

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ПОГОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МНОГОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ TALGAT

Р. Р. Мусабаев, Е. В. Лежнин, С. П. Куксенко (научный руководитель)

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР
E-mail: rustam-koktem@mail.ru

Рассматривается вычисление матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи. Выполнена реализация алгоритма вычисления этой матрицы в системе TALGAT. Приведены результаты тестирования для одиночной и связанных микрополосковых линий. Показана согласованность результатов.

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) всё больше используется в самых различных сферах инфраструктуры современного общества, в том числе в управлении критичными системами в военной, атомной, транспортной и космической отраслях. Проводится много исследований, в которых моделируются устройства защиты на связанных линиях, например, модальные фильтры, для которых выявлено сильное влияние потерь на амплитуду сигнала на выходе [1]. Между тем точная оценка потерь в проводниках, в общем случае отрезка многопроводной линии передачи (МПЛП), описываемая его матрицей \mathbf{R} , остается сложным вопросом. Обзор подходов к ее вычислению [2] показал целесообразность использования метода, предложенного в работе [3].

Цель данной работы – представить программную реализацию алгоритма [4] вычисления матрицы погонных сопротивлений МПЛП в системе TALGAT [5] и первые результаты ее тестирования.

Реализация алгоритма

Выполнена реализация алгоритма вычисления матрицы \mathbf{R} [4]. Там, где требуется вычислить матрицу \mathbf{L} используются функции системы TALGAT [5].

В алгоритме применяется расширение границ проводника на величину Δn , которое реализовано программно. Для этого задается пользовательское значение Δn , либо используется значение Δn по умолчанию, равное 0,1 от минимального параметра структуры. Для вычисления значения по умолчанию выполняется поиск границы с минимальной длиной, значение минимального параметра приравнивается к значению минимальной границы.

Чтобы расширить проводник i , где $i = 1, 2, \dots, N$, N – число проводников МПЛП, используется масштабирование относительно центра проводника, которое преобразует координаты проводника $p_{1,i}, p_{2,i}, \dots, p_{M,i}$, где M – число координат проводника i в координаты $p_{1,i}', p_{2,i}', \dots, p_{N,i}'$ таким образом, чтобы получить проводник, увеличенный на Δn со всех сторон. Для этого вычисляются коэффициенты масштабирования:

$$f_i^x = \frac{l_i^x + 2\Delta n}{l_i^x}; \quad f_i^y = \frac{l_i^y + 2\Delta n}{l_i^y}, \quad (1)$$

где $l_i^x; l_i^y$ – ширина и толщина проводника i .

Далее вычисляется центральная координата проводника $p_{c,i}$ и составляется матрица преобразования:

$$\begin{array}{ccc} f_i^x & 0 & 0 \\ 0 & f_i^y & 0, \\ p_{c,i}^x(1-f_i^x) & p_{c,i}^y(1-f_i^y) & 1 \end{array} \quad (2)$$

где $p_{c,i}^x$ и $p_{c,i}^y$ – составляющие x и y координаты $p_{c,i}$.

Матрица преобразования может быть применена следующим образом:

$$\begin{aligned} p_{j,i}^{x'} &= f_i^x p_{j,i}^x + p_{c,i}^x (1 - f_i^x); \\ p_{j,i}^{y'} &= f_i^y p_{j,i}^y + p_{c,i}^y (1 - f_i^y), \end{aligned} \quad (3)$$

где $j = 1, 2, \dots, M$.

Для расширения границ проводника необходимо применить матрицу преобразования (2) к каждой координате проводника. Расширение границы бесконечной земли выполняется смещением всех границ структуры к линии бесконечной земли на Δl .

Тестирование алгоритма

Выполнена апробация реализованного алгоритма на примере одиночной микрополосковой линии (МПЛ) с параметрами из работы [4], поперечное сечение которой приведено на рис. 1, а, где $w = h = 2$ мм, $t = 0,5$ мм. Результаты представлены в табл. 1.

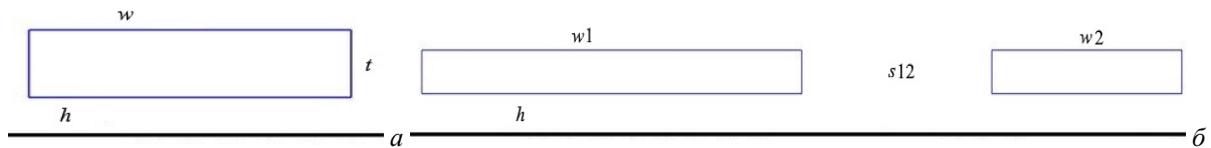


Рис. 1. Примеры одиночной (а) и связанных (б) МПЛ [4]

Таблица 1

Значение R для одиночной МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на Δl . Сравнение ручного и программного вычислений

Δl , мкм	R, Ом/м							
	Ручное вычисление				Программное вычисление			
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	6,25 мкм	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	6,25 мкм
0,1	9,12403	9,12403	8,91667	9,12403	9,08166	9,08293	9,08344	9,08364
1	9,06182	9,08256	9,06182	9,08256	9,076	9,07727	9,07777	9,07797
10	9,02035	9,02865	9,0245	9,0245	9,02028	9,02151	9,022	9,02219
100	8,55337	8,54715	8,54445	8,54362	8,54131	8,54224	8,54261	8,54276

Анализ данных табл. 1 показывает, что сегментация слабо влияет на значение **R**. Влияние значения Δl также мало (за исключением его максимального значения). Сравнение ручного и программного вычислений показывает, что программная реализация в системе TALGAT выполнена корректно.

Также было выполнено сравнение полученных результатов для связанных МПЛ с параметрами из работы [3]. Поперечное сечение приведено на рис. 1, б, где $w_1 = 10$ мм, $w_2 = s_{12} = h = 5$ мм и $t = 1$ мм. Результаты представлены в табл. 2–4. Из полученных данных также можно сделать вывод, что сегментация и Δl почти не влияют на значения элементов **R**. Программная реализация также корректна.

Таблица 2

Значение R11 для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на Δl . Сравнение ручного и программного вычислений

Δl , мкм	R11, Ом/м						
	Ручное вычисление			Программное вычисление			
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	6,25 мкм
0,1	2,48837	2,28101	2,48837	2,45833	2,45849	2,45855	
1	2,46764	2,4469	2,4469	2,45792	2,45808	2,45814	
10	2,45519	2,45312	2,45312	2,45382	2,45398	2,45404	
100	2,41642	2,416	2,4158	2,41547	2,41561	2,41566	

Таблица 3

Значение R_{22} для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на Δl . Сравнение ручного и программного вычислений

Δl , мкм	R_{22} , Ом/м					
	Ручное вычисление			Программное вычисление		
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм
0,1	3,73256	3,73256	3,73256	3,79811	3,79836	3,79846
1	3,79477	3,79477	3,79477	3,79701	3,79725	3,79735
10	3,78647	3,78855	3,78647	3,78604	3,78628	3,78638
100	3,6859	3,68487	3,68445	3,6838	3,68401	3,68409

Таблица 4

Значение R_{12} , R_{21} для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении опорного проводника на Δl . Сравнение ручного и программного вычислений

Δl , мкм	R_{12}, R_{21} Ом/м					
	Ручное вычисление			Программное вычисление		
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм
0,1	0,35252	0,37326	0,37326	0,363796	0,363808	0,363812
1	0,36289	0,36289	0,36496	0,363798	0,36381	0,363814
10	0,36372	0,36392	0,36392	0,36382	0,363832	0,363836
100	0,36403	0,36403	0,36405	0,364027	0,364038	0,364043

Таким образом, можно сделать вывод, что алгоритм [4], реализованный в системе TALGAT, дает приемлемые результаты для \mathbf{R} . Его дальнейшее использование представляется возможным.

Программная реализация выполнена в рамках государственного задания № 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки России. Тестирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

Список литературы

1. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Калимулин И.Ф. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: моногр. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. 288 с.
2. Мусабаев Р.Р., Заболоцкий А.М. Способы вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи // XII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (ЭССУ-2016). Томск. 16–18 нояб. 2016 г. Т. 1. С. 215–219.
3. Matthaei G.L., Chinn G.C. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines // Microwave Symposium Digest. 1992. P. 1353–1354.
4. Мусабаев Р.Р. Алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 10–12 мая 2017 г. Принято к публикации.
5. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2 (36). С. 45–50.