № 3. – С. 41–46.
15. Савелькаев С. В. Вариационная методика оценки суммарной погрешности измерения анализаторов СВЧ-цепей // Измерительная техника. – 2008. – № 12. – С. 43–46.
16. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А. Анализ высокоточных методов измерения параметров отражения в коаксиальных трактах // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 856–862.
17. Савелькаев С. В. Двухсигнальный метод измерения S-параметров активных СВЧ-цепей в режиме большого сигнала // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 5. – С. 30–32.
18. Литовченко В. А. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S-параметров // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 90–98.
19. Петров В. П., Савелькаев С. В. Двухсигнальный метод измерения S-параметров транзисторов в режиме большого сигнала // Первая IEEE-Российская конференция «Микроволновая электроника больших мощностей: измерения, идентификация, применение»: сб. трудов (Новосибирск, сент., 1997 г.). – Новосибирск: НГТУ, 1997. – С. 60–62.
20. Петров В. П., Савелькаев С. В. Способ анализа устойчивости активного СВЧ-четырёхполюсника: А.с. 1758595 СССР, G 01 R 27/28. – Оpubл. Бюл. № 32 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 32. – С. 32–36.
21. Шауэрман А. А., Жариков М. С., Борисов А. В. Автоматизированный измеритель комплексного коэффициента отражения на основе логарифмического усилителя // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнёва. – 2010. – Вып. 5(31). – 276 с.
22. Савелькаев С. В., Устюгов М. Б. К вопросу повышения эффективности систем автоматизированного проектирования усилительных и автогенераторных СВЧ-устройств // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 128–130.
23. Савелькаев С. В., Устюгов М. Б., Плавский Л. Г. Коаксиальное контактное устройство // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 131–139.
24. Савелькаев, С. В., Заржецкая Н. В. Расчет и проектирование автогенераторов СВЧ в пространстве S-параметров // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2016. – Вып. 1. – С. 41–53.

Получено 25.10.2016

© С. В. Ромасько, 2016

## **MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING FACTORS INTERPOLATION AND EXTRAPOLATION MICROWAVE MEASURES FOR WEAKENING COEFFICIENT MODULE REFLECTION**

*Svetlana V. Romas'ko*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Assistant, Department of Metrology and Optical Engineering Technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: s\_romasko@mail.ru

The urgency of the problem lies in the fact that the development of methods and mathematical models of the measurement s-parameters in the coaxial paths in the scientific and practical aspects enhances the accuracy and adequacy of measuring S-parameters of active microwave circuits, for the improvement of the work of the microwave technology, to ultrahigh frequency range, which in turn, increases the cost-effectiveness of production.

The task of ensuring the continuity of the parameters of standard measures within its operating frequency range these days is one of the important tasks in the field of metrological assurance of measurement of parameters of complex reflection and transmission phase and module in coaxial paths. This problem is due to the fact that the certification standard measures have a finite set of experimentally determined parameters of these measures and the consumer need to know the parameters of the measures at any point of the frequency range. spline- interpolation was used to solve this problem.

A serious drawback of the previously used methods of measurement of radio circuits maintain the unity of their parameters is some isolation from the existing measurement methods and measurement error analysis methods that are not allowed to use the opportunities of high-precision measurement methods and algorithms to improve the accuracy of devices supporting traceability and vice versa.

The purpose of this article - the creation of new methods and mathematical models of high-precision measurement of S-parameters, ensuring their use in any point of the frequency range with high accuracy through the use of spline functions.

**Key words:** S-parameters, mathematical model, attenuator, attenuation, complex transmission and reflection coefficients, the least squares method, Fourier series.

## REFERENCES

1. Vladimirova, S. V., Pal'chun, Yu. A., & Kolpakov, A. V. (2010). The use of interpolating and extrapolating functions to determine the Calibration interval of coaxial measures. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 5 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 4.]* (pp. 127–129). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

2. Vladimirova, S. V., & Pal'chun, Yu. A. (2011). Algorithmic methods for determining the function of the amendments in modulus when measured reflection parameters. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 5 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 4.]* (pp. 261–263). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

3. Romas'ko, S. V. (2014). Determination coefficient measures the attenuation of microwave phase-patient coefficients of reflection. In *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri [Proceedings of 15nd International Scientific and Practical Conference: Natural and Intellectual Resources of Siberia]*. Retrieved from at [http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Sibresource/2014/materials/pages/Articles/sovremennye\\_puti\\_razvitiya\\_informacionnyh\\_tehnologiy,\\_mashinostroeniya\\_i\\_avtotransporta/romasjko.pdf](http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Sibresource/2014/materials/pages/Articles/sovremennye_puti_razvitiya_informacionnyh_tehnologiy,_mashinostroeniya_i_avtotransporta/romasjko.pdf) [in Russian].

4. Romas'ko, S. V. (2015) Methods of determining the interpolation coefficients and extrapolation-tion of microwave attenuation measures in absolute reflectance. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 5 [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 5]* (pp. 127–129). Novosibirsk: SGUGIT [in Russian].

5. Savel'kaev, S. V., Litovchenko, V. A., Romas'ko, S. V., & Zarzhetskaya, N. V. (2016) Theoretical bases of construction of simulators, analyzers active microwave circuit. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 175–178 [in Russian].

6. Savel'kaev, S. V., Litovchenko, V. A., Romas'ko, S. V., & Zarzhetskaya, N. V. (2016). The method of analysis stability of active microwave circuits. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1.]* (pp. 224–228). Novosibirsk: SGUGIT [in Russian].

7. Savel'kaev, S. V. (2005). Methods of analysis stability of active microwave circuits and their measurement of S-parameters. *Metrologiya [Metrology]*, 4, 19–28 [in Russian].

8. Savel'kaev, S. V. (1991). Two-signal method of measuring S-parameters of active microwave circuits in large signal mode. *Elektronay tekhnika. Seria Elektronika SVCh [Electronic Engineering. Series Microwave Engineering]*, 5(439) [in Russian].
9. Savel'kaev, S. V., Ayrapetyan, V. S., & Litovchenko, V. A. (2015). Trisected deffovo-diffusion mathematical model of FET with a Schottky barrier. *Vestnik NGY [Vestnik of NSU: Physics Series]*, 10(1) [in Russian].
10. Etkina, V. S. (Ed.). (1975). *Poluprovodnikovye vkhodnye ustroystva SVCh: T. 1 [The semiconductor device of the microwave input: Vol. 1]*. Moscow: Sov. Radio [in Russian].
11. Savel'kaev, S. V., Ayrapetyan, V. S., & Litovchenko, V. A. (2014). Methods of calculating the microwave oscillator in the space of S-parameter. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 5 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 5]* (pp. 164–171). Novosibirsk: SGUGIT [in Russian].
12. Kaganov, V. I. (1985). *SVCh poluprovodnikovye radioperedatchiki [Semiconductor microwave transmitters]*. Moscow: Radio i svyaz' [in Russian].
13. Savel'kaev, S. V. (2005). Coaxial contact device. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Equipment]*, 5(1), 65–68 [in Russian].
14. Savel'kaev, S. V. (2005). Theoretical bases of construction of two signal analyzers microwave circuits *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Equipment]*, 3(1), 41–46 [in Russian].
15. Savel'kaev, S. V. (2008). Variational method of estimating the total error of measurement, analyzers microwave circuit *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring equipment]*, 12(1), 43–46 [in Russian].
16. Vladimirova, S. V., & Pal'chun, Yu. A. (2012). Analysis of high-precision measurement methods pas parameters reflections in coaxial paths. *Vestnik TGTU [Vestnik TSTU]*, 18(4), 856–852 [in Russian].
17. Savel'kaev, S. V. (1991) Two signal method of measuring S-parameters of active microwave circuits in large signal mode. *Elektronay tekhnika. Seria Elektronika SVCh [Electronic Engineering. Series Microwave Engineering]*, 5, 30–32 [in Russian].
18. Litovchenko, V. A. (2015). Methods of analysis stability of active microwave circuits and their measurement of S-parameters *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 90 – 98 [in Russian].
19. Petrov, V. P., & Savel'kaev, S. V. (1997). Two-signal method of measuring S-parameters of transistors in large-signal. In *Sbornik materialov IEEE-Rossiyskoy konferentsii: Mikrovolnovaya elektronika bol'shikh moshchnostey: izmereniya, identifikatsiya, primeneniye [Proceedings of IEEE-Russia Conference: High-Power Microwave Electronics: Measuring, Identifying, Applying]* (pp. 60–62) Novosibirsk: NSTU [in Russian].
20. Savel'kaev, S. V., & Petrov, V. P. (1992). Otkrytiya. Izobreneniya. Patent USSR A.s. 1758595, G 01 R 27/28.
21. Shauerman, A. A, Zharikov, M. S, & Borisov, A. V. (2010). *Avtomatizirovannyy izmeritel' kompleksnogo koeffitsienta otrazheniya na osnove logarifmicheskogo usilitelya [Automated meter complex reflection coefficient based on the logarithmic amplifier]*. Krasnoyarsk [in Russian].
22. Savel'kaev, S. V., & Ustyugov, M. B. (2004). K improving the efficiency of systems for auto-disaggregated as designing and amplifying Autogenerating microwave devices. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 9(1), [in Russian].
23. Savel'kaev, S. V., Ustyugov, M. B., & Plavskiy, L. G. (2004). Coaxial contact device. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 9(1) [in Russian].
24. Savel'kaev, S. V., & Zarzhetskaya, N. V. (2016). Calculation and design of microwave oscillators in the space of S-parameters *Izvestiya vysshikh zavedeniy Rossii. Radio-elektronika [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics]*, 1, 41–53 [in Russian].

Received 15.09.2016

© S. V. Romas'ko, 2016