

УДК 621.317.089

Ю.Б. Гимпилевич, Р.С. Бандышев

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: gimpil@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ АНАЛИЗАТОРА МИКРОВОЛНОВЫХ ЦЕПЕЙ, ОСНОВАННОГО НА ДИСКРЕТНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ФУРЬЕ ОТВЕТВЛЯЕМЫХ СИГНАЛОВ

Проведено машинное моделирование процесса калибровки двенадцатиполусного анализатора микроволновых цепей, основанного на дискретном преобразовании Фурье ответвляемых сигналов. Моделирование построено на предварительном задании эквивалентных параметров преобразователя и параметров образцовых нагрузок, расчете сигналов, снимаемых с преобразователя в режиме калибровки, проведении ДПФ ответвляемых сигналов и решении системы уравнений относительно действительной и мнимой частей эквивалентных комплексных констант. Рассмотрены линейный и нелинейный метод решения задачи.

Широкое применение для измерений комплексных параметров микроволновых узлов находит метод калибруемого многополюсника [1]. Этот метод основан на измерении мощностей на выходах многополюсника, к двум плечам которого подключен измеряемый объект и генератор. Метод обладает потенциально высокими метрологическими характеристиками, поскольку при обработке измерительной информации учитываются собственные параметры многополюсника, получаемые на стадии его калибровки по набору образцовых нагрузок в каждой дискретной точке рабочего диапазона частот.

Процесс калибровки является неотъемлемой и важнейшей частью подготовки многополюсного анализатора к проведению измерений. При этом определяются комплексные константы, характеризующие каждый измерительный выход многополюсника [2]. Современное состояние данного направления характеризуется усложнением и повышением эффективности алгоритмов обработки измерительной информации, что в свою очередь приводит к разработке новых измерительных и калибровочных процедур.

В работе [3] предложен способ измерения, основанный на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) ответвляемых сигналов, поступающих с выхода многополюсного микроволнового преобразователя. Этот способ повышает помехоустойчивость измерительного канала, что расширяет динамический диапазон измеряемых величин и повышает эффективность применения таких приборов в условиях встроенного контроля радиотехнических систем.

В [4] разработан способ калибровки анализатора, основанного на ДПФ ответвляемых сигналов. Алгоритм разработан в общем виде, достаточно сложен и предполагает возможность использования различных набо-

ров образцовых мер и различных вариантов реализации измерительного двенадцатиполюсника. Данная статья посвящена машинному моделированию этого алгоритма с целью подтверждения его работоспособности, а также с целью выявления параметров образцовых мер и параметров двенадцатиполюсника, при которых возможна расходимость результата, чтобы исключить эти ситуации при практической реализации.

Моделирование осуществляется в диалоговом режиме и состоит из четырех основных этапов. На первом этапе по запросу ЭВМ оператор вводит исходные данные. На втором этапе ЭВМ рассчитывает промежуточные данные для моделирования. На третьем этапе ЭВМ на основе промежуточных данных осуществляет решение системы калибровочных уравнений и рассчитывает калибровочные константы. На четвертом этапе оператор сравнивает полученные результаты с исходными данными и принимает решение о сходимости процедуры калибровки при заданных начальных условиях.

Система измерительных уравнений, на основе которой осуществляется расчет промежуточных данных для моделирования, получена в [3] и имеет вид:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{K_3|1 + A_3\dot{I}|^2 + K_1|1 + A_1\dot{I}|^2}{K_0|1 + A_0\dot{I}|^2 + K_2|1 + A_2\dot{I}|^2}; \\ M_2 = \frac{K_2|1 + A_2\dot{I}|^2 + K_1|1 + A_1\dot{I}|^2}{K_0|1 + A_0\dot{I}|^2 + K_3|1 + A_3\dot{I}|^2}; \\ M_3 = \frac{K_3|1 + A_3\dot{I}|^2 + K_2|1 + A_2\dot{I}|^2}{K_0|1 + A_0\dot{I}|^2 + K_1|1 + A_1\dot{I}|^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{I} = |\dot{I}|e^{j\varphi}$ – комплексный коэффициент отражения нагрузки, которая подключается к преобразователю (ККО); $A_i = |A_i|e^{j\alpha_i}$ – комплексные константы многополюсного преобразователя; K_i – скалярные константы многополюсного преобразователя; $i=0,1,2,3$; $M_k = \operatorname{tg} \psi_1^{(k)}$; $\psi_1^{(k)}$ – аргумент первого коэффициента ДПФ для k -ой импульсной последовательности; $k=1,2,3$.

Определение скалярных констант не вызывает затруднений и осуществляется при использовании согласованной нагрузки в качестве меры полного сопротивления [4]. Основной задачей процедуры калибровки является определение комплексных констант A_i . Алгоритм калибровки основан на лианеризации системы нелинейных относительно искомых комплексных констант калибровочных уравнений. При этом вводятся новые неизвест-

ные, которые представляют собой реальные (X_i), мнимые части (Y_i) и квадраты модулей (Z_i) искомым комплексных констант A_i . Общее количество неизвестных при этом для случая двенадцатиполусного преобразователя равно 12. Система линейных калибровочных уравнений, на основе которой строится процедура моделирования, получена в [4] и имеет вид:

$$\begin{bmatrix} [B]_1 \\ [B]_2 \\ [B]_3 \\ [B]_4 \end{bmatrix} \times [Z_0, \dots, Z_3, X_0, \dots, X_3, Y_0, \dots, Y_3]^T = \begin{bmatrix} [C]_1 \\ [C]_2 \\ [C]_3 \\ [C]_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $[B]_j$ ($j=1,2,3,4$) – матрицы формата 12×3 , соответствующие j -ой образцовой нагрузке и образующие матрицу коэффициентов системы формата 12×12 ; $[C]_j$ – матрицы-столбцы соответствующие j -ой образцовой нагрузке и образующие матрицу-столбец свободных членов системы; T – символ транспонирования.

Матрицы $[B]_j$ и $[C]_j$ определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} |G_j|^2 M_{1j} & -|G_j|^2 K_1 & |G_j|^2 M_{1j} K_2 & -|G_j|^2 K_3 & 2M_{1j}|G_j|\cos\varphi_j & -2K_1|G_j|\cos\varphi_j \\ |G_j|^2 M_{2j} & -|G_j|^2 K_1 & -|G_j|^2 K_2 & |G_j|^2 M_{2j} K_3 & 2M_{2j}|G_j|\cos\varphi_j & -2K_1|G_j|\cos\varphi_j \\ |G_j|^2 M_{3j} & |G_j|^2 M_{3j} K_1 & -|G_j|^2 K_2 & -|G_j|^2 K_3 & 2M_{3j}|G_j|\cos\varphi_j & 2M_{3j} K_1 |G_j|\cos\varphi_j \\ 2M_{1j} K_2 |G_j|\cos\varphi_j & -2K_3 |G_j|\cos\varphi_j & -2M_{1j}|G_j|\sin\varphi_j & 2K_1 |G_j|\sin\varphi_j \\ \Rightarrow -2K_2 |G_j|\cos\varphi_j & 2M_{2j}|G_j|\cos\varphi_j & -2M_{2j}|G_j|\sin\varphi_j & 2K_1 |G_j|\sin\varphi_j \\ -2K_2 |G_j|\cos\varphi_j & -2K_3 |G_j|\cos\varphi_j & -2M_{3j}|G_j|\sin\varphi_j & -2M_{3j} K_1 |G_j|\sin\varphi_j \\ -2M_{1j} K_2 |G_j|\sin\varphi_j & 2K_3 |G_j|\sin\varphi_j \end{bmatrix} = [B]_j. \quad (3) \\ & \Rightarrow \begin{bmatrix} 2K_2 |G_j|\sin\varphi_j & -2M_{2j} K_3 |G_j|\sin\varphi_j \\ 2K_2 |G_j|\sin\varphi_j & 2K_3 |G_j|\sin\varphi_j \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} K_1 + K_3 - M_{1j}(1 + K_2) \\ K_1 + K_2 - M_{2j}(1 + K_3) \\ K_2 + K_3 - M_{3j}(1 + K_1) \end{bmatrix} = [C]_j. \quad (4)$$

Результаты решения системы (2) являются оценками искомым параметров X_i , Y_i . Обозначим эти оценки как $\bar{X}_i$, $\bar{Y}_i$. После решения системы (2) можно определить оценки модулей и аргументов комплексных констант по формулам:

$$|\bar{A}_i| = \sqrt{\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2}; \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_i = \text{angle}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i). \quad (6)$$

В формуле (6) операция “angle” означает взятие аргумента комплексного числа, заданного действительной и мнимой частями, осуществляемое с учетом квадранта в интервале значений $[0, 2\pi)$.

Структурная схема алгоритма приведена на рисунке 1. Алгоритм состоит из восьми блоков. В блоке 1 оператор по запросам ЭВМ вводит модули и аргументы ККО четырех образцовых мер Γ_j ($j=1,2,3,4$). В блоке 2 по запросам ЭВМ оператор вводит скалярные константы K_i , модули $|A_i|$ и аргументы α_i эквивалентных комплексных констант преобразователя ($j=0,1,2,3$). В блоке 3 осуществляется расчет промежуточных значений M_{ij} по формулам (1). В блоке 4 рассчитываются элементы матриц $[B]_j$ и $[C]_j$ по формулам (3), (4) и формируется сводная матрица коэффициентов формата 12×12 системы калибровочных уравнений. В блоке 5 производится решение линейной системы уравнений (2) и определяются оценки реальных и мнимых частей эквивалентных комплексных констант $\bar{X}_i$ и $\bar{Y}_i$. В блоке 6 проводится расчет оценок модулей $|\bar{A}_i|$ и аргументов $\bar{\alpha}_i$ эквивалентных комплексных констант по формулам (5) и (6). Результаты расчета выдаются на экран для принятия решения оператором. В блоке 7 осуществляется оценка сходимости процедуры калибровки. Сходимость процедуры калибровки устанавливается путем сравнения заданных параметров преобразователя $|A_i|, \alpha_i$

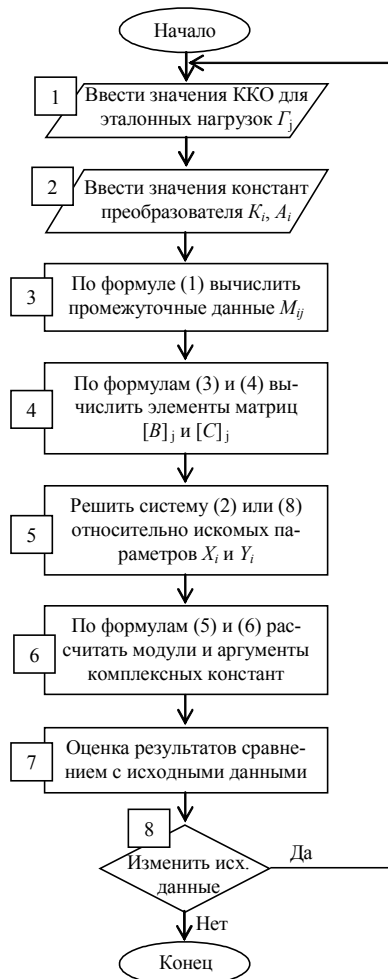


Рисунок 1

с полученными в результате решения системы (2) оценками $|\bar{A}_i|, \bar{a}_i$. Эти величины либо должны точно совпадать, либо их отличие не должно превышать наперед заданную величину. На экран дисплея выводятся все рассчитанные и исходные данные, а также относительные отклонения по модулю и абсолютные отклонения по аргументу. В блоке 8 на основе этих данных оператор принимает решение о сходимости процедуры и о продолжении процедуры моделирования при других исходных данных. Если решение оператора положительное, то осуществляется переход к блоку 1, а если отрицательное – то программа завершает работу.

Разработанный алгоритм реализован в пакете прикладных программ “Mathcad professional-2000”. В блоке 5 решение линейной системы уравнений (2) осуществлялось двумя способами: методом Крамера с вычислением детерминантов матриц; с использованием встроенной функции “Isolve”. При этом наблюдалось полное совпадение результатов решения независимо от применяемого метода. В процессе решения проводился контроль ранга матрицы коэффициентов системы с целью выявления случаев, когда эта матрица плохо обусловлена.

Моделирование проводилось при различных наборах образцовых мер и различных параметрах многополюсного преобразователя. Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанного алгоритма калибровки. При этом было установлено, что процедура обладала сходимостью в подавляющем большинстве случаев. Моделирование позволило обнаружить два случая, при которых наблюдается расходимость. Первый случай соответствует равенству модулей коэффициентов отражения всех четырех образцовых нагрузок, используемых при калибровке: $|\Gamma_1| = |\Gamma_2| = |\Gamma_3| = |\Gamma_4|$. Второй случай соответствует равенству модулей эквивалентных комплексных констант многополюсного преобразователя: $|A_0| = |A_1| = |A_2| = |A_3|$. В этих случаях ранг матрицы коэффициентов становился меньше порядка системы (2), что говорило о наличии множества решений.

Это позволяет при практическом использовании рассматриваемого алгоритма калибровки исключить указанных два случая. Необходимо, чтобы в наборе образцовых мер хотя бы одна мера обладала отличающимся от других мер модулем коэффициента отражения. Также необходимо, чтобы хотя бы один измерительный выход микроволнового преобразователя обладал отличающимся от других выходов коэффициентом направленности.

Проведенное моделирование показало, что разработанный алгоритм имеет вышеуказанные ограничения, которым должен удовлетворять как набор образцовых мер, так и микроволновый преобразователь. Этот факт является нежелательным, поэтому в данной работе проведена доработка алго-

ритма калибровки, которая устраняет указанные ограничения. Плохая обусловленность матрицы коэффициентов линейной системы (2) приводит, как указывалось выше, к появлению множества решений, среди которых имеется и необходимое нам решение. Для того чтобы решение было единственным и правильным необходимо регуляризовать задачу, добавив дополнительные условия, связывающие неизвестные X_i , Y_i , Z_i , входящие в систему. При составлении системы калибровочных уравнений (2) предполагалось, что эти неизвестные являются независимыми. На самом деле они связаны следующим соотношением

$$X_i^2 + Y_i^2 = Z_i. \quad (7)$$

Если теперь в систему уравнений (2) подставить (7), то получим новую систему уравнений, которую запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} [B]_1 \\ [B]_2 \\ [B]_3 \\ [B]_4 \end{bmatrix} \times [Z_0, \dots, Z_3, X_0, \dots, X_3, Y_0, \dots, Y_i]^T = \begin{bmatrix} [C]_1 \\ [C]_2 \\ [C]_3 \\ [C]_4 \end{bmatrix}; \\ X_0^2 + Y_0^2 = Z_0^2; \\ X_1^2 + Y_1^2 = Z_1^2; \\ X_2^2 + Y_2^2 = Z_2^2; \\ X_3^2 + Y_3^2 = Z_3^2. \end{cases} \quad (8)$$

Полученная система содержит 12 линейных уравнений и 4 нелинейных, поэтому ее следует рассматривать как нелинейную и решать итерационными методами. В блоке 5 решение нелинейной системы уравнений осуществлялось двумя способами: с использованием встроенной функции “find”; с использованием встроенной функции “minerr”. При этом наблюдалось полное совпадение результатов решения независимо от применяемого метода. Это говорит о наличии точного результата, поскольку встроенная функция “find” позволяет получить решение только в этом случае. При проведении калибровки в реальных условиях из-за погрешности измерения будут существовать невязки, поэтому предпочтительнее пользоваться встроенной функцией “minerr”, поскольку она обеспечивает нахождение решения даже в этом случае, причем с минимальной среднеквадратической ошибкой.

Следует заметить, что система уравнений (8) обладает 50% избыточностью, поскольку состоит из двенадцати уравнений с восемью неизвестными. Это позволяет сократить минимальное количество образцовых мер до трех. В этом случае количество уравнений в системе (8) сокращается до девяти.

Результаты моделирования подтвердили, что данная процедура калибровки снимает ранее наложенные ограничения на набор образцовых мер и

на параметры многополюсного преобразователя. Это обстоятельство является весьма важным при ограниченных возможностях аттестации мер полного сопротивления. В этом случае в качестве меры можно использовать образцовый короткозамыкатель, подключаемый к преобразователю через образцовые отрезки регулярной линии передачи.

Задачей дальнейших исследований следует считать разработку процедуры моделирования процесса калибровки многополюсного преобразователя с учетом погрешности измерения уровней мощности ответвляемых сигналов, а также с учетом погрешности аттестации образцовых мер.

Библиографический список

1. Engen G.F. On-line accuracy assessment for the dual six-port ANA: background and theory / G.F. Engen // IEEE Trans. IM. — 1987. — V. 36. — № 2. — P. 501–506.
2. Анализ методов калибровки 12-полюсного рефлектометра / В.П. Петров, Ю.В. Рясный, О.Б. Журавлев, В.П. Пологрудов // Измерительная техника. — 1985. — № 10. — С. 40–41.
3. Пат. №2022284, РФ. МКИ G01R 27/06. Способ определения комплексных параметров СВЧ устройств / Ю.Б. Гимпилевич. — Оpub. 30.10.94. — Бюл. № 20. — 14 с.
4. Гимпилевич Ю.Б. Двенадцатиполусный анализатор микроволновых цепей на основе дискретного преобразовании Фурье ответвляемых сигналов и метод его калибровки / Ю.Б. Гимпилевич, Р.С. Бандышев //Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Радиоэлектроника. — 2003. — № 2. — С. 43–50.

Поступила в редакцию 13.02.2003 г.