

УДК 621.3.088

И.Ф. Калимулин, А.О. Мелкозёров

Оптимизация параметров математической модели резистора по критерию соответствия расчетного модуля коэффициента отражения измеренному в диапазоне до 20 ГГц

Выполнена оптимизация параметров математической модели резистора с помощью эволюционной стратегии. Получена эквивалентная схема резистора до 20 ГГц. Показано, что с увеличением бюджета вычислений целевой функции в 7 раз отклонение расчётного модуля коэффициента отражения от экспериментального уменьшилось в 35 раз.

Ключевые слова: эквивалентные схемы, оптимизация, эволюционные стратегии, резистор.

Бортовая аппаратура космических аппаратов, включая низкочастотные блоки, подвержена внешним воздействиям в очень широком спектре частот. В работе [1] результаты измерений напряженности электрического поля, полученные со спутника на расстоянии 360 км от поверхности Земли, показывают, что напряженность электрического поля превышает 100 В/м в области до 10 ГГц, а спектр излучений простирается до 100 ГГц. Следовательно, низкочастотные блоки КА находятся под воздействием высокочастотных наводок [2] и с целью обеспечения ЭМС должны быть исследованы в диапазонах частот до 1, 18, 40 и 100 ГГц [3, 4] либо с помощью натуральных экспериментов, либо посредством имитационного моделирования. Второй способ заключается в расчете временно- и частотного отклика линий передачи печатных узлов БА КА и требует создания математических моделей сосредоточенных компонентов для высоких частот, в частности резисторов.

Цель работы – получить математическую модель резистора по критерию соответствия расчетного модуля коэффициента отражения измеренному в диапазоне до 20 ГГц.

Исходные данные. В качестве исходных данных (рис. 1) использовались результаты измерений для резистора P1-12-0.062 $51 \pm 5\%$ Ом в безвыводном исполнении (тип корпуса 0603), проведенные на двух векторных анализаторах цепей: Wiltron 37369A (в диапазоне от 40 МГц до 20 ГГц) и Rohde-Schwarz ZVA40 (в диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц) [2].

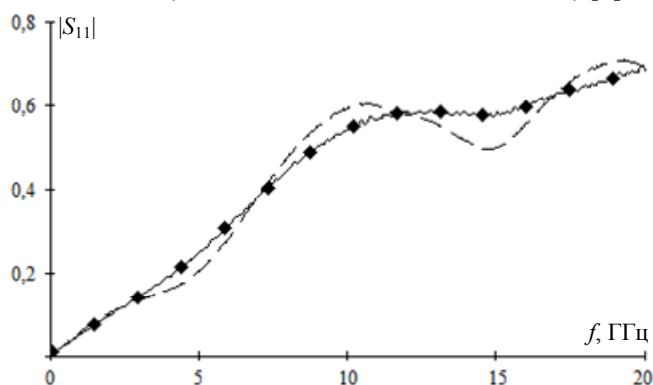


Рис. 1. Модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ резистора P1-12-0.062 $51 \pm 5\%$ Ом в безвыводном исполнении (тип корпуса 0603): результаты измерений на Wiltron 37369A (сплошная линия) и Rohde-Schwarz ZVA40 (пунктирная линия)

Из двух экспериментальных кривых на рис. 1 для создания математической модели была выбрана характеристика, полученная с помощью Wiltron 37369A (сплошная линия). Для ускорения оптимизации из 400 экспериментальных точек в сравнении с расчетной характеристикой эквивалентной схемы используется каждая 30-я точка (показаны на рис. 1 прямоугольниками). При необходимости количество учитываемых экспериментальных точек может быть увеличено путем изменения значения одной переменной в скрипте для моделирования.

Для получения эквивалентной схемы резистора по аналогии с [5] была выбрана схема, состоящая из 3 параллельно включенных RLC-звеньев (рис. 2). Для расчёта использована система TALGAT [6].

Проверка корректности моделирования. С целью проверки корректности моделирования системой TALGAT рассматриваемой эквивалентной схемы резистора было проведено сравнение

результатов вычисления коэффициента отражения S_{11} (рис. 3) в системе TALGAT и ПО Sonnet [7]. Для сравнения на рис. 3 были использованы значения элементов эквивалентной схемы: первое звено – $R_1 = 300$ Ом, $C_1 = 1E-13$ Ф, $L_1 = 9,5E-9$ Гн, второе звено – $R_2 = 1$ Ом, $C_2 = 1E-10$ Ф, $L_2 = 1E-7$ Гн, третье звено – $R_3 = 1$ Ом, $C_3 = 6E-10$ Ф, $L_3 = 9,5E-8$ Гн.

Результаты расчета модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ для эквивалентной схемы резистора, полученные в системе TALGAT и ПО Sonnet (рис. 3), совпадают, что позволяет сделать вывод о корректности результатов моделирования системой TALGAT.

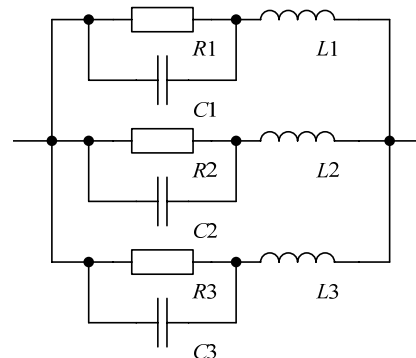


Рис. 2. Принципиальная схема эквивалентной схемы резистора

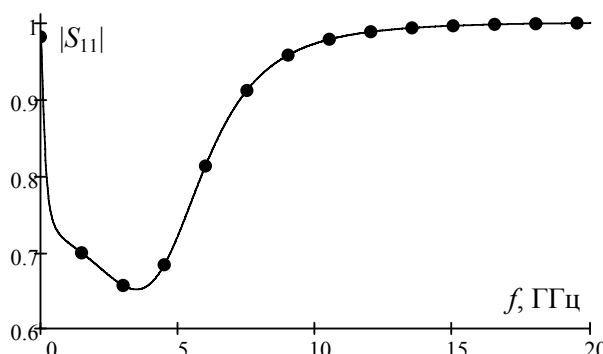


Рис. 3. Результат расчета зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ для эквивалентной схемы резистора от частоты (Гц): в системе TALGAT (сплошная линия), Sonnet (точки)

Оптимизация. После проверки корректности моделирования на основе скрипта системы TALGAT для вычисления $|S_{11}|$ была реализована целевая функция, которая описывает следующую задачу оптимизации

$$F(y) = \sum_y \left(|S_{11}(y_{Wiltron})|_i - |S_{11}(y)_i| \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $|S_{11}(y_{Wiltron})|_i$ – i -я экспериментальная точка $|S_{11}|$, полученная при измерениях с помощью Wiltron 37369A (показаны на рис. 1 прямоугольниками), $|S_{11}(y)_i|$ – соответствующая i -я точка $|S_{11}|$, вычисленная в системе TALGAT для эквивалентной схемы резистора. Таким образом, минимум целевой функции (1) равен нулю и соответствует эквивалентной схеме резистора, вычисленный $|S_{11}|$ которой совпадает с экспериментальными данными $|S_{11}|$ во всех точках.

Для оптимизации целевой функции (1) использована взвешенная эволюционная стратегия с адаптацией ковариационной матрицы – $(5/5_W, 10)$ -АКМ-ЭС [8]. Примеры результатов оптимизации приведены на рис. 4, где знаки + показывают $|S_{11}|$, вычисленный системой TALGAT для начальной точки поиска, × – $|S_{11}|$ для экспериментальных данных (результаты измерений на Wiltron 37369A на рис. 1), ○ – $|S_{11}|$ для оптимальной эквивалентной схемы, полученной после FEs вычислений целевой функции.

На рис. 4, а показан $|S_{11}(y_{opt})|$ эквивалентной схемы резистора (окружности), полученной в результате оптимизации $(5/5_W, 10)$ -АКМ-ЭС с бюджетом 1500 вычислений целевой функции. $|S_{11}(y_{opt})|$ совпадает с результатами измерений (крестики) для ряда частотных точек, соответствующее значение $F(y_{opt}) = 7,76E-3$, значения параметров: $R_1 = 78,2$ Ом, $C_1 = 2,19E-13$ Ф, $L_1 = 2,26E-9$ Гн, $R_2 = 233,5$ Ом, $C_2 = 10E-14$ Ф, $L_2 = 10E-10$ Гн, $R_3 = 235,12$ Ом, $C_3 = 3,43E-12$ Ф, $L_3 = 6E-8$ Гн.

На рис. 4, б $(5/5_W, 10)$ -АКМ-ЭС использовала бюджет из 10000 вычислений целевой функции и получила $|S_{11}(y_{opt})|$, который совпадает с результатами измерений для всех частот до 20 ГГц ($F(y_{opt}) = 2,23E-4$, значения параметров: $R_1 = 139,8$ Ом, $C_1 = 1,53E-13$ Ф, $L_1 = 3,14E-9$ Гн, $R_2 = 306,76$ Ом, $C_2 = 3,17E-14$ Ф, $L_2 = 2E-9$ Гн, $R_3 = 108,98$ Ом, $C_3 = 1,54E-13$ Ф, $L_3 = 5,53E-5$ Гн). Следовательно, $(\mu/\mu_W, \lambda)$ -АКМ-ЭС при увеличении количества вычислений целевой функции сходится к оптимуму целевой функции (1) и позволяет получить параметры эквивалентной схемы резистора по заданной частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$.

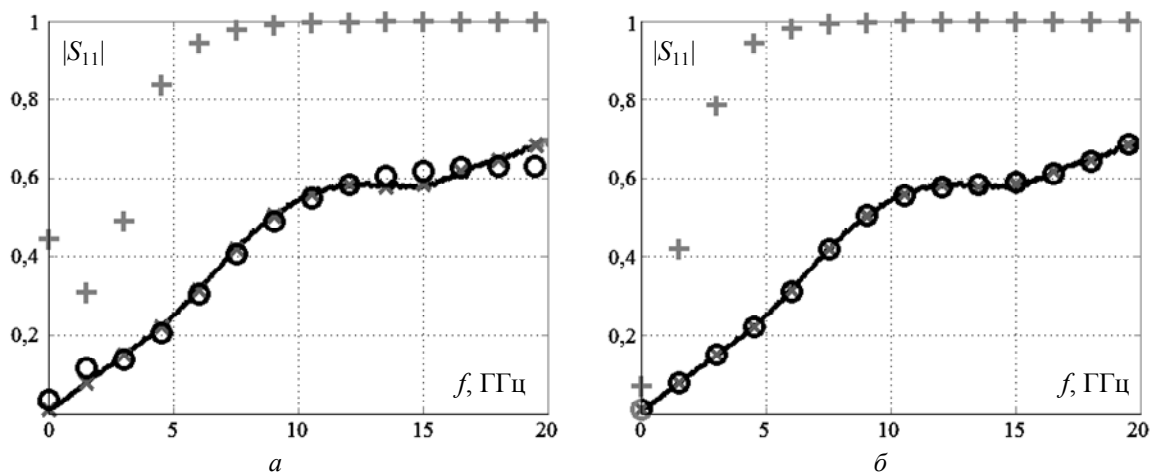


Рис. 4. Модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ для эквивалентной схемы резистора, полученной в результате оптимизации (5/5W, 10)-АКМ-ЭС целевой функции (1): (x) – $|S_{11}|$ для экспериментальных данных, (+) – $|S_{11}(y_{init})|$ для начальной точки поиска, (o) – $|S_{11}(y_{init})|$ для оптимальной эквивалентной схемы. Бюджет вычисления целевой функции составляет: $a - 1500$, $b - 10000$.

Заключение. Получена модель резистора в виде эквивалентной схемы в диапазоне до 20 ГГц. Точность совпадения модуля коэффициента отражения модели резистора $F(y_{opt})=2,23E-4$. Показано, что с увеличением бюджета вычислений целевой функции в 7 раз отклонение расчёта коэффициента отражения от экспериментального уменьшилось в 35 раз (как отношения значений целевой функции).

Работа выполнена в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 09.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», и договора №13.G25.31.0017 от 07.09.2010 между ОАО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева» и Минобрнауки РФ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-01-31110/12).

Литература

1. Heise E.R. Some simple spacecraft considerations / E.R. Heise, R.E. Heise // 2006 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2006. – IEEE, 2006. – P. 182–186.
2. Калимулин И.Ф. Импеданс низкочастотных пассивных компонентов бортовой аппаратуры в диапазоне до 20 ГГц / И.Ф. Калимулин, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 2. – С. 91–97.
3. MIL-STD-461F. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. – 2007.
4. AIAA Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems / AIAA / S-121-2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.emccompliance.com/upload-image/127882503390574.pdf>, свободный (дата обращения: 07.09.2012).
5. Rahimi P.I. A Method to Construct Equivalent Circuit Model From Frequency Responses With Guaranteed Passivity / P.I. Rahimi, C.Y. Chung, M.H. Erfanian, W. Xu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – № 26. – P. 400–409.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610712. TALGAT 2010. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т. и др. Заявка №2011617178. Дата поступления: 26 сентября 2011 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2012 г.
7. Официальный сайт Sonnet Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sonnetsoftware.com/>, свободный (дата обращения: 07.09.2012).
8. Hansen N. A Method for Handling Uncertainty in Evolutionary Optimization With an Application to Feedback Control of Combustion / N. Hansen, A.S.P. Niederberger, L. Guzzella, P. Koumoutsakos // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2009. – № 13. – P. 180–197.

Калимулин Илья Фидаильевич

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 90-01-45

Эл. почта: ilirium115@gmail.com

Мелкозёров Александр Олегович

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 90-01-45

Эл. почта: alexander.melkozerov@gmail.com

Kalimulin I.F., Melkozerov A.O.

Optimization of the parameters of the resistor mathematical model by compliance of the calculated reflection ratio magnitude with the measured one in the range up to 20 GHz

In this work, optimization of the parameters of the resistor mathematical model using evolutionary strategy has been performed. An equivalent circuit of the resistor up to 20 GHz has been obtained. We show that with the increase in the budget of objective function computations in 7 times, the deviation of the calculated reflection ratio magnitude decreases from the experimental one in 35 times.

Keywords: equivalent circuit, optimization, evolution strategies, resistor.
