

Руст.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко

Комплексные оценки ускорения при использовании алгоритма перенумерации при многовариантном анализе полосковых структур

Получены комплексные оценки ускорения при использовании алгоритма перенумерации при многовариантном анализе полосковых структур методом моментов. Выполнено сравнение аналитических и вычислительных оценок.

Ключевые слова: метод моментов, полосковые структуры, системы линейных алгебраических уравнений, многовариантный анализ, блочное LU-разложение.

При разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) различного назначения использование полосковых структур позволяет повысить её характеристики. При их проектировании широко используют квазистатический подход на основе вычисления матриц погонных параметров и, в частности, матрицы электростатической (С) индукции на основе данных о проводниках и диэлектриках сегментированной (дискретизированной) модели методом моментов. Для повышения эффективности этого подхода требуется уменьшать его вычислительные затраты. При этом основные затраты приходятся на решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Поэтому необходимо совершенствование методов её решения, что подтверждается большим количеством публикаций на данную тему.

Для вычисления матрицы С необходимо решить СЛАУ вида $S\Sigma = V$, где S – плотная и квадратная матрица порядка N; V – матрица из задаваемых потенциалов на границах (интервалах) моделируемой структуры, а искомая матрица Σ даёт распределение плотности заряда на них. Алгоритм многократного решения СЛАУ, основанный на блочном LU-разложении, предложен в работе [1]. Недостатком данного алгоритма является применение его только при изменении диэлектрического слоя. Для возможности его использования при изменении произвольных параметров структуры предложен

алгоритм перенумерации [2]. Однако не были получены комплексные оценки ускорения при его использовании.

Цель работы – получение комплексных оценок ускорения при использовании алгоритма перенумерации при многовариантном анализе полосковых структур.

Алгоритм многократного решения СЛАУ, основанный на блочном LU-разложении, позволяет при многократном (m) изменении высоты слоя диэлектрика переформировывать не всю матрицу S, а только её блоки B, C и D (рис. 1). Блок A содержит элементы, соответствующие границам проводник-проводник; B – проводник-диэлектрик; C – диэлектрик-проводник и D – диэлектрик-диэлектрик.

Для ясности дальнейшего изложения приведем данный алгоритм (N_{COND} – число проводников структуры, не считая опорного). Выражения для вычисления элементов матрицы S приведены в [3].

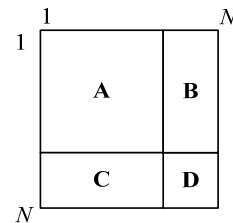


Рис. 1. Структура матрицы S при изменении высоты слоя диэлектрика

Алгоритм вычисления m емкостных матриц

1. Вычислить элементы матрицы S_1 (размера $N \times N$).
2. Изменить нумерацию границ структуры так, чтобы подынтервалы, соответствующие изменяющимся строкам и столбцам матрицы S_1 , нумеровались последними.
3. Вычислить $A_1 = A_1^{-1}$ (размеры блока $N_A \times N_A$).
4. Вычислить элементы матрицы воздействия V_k .
5. $X_0 = A_1 V_0$ (размер блоков X_0 и $V_0 - N_A \times N_{COND}$).
6. Для k от 1 до m:
 7. $B_k = A_1 V_k$;
 8. $D_k = D_k - C_k B_k$;
 9. $X_{1k} = V_1 - C_k X_0$ (размер блоков X_{1k} и $V_1 - N_D \times N_{COND}$);
 10. $\Sigma_{1k} = D_k^{-1} X_{1k}$;
 11. $\Sigma_{0k} = X_0 - B_k \Sigma_{1k}$;
 12. Вычислить элементы емкостной матрицы C_k .
 13. Если при $k < m$ вычислить элементы изменяющихся блоков B_{k+1} , C_{k+1} , D_{k+1} .
 14. Увеличить k.

Арифметическая сложность (здесь и далее учитывались только операции сложения, вычитания, деления, умножения) шагов алгоритма, относящихся к решению СЛАУ, сведена в табл. 1 (соответствующие нижние индексы соответствуют блокам матрицы **S**) [4]. Сложность алгоритма последовательного LU-разложения определяется затратами на операции прямого (Q_{FW}) и обратного ходов (Q_{BW}):

$$Q_{FW} = \frac{4N^3 - 3N^2 - N}{6}, \quad Q_{BW} = 2N^2 - N.$$

При этом затраты на формирование матрицы **S**

$$Q_S = \frac{1325}{3}N^2 + \frac{29}{3}NN_g + 11N + \frac{62}{3}N_g + \frac{49}{3}.$$

Тогда общая сложность вычисления m емкостных матриц с помощью последовательного LU-разложения составляет

$$Q_{LU} = m(Q_S + Q_{FW} + N_{COND}Q_{BW}).$$

Таблица 1

Оценки арифметической сложности шагов алгоритма

№ шага	Арифметическое действие	Арифметическая сложность (Q)
Однократно выполняемые операции		
3	$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_1^{-1}$	$Q_3 = \frac{8}{3}N_A^3 - \frac{3}{2}N_A^2 - \frac{1}{6}N_A$
5	$\mathbf{X}_0 = \mathbf{A}_1 \mathbf{V}_0$	$Q_5 = N_A N_{COND} (2N_A - 1)$
m -кратно выполняемые операции		
7	$\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_k$	$Q_7 = N_D N_A (2N_A - 1)$
8	$\mathbf{D}_k = \mathbf{D}_k - \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k$	$Q_8 = 2N_A N_D^2$
9	$\mathbf{X}_{1k} = \mathbf{V}_1 - \mathbf{C}_k \mathbf{X}_0$	$Q_9 = 2N_A N_D N_{COND}$
10	$\mathbf{\Sigma}_{1k} = \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{X}_{1k}$	$Q_{10} = \frac{8}{3}N_D^3 + N_D^2 \left(2N_{COND} - \frac{3}{2} \right) + N_D \left(N_{COND} - \frac{1}{6} \right)$
11	$\mathbf{\Sigma}_{0k} = \mathbf{X}_0 - \mathbf{B}_k \mathbf{\Sigma}_{1k}$	$Q_{11} = 2N_A N_D N_{COND}$

В общем случае при изменении параметров структуры изменяемые элементы матрицы **S** находятся в произвольных местах (рис. 2, а). При использовании перенумерации изменяющиеся элементы располагаются в последних строках и столбцах матрицы **S** (рис. 2, б), в результате чего становится возможным использование алгоритма 1 (при этом N_s соответствует N_A).

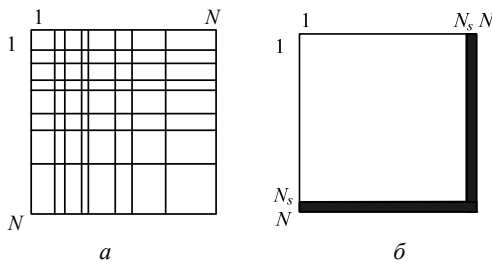


Рис. 2. Структура матрицы **S**: без перенумерации (а) и после перенумерации (б) (строки и столбцы, содержащие изменяемые элементы, схематично выделены чёрным)

При перенумерации формируется структура данных в виде ассоциативного массива, позволяю-

щего получить соответствие между «старыми» (до перенумерации) номерами интервалов изменяемых границ и «новыми» (после перенумерации). При этом сложность оценивается в N_g операций, где N_g – количество интервалов (границ) структуры. Для обратного соответствия формируется еще один ассоциативный массив с такими же затратами. Также формируется массив для хранения «старых» индексов изменяемых подынтервалов (N_D операций) и массив для установления соответствия между «старыми» номерами подынтервалов и «новыми» (N операций). Таким образом, сложность алгоритма перенумерации оценивается выражением

$$Q_2 = 2N_g + N + N_D.$$

Затраты на первое формирование матрицы **S** (шаг 1 алгоритма) совпадают с затратами на её формирование при использовании последовательного LU-разложения, т.е. $Q_1 = Q_S$, а затраты на переформирование блоков **B**, **C**, **D** оцениваются следующим выражением:

$$Q_{13} = \frac{1325}{3}(N^2 - N_A^2) + \frac{29}{3}NN_g + 11N + \frac{62}{3}N_g + \frac{49}{3}.$$

Тогда аналитическое ускорение за счет использования перенумерации и блочного LU-разложения оценивается следующим выражением (затраты Q_4 и Q_{12} не учитывались ввиду их малости):

$$\beta_Q = \frac{Q_{LU}}{Q_{BLU}} = \frac{Q_{LU}}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5 + m \sum_{i=7}^{11} Q_i + (m-1)Q_{13}}.$$

Для тестирования выполнено моделирование двух- и трехпроводной полосковых линий передачи (рис. 3) в системе TALGAT [5]. Геометрические параметры структуры 1: $w = 1890$ мкм, $s = 900$ мкм, начальная толщина проводника и сплошных проводящих областей $t = 35$ мкм, толщина подложки $h = 290$ мкм, порядок матрицы $N = 1100$. Параметры структуры 2: $w = 8$ мкм, $s = 10$ мкм, начальная толщина проводников $t = 6$ мкм, $h_1 = 6$ мкм, $h_2 = 11$ мкм, порядок матрицы $N = 292$. При вычислениях использовался персональный компьютер с параметрами: платформа – Intel(R) Core(TM) i7 CPU 970; частота процессора – 3,20 ГГц; объем ОЗУ – 24 Гбайт; число ядер – 8; операционная система – Windows 10×64.

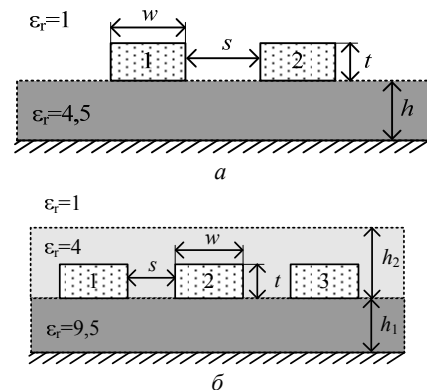


Рис. 3. Двух- (а) и трехпроводная (б) полосковые линии передачи (1, 2, 3 – проводники)

В табл. 2 приведены оценки ускорения многократного вычисления матрицы S за счет использования алгоритмов перенумерации элементов матрицы СЛАУ и блочного LU -разложения для ее решения. Сравнение выполнено с исходным алгоритмом вычисления емкостной матрицы, основанным на последовательной версии LU -разложения для решения СЛАУ, при изменении толщины проводников для структуры 1, в которой число подынтервалов $N = 1100$. Вычисления выполнялись при изменении толщины одного из проводников. Количество изменений составляло 2^k . Отношение N_A/N характеризует количество изменяемых элементов матрицы. Для первой структуры оно составило 0,73, для второй – 0,82. Оценки приведены с учетом затрат на формирование матрицы S и без учета. Аналогичные результаты для структуры 2 ($N=1700$) сведены в табл. 3.

Таблица 2
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы S для двухпроводной полосковой линии передачи при $N_A/N=0,73$

k	Аналитические		Вычислительные
	без Q_S, Q_1, Q_{13}	с Q_S, Q_1, Q_{13}	
5	1,38	1,59	1,93
6	1,43	1,64	1,93
7	1,46	1,66	1,97
8	1,47	1,67	2,01

Таблица 3
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы S для трехпроводной полосковой линии передачи при $N_A/N=0,82$

k	Аналитические		Вычислительные
	без Q_S, Q_1, Q_{13}	с Q_S, Q_1, Q_{13}	
4	1,68	1,86	2,75
5	1,90	2,07	2,83
6	2,03	2,20	2,72
7	2,11	2,27	2,78
8	2,15	2,30	2,68
9	2,17	2,32	2,69

Из табл. 2 видно, что оценки хорошо согласуются между собой. С учетом затрат на формирова-

ние матрицы S расхождение между аналитическими и вычислительными оценками составляет порядка 17%. Для трехпроводной линии (см. табл. 3) оценки в целом согласуются, а наибольшее расхождение составляет (с учетом затрат на формирование матрицы S) 32%. Таким образом, полученные оценки показывают, что для рассмотренных структур использование перенумерации позволяет ускорить многократное вычисление матрицы S порядка 2 раз. Также можно сделать вывод, что чем больше отношение N_A/N , тем выше эффективность применения перенумерации с точки зрения минимизации временных затрат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. 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, Газизов Т.Р. // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13, №4. – С. 375–384.
2. Газизов Руст. Р., Лежнин Е.В., Куксенко С.П. Оценки использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур // Матер. науч.-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика–2017»: сб. ст. – Москва, Зеленоград, 19–20 апреля 2017 г. – М.: МИЭТ, 2017. – С. 14–20.
3. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 22 с.
4. Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Аналитическая оценка вычислительных затрат на решение СЛАУ при многократном вычислении емкостной матрицы в диапазоне изменения диэлектрической проницаемости диэлектриков // Зап. научн. семин. ПОМИ. – 2014. – Т. 428. – С. 196–207.
5. Куксенко С.П. 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 упр. и радиотехники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

УДК 621.371.32

Р.Р. Хажибеков

Оптимизация параметров встречно-штыревой топологии модального фильтра для Ethernet 100 Мбит/с

Выполнена оптимизация модального фильтра со встречно-штыревой топологией в области связи. Получены параметры для МФ, позволяющего защитить оборудование Ethernet 100 Мбит/с от сверхкороткого импульса длительностью до 2 нс.

Ключевые слова: устройство защиты, модальный фильтр, оптимизация, разность задержек мод.

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от сверхкороткого импульса (СКИ) предложены устройства защиты – модальные фильтры (МФ),

основанные на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за разности задержек мод [1]. Одним из