



б

Рис. 4 (окончание). Фотошаблон (а) и внешний вид (б) разработанной ПП

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кропотов В.В., Газизов Т.Т. Конструктив блока модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Научная сессия ТУСУР–2016: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 310–313.

2. Кропотов В.В., Куксенко С.П. Блок модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. (25–27 ноября 2015 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 36–39.

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МНОГОКРАТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕМКОСТНОЙ МАТРИЦЫ ПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ

*К.А. Лемешко, магистрант; Р.Р. Ахунов, аспирант;*

*М.С. Танаева, О.К. Шпякина, студентки*

*Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

*Томск, ТУСУР, каф. ТУ, ksu\_gutnik@mail.ru*

Использование полосковых структур позволяет разрабатывать более совершенную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) различного назначения, а анализ связей в них важен для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Для уменьшения финансовых и временных затрат широко используется имитационное моделирование. При этом основные вычислительные затраты приходятся на решение

системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), особенно при выполнении многовариантного анализа. Так, например, при учете частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ( $\epsilon_r$ ), для каждой частотной точки диапазона вычисляется емкостная матрица, для чего необходимо решить СЛАУ с различными правыми частями. При этом изменяющиеся от матрице к матрице элементы, отвечающие подынтервалам диэлектрик–диэлектрик, располагаются на части главной диагонали. С учетом данной специфики в работе [1] предложен алгоритм, основанный на блочном LU-разложении. В работе [2] предложен алгоритм многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя и получены аналитические оценки ускорения за счет его использования. Данный алгоритм также учитывает специфику изменяемых элементов матрицы СЛАУ. Так, при изменении диэлектрического слоя изменяемые элементы находятся только в правых столбцах и нижних строках матрицы, что позволяет также использовать блочное LU-разложение. Полученные аналитически и предварительные вычислительные оценки показали его эффективность. Однако точные (подробные) вычислительные оценки не получены. Между тем они важны для оценки эффективности работы алгоритма в различных математических системах.

Цель работы – оценка эффективности алгоритма многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя.

Модель многократного решения СЛАУ с несколькими правыми частями можно представить в матричном виде

$$\mathbf{S}_k \boldsymbol{\Sigma}_k = \mathbf{V}_k,$$

где  $\mathbf{S}_k$  – квадратная и плотная матрица порядка  $N$ , являющаяся результатом применения метода моментов к анализируемой структуре;  $\mathbf{V}_k$  – неизменная в ходе вычислений матрица размера  $N \times N_{\text{COND}}$ , состоящая из задаваемых потенциалов на подобластях, на которые разбиты границы структуры,  $\boldsymbol{\Sigma}_k$  – искомая матрица размера  $N \times N_{\text{COND}}$ , дающая распределение плотности заряда на этих границах;  $N_{\text{COND}}$  – количество проводников, не считая опорного,  $k = 1, 2, \dots, m$ , где  $m$  – число решаемых СЛАУ. Порядок матрицы СЛАУ складывается из количества подобластей на границах проводник–диэлектрик и диэлектрик–диэлектрик, а элементы матрицы вычисляются из параметров этих подобластей. Количество неизменяемых подобластей далее обозначено через  $N_A$ .

Для решения матричных уравнений широко используются такие системы, как Matlab, Octave, Scilab и др. Данные системы отличаются

используемыми низкоуровневыми библиотеками матричных операций, что дает различие в их производительности. Поэтому для широты эксперимента алгоритм многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя (далее – алгоритм) был реализован в трех упомянутых системах. Для проведения вычислительного эксперимента использована рабочая станция (PC) с характеристиками: ОС – Microsoft Windows 8.1, ЦПУ – AMD A8-5550 APU 2,10 GHz, ОЗУ – 8 Гб.

### Ускорение за счет использования алгоритма

Оценка	<i>m</i>									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>N</i> = 1000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 900)										
Аналитика	1,77	2,39	2,70	2,89	3,02	3,11	3,17	3,23	3,27	3,30
Matlab	1,26	2,31	2,45	2,65	2,45	2,90	2,80	2,93	2,76	2,76
Octave	1,67	4,35	4,81	5,08	5,30	5,45	5,43	5,54	5,60	5,61
Scilab	2,43	2,65	3,06	3,09	3,17	3,34	3,51	3,52	3,80	3,67
<i>N</i> = 3000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 2700)										
Аналитика	1,77	2,38	2,70	2,88	3,01	3,10	3,17	3,22	3,27	3,30
Matlab	1,56	2,03	2,52	2,84	3,15	3,24	2,97	3,25	2,98	3,04
Octave	2,57	3,49	4,39	4,73	4,99	5,18	4,96	5,10	5,26	4,44
Scilab	2,31	3,66	3,86	4,65	4,55	4,50	4,68	4,71	4,77	4,60
<i>N</i> = 1000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 990)										
Аналитика	2,40	4,49	6,31	7,92	9,35	10,63	11,78	12,83	13,78	14,64
Matlab	2,02	2,99	3,03	3,56	3,73	3,87	3,91	4,04	4,05	4,15
Octave	4,06	5,60	7,25	7,99	8,52	9,03	9,35	9,78	9,72	10,10
Scilab	2,54	3,27	3,76	3,94	4,12	4,20	3,94	4,45	4,54	4,36
<i>N</i> = 3000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 2970)										
Аналитика	2,40	4,47	6,29	7,90	9,33	10,61	11,76	12,80	13,75	14,61
Matlab	1,92	3,57	4,54	5,01	5,52	6,37	6,69	6,98	7,16	7,09
Octave	3,11	5,67	7,32	8,95	10,06	10,83	10,69	11,50	12,18	12,30
Scilab	2,29	4,51	5,29	6,07	6,46	7,01	7,35	7,55	7,39	7,74
<i>N</i> = 1000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 999)										
Аналитика	2,50	4,96	7,39	9,78	12,13	14,46	16,75	19,00	21,23	23,42
Matlab	2,23	3,32	3,92	4,28	4,50	5,01	5,18	5,24	5,33	5,50
Octave	3,99	6,11	7,39	8,28	8,48	9,37	9,76	9,86	10,38	10,66
Scilab	2,21	4,23	4,90	5,41	6,19	6,53	7,26	7,08	7,49	7,76
<i>N</i> = 3000 ( <i>N<sub>A</sub></i> = 2997)										
Аналитика	2,49	4,95	7,37	9,75	12,10	14,42	16,70	18,95	21,17	23,35
Matlab	2,05	4,14	5,44	6,58	7,37	8,05	8,16	8,57	8,83	7,06
Octave	3,11	5,30	7,78	9,90	11,25	12,03	13,36	13,79	14,44	14,71
Scilab	2,61	4,33	5,79	6,61	6,82	7,23	7,75	7,98	7,95	8,17

В таблице приведены аналитическая и вычислительные оценки эффективности работы алгоритма: отношение времени его работы ко времени работы алгоритма, основанного на последовательном LU-разложении, полученные в Matlab, Octave и Scilab при  $N_{\text{COND}} = 2$ ,  $N_A/N = 0,9$  ( $N = 1000$ ,  $N_A = 900$  и  $N = 3000$ ,  $N_A = 2700$ ),  $N_A/N = 0,99$  ( $N = 1000$ ,  $N_A = 990$  и  $N = 3000$ ,  $N_A = 2970$ ) и  $N_A/N = 0,999$  ( $N = 1000$ ,  $N_A = 999$  и  $N = 3000$ ,  $N_A = 2997$ ).

Видно, что при  $N_A/N = 0,9$  в обоих случаях (практически при любом  $m$ ) вычислительные оценки, полученные с помощью Matlab, ниже аналитических. При этом оценки при использовании Octave и Scilab выше аналитических. При  $N_A/N = 0,99$  ускорение при использовании Matlab и Scilab ниже полученного аналитически во всем диапазоне  $m$  (в 2–3 раза при  $m = 100$ ). В случае использования Octave в начале диапазона вычислительные оценки выше аналитических, а в конце – ниже (для выявления причины требуется дополнительное исследование). При  $N_A/N = 0,999$  наблюдаются поведения вычислительных оценок аналогично предыдущему случаю. Однако ускорение уменьшается в 3–4 раза при  $m = 100$ .

Полученные результаты подтверждают, что при росте  $N_A/N$  выигрыш за счет использования алгоритма растет, вне зависимости от используемой системы. Однако он может быть в 4 раза меньше, чем по аналитической оценке. Кроме того, выигрыш, полученный в разных математических пакетах, может различаться до 2 раз. Одним из факторов, влияющих на ускорение, полученное в используемых системах, является различие в реализации матрично-матричных операциях.

Вычислительный эксперимент выполнен за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Совершенствование алгоритма вычисления методом моментов ёмкостных матриц системы проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости диэлектриков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 10. – С. 13–21.
2. Суровцев Р.С. Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного LU-разложения при решении СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. Т. 13. – №4. – С. 375–384.