

УДК 621.3.011

Р.И. Аширбакиев, В.К. Салов

Адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации границ проводников и диэлектриков в задачах электростатики

Предложен адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации границ проводников и диэлектриков при решении задач электростатики. Разработан алгоритм для двумерной задачи. Выполнен вычислительный эксперимент. Показана эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: электростатика, метод моментов, сегментация, TALGAT.

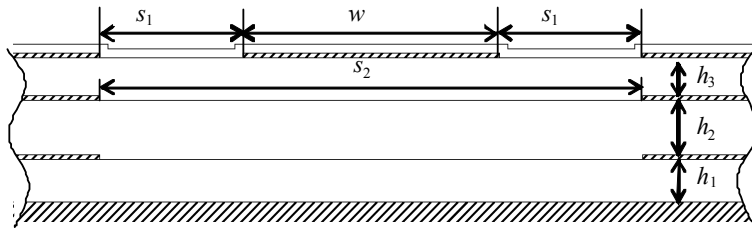
Численное решение задач электростатики часто сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) $S\sigma = v$, где S – матрица размером $N \times N$, описывающая структуру, σ – искомый вектор плотности заряда на проводниковых и диэлектрических границах, а v – вектор заданных напряжений. Границы структуры при этом разбиваются на N сегментов, выбор длины которых влияет на размер матрицы S и точность вычисления параметров. Уменьшение длины сегмента увеличивает точность вычисления, но при этом также увеличивается N . Как известно, при использовании прямых методов время, требуемое на решение СЛАУ, пропорционально N^3 и может быть велико.

Потребность в уменьшении вычислительных затрат моделирования заставляет пристальнее рассмотреть возможность использования всех скрытых ресурсов. Один из них – выбор сегментации. Возможность получения приемлемых результатов даже при самой грубой сегментации делает целесообразным начало моделирования именно с неё, поскольку это моделирование требует минимальных затрат. (Порядок матрицы СЛАУ при этом может составлять всего лишь единицы-десятки, а значит, решение СЛАУ может быть очень быстрым.) Необходимость получения более точных результатов делает естественным *итерационный* характер выбора сегментации, т.е. повтор вычислений с учащением сегментации до получения решения с заданной точностью. (Возрастание затрат будет небольшим, поскольку порядок матрицы будет все ещё довольно мал: десятки-сотни.) При этом естественно использовать результаты предыдущей итерации, например вычисленные плотности заряда на границах для неравномерной сегментации (более частой в местах более сильного изменения плотности).

Отметим несколько факторов, связанных с точностью моделирования. Прежде всего, должна контролироваться точность получения именно требуемой характеристики (например, задавая значение её текущего относительного изменения), поскольку влияние сегментации на различные характеристики может очень сильно отличаться. Например, влияние на первичные параметры (матрицы погонных коэффициентов) может быть сильным, на вторичные (задержки или параметры отклика) – слабым или также сильным (если вычитаются большие значения, как в дальней перекрестной помехе). Другим аспектом является различное влияние на точность заданной характеристики сегментации различных границ структуры, определяющее тонкий *адаптивный* выбор сегментации на каждой из них. В частности, естественно отдельно контролировать сегментацию при вычислении индуктивной матрицы (на которую влияет сегментация границ только проводников) и емкостной матрицы (на которую влияет сегментация границ и проводников, и диэлектриков). Таким образом, для *оптимальной* (по критерию минимизации N при заданной точности моделирования за счёт выбора её густоты на различных границах) сегментации целесообразно отдельно сегментировать границы проводников и диэлектриков, а также границы каждого из них, поскольку их влияние на точность моделирования будет разным.

В результате затраты на несколько итераций с увеличивающимся, но остающимся малым, порядком СЛАУ дадут его оптимальное значение, значительно экономящее вычислительные затраты по сравнению с заведомо большим, полученным при равномерной автосегментации всех границ. Использование адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации (АИВОС) представляется эффективным, особенно для моделирования в реальном времени.

Для двумерной задачи в системе TALGAT [1] проведен вычислительный эксперимент, показывающий эффективность АИВОС. Выбрана структура, поперечное сечение которой показано на рис. 1. Геометрические параметры структуры взяты из фрагмента реальной печатной платы: ширина проводника $w = 890$ мкм, зазоры $s_1 = 500$ мкм, $s_2 = 1890$ мкм, толщина проводника и сплошных проводящих областей $t = 35$ мкм, толщина препрегов $h_1 = h_3 = 144$ мкм, толщина подложки $h_2 = 220$ мкм. Толщина паяльной маски принята равной $h_M = 30$ мкм. Ширина сплошных проводящих областей



принята равной $5w$. Для уменьшения случайной погрешности измерялось время 100 вычислений.

Рис. 1. Увеличенный фрагмент поперечного сечения моделируемой структуры

Алгоритм вычислений для двумерной структуры таков:

1. Устанавливаются исходные параметры моделирования (tol , параметры структуры).
2. Устанавливается длина сегмента, равная ширине проводника w .
3. Выполняется предварительное вычисление значения контролируемой величины K_0 .
4. Длина сегмента уменьшается в два раза.
5. Вычисляется значение контролируемой величины при заданной сегментации.
6. Если $(K_i - K_{i-1})/K_{i-1} > tol$, то переход к п. 4.

В табл. 1 приведены время T_i , затраченное на вычисление погонной ёмкости C_i , значение C_i и порядок матрицы СЛАУ N_i для каждой итерации выбора сегмента. Количество итераций для $tol = 0,01$ составило 4, однако для наглядного представления зависимости T_i от i итерации были продолжены. Время вычислений с равномерной сегментацией 10 мкм, заданной вручную (выбиралась с условием разбиения границ проводников на торцах на 3 сегмента), составило 1798,02 с, порядок матрицы СЛАУ $N = 7135$, $C = 129,7$ пФ/м. Общее время работы алгоритма (сумма T_i в строках 1–4 табл. 1) составило 13,47 с, что в 3 раза меньше времени следующей итерации и в 133 раза меньше времени, затраченного на вычисления с сегментацией, заданной вручную.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента для C

i	Затраченное время T_i , с	Длина сегмента, мкм	N_i	C_i , пФ/м
1	0,47	890	105	121,4
2	0,96	445	182	124,4
3	2,70	222,5	340	125,7
4	9,34	111,25	659	125,8
5	38,31	55,625	1297	127,5
6	174,84	27,8125	2568	128,6

В табл. 2 приведены время T_i , затраченное на вычисление погонной ёмкости $C0_i$ для структуры без диэлектрических границ, значения $C0_i$ и порядок матрицы СЛАУ N_i для каждой итерации выбора сегмента. Количество итераций для $tol = 0,01$ также составило 4. Время вычислений с равномерной сегментацией 10 мкм, заданной вручную, составило 1309,12 с, порядок матрицы СЛАУ $N = 5560$, $C0 = 40,11$ пФ/м. Общее время работы алгоритма (сумма T_i в строках 1–4 табл. 2) составило 12,08 с, что в 2,5 раза меньше времени следующей итерации и в 108 раз меньше времени, затраченного на вычисления с сегментацией, заданной вручную.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента для $C0$

i	Затраченное время T_i , с	Длина сегмента, мкм	N_i	$C0_i$, пФ/м
1	0,46	890	76	38,09
2	0,93	445	138	39,12
3	2,50	222,5	262	39,62
4	8,19	111,25	510	39,85
5	31,58	55,625	1006	39,96
6	133,95	27,8125	1998	40,03

В табл. 3 приведены время T_i , затраченное на вычисление волнового сопротивления Z_i и значения Z_i для каждой итерации выбора сегмента. Количество итераций для $tol=0,01$ составило 4. Время вычислений с равномерной сегментацией 10 мкм, заданной вручную, составило 3127,25 с. Общее время работы алгоритма (сумма T_i в строках 1–4 табл. 3) составило 30,604 с, что почти в 3 раза меньше времени следующей итерации и в 142 раза меньше времени, затраченного на вычисления с сегментацией, заданной вручную.

Таким образом, предложен адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации границ проводников и диэлектриков при решении задач электростатики, позволяющий получать требуемые характеристики с заданной точностью, не делая избыточных вычислений. Показано, что время работы алгоритма с предложенным способом сегментации структуры меньше в десятки раз по сравнению с временем, затраченным на вычисления с сегментацией, заданной вручную.

Авторы благодарят Т.Р. Газизова за помощь в написании статьи.

Работа выполнена по договору от 16.11.2012 №96/12 ТУСУРа и ОАО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева» в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. №218, договор от 12.02.2013 г. №02.G25.31.0042.

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660373. TALGAT 2011 / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т. и др. / Заявка №2012618426. Дата поступления 5 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2012 г.

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента для Z

<i>i</i>	Затраченное время T_i , с	Z_i , Ом
1	1,054	48,78
2	2,286	47,66
3	6,302	47,15
4	21,962	46,94
5	83,636	46,55
6	354,946	46,32

Аширбакиев Ренат Ихсанович

Аспирант, каф. телевидения и управления ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 90-01-45
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Салов Василий Константинович

Аспирант, каф. телевидения и управления ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39
Эл. почта: catred@mail2000.ru

Ashirbakiev R.I., Salov V.K.

Adaptive iterative selection of the optimal segmentation of a conductor and dielectric boundaries in electrostatic problems

In the paper we offered an adaptive iterative selection of the segmentation of a conductor and dielectric boundaries in electrostatic problems. The algorithm for two-dimensional problem is implemented. The computational experiment is performed. The efficiency of proposed algorithm is demonstrated.

Keywords: electrostatic problems, method of moments, segmentation, TALGAT.