

А.Е. Максимов

Неравномерная сегментация границ многопроводной линии передачи для расчета физической матрицы коэффициентов электростатической индукции

Предложен метод неравномерной сегментации микрополосковых многопроводных линий передачи с торцевой связью, который позволяет получить физические матрицы коэффициентов электростатической индукции при квазистатическом анализе методом моментов.

Ключевые слова: квазистатический анализ, метод моментов, матрица коэффициентов электростатической индукции, неравномерная сегментация границ.

Конкуренция между производителями радиоэлектронных средств (РЭС) вызывает необходимость регулярного обновления и совершенствования всех их видов. При этом с ростом сложности РЭС их разработка и совершенствование становятся невозможными без применения автоматизированного проектирования, в основе которого лежит компьютерное моделирование [1]. Для минимизации затрат на разработку РЭС необходимо уменьшение вычислительной сложности методов компьютерного моделирования при одновременном сохранении их точности.

Известно, что основными элементами РЭС являются линии передачи (ЛП) [2], для моделирования которых широко применяется квазистатический анализ, который основан на решении уравнения Пуассона–Лапласа с помощью численных методов конечных разностей, конечных элементов или моментов. При этом в методе моментов (МоМ) используется поверхностная сегментация границ анализируемой ЛП, что априорно снижает вычислительную сложность решения.

При использовании МоМ уравнение Пуассона–Лапласа записывается в интегральном виде

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\epsilon_0} \int \sigma(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\Gamma,$$

где $\sigma(\mathbf{r}')$ – поверхностная плотность заряда, \mathbf{r} и \mathbf{r}' – точки наблюдения (x, y) и расположения источника (x', y') соответственно, $d\Gamma$ – дифференциал по поверхности структуры, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция Грина, а ϵ_0 – электрическая постоянная. Граничные условия задаются по приложенному напряжению ϕ и требуется найти плотность заряда σ . Это реализуется за счет сведения уравнения Пуассона–Лапласа с использованием базисных и тестовых функций к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с матрицей порядка N . Из матрицы-решения СЛАУ вычисляются матрицы погонных параметров ЛП \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{C} и \mathbf{G} [3, 4]. При этом вычисление матрицы коэффициентов электростатической индукции \mathbf{C} является первичным [5]. Однако при анализе некоторых многопроводных линий передачи (МПЛП) матрица \mathbf{C} может оказаться нефизичной, что приводит к нефизичности временного отклика в конце ЛП [6, 7].

Наиболее простым методом борьбы с нефизичностью матрицы \mathbf{C} является уменьшение шага сег-

ментации ЛП. Поэтому целью работы является выявление оптимального метода сегментации границ МПЛП, дающего физические результаты.

Неравномерная сегментация границ ЛП

Известно, что матрица \mathbf{C} должна быть симметричной, а сумма абсолютных значений внедиагональных элементов в каждой ее строке не должна превышать значения диагонального элемента [8]. Однако эти требования не всегда выполняются [6, 7], например, в микрополосковых МПЛП с числом проводников более 8, имеющих торцевую связь. Нефизичность матрицы \mathbf{C} в таких МПЛП также может проявляться в положительности её внедиагональных элементов, в увеличении взаимных коэффициентов при увеличении расстояния между проводниками, а также в завышенной асимметрии матрицы [5, 9, 10].

Для борьбы с нефизичностью может быть использована неравномерная сегментация. Так, в работе [11] предложен метод, применимый для анализа ЛП с одним проводником (одна правая часть в СЛАУ). В работе [12] метод был модифицирован на случай МПЛП (несколько правых частей). Поясним его суть с помощью упрощенного псевдокода:

1. Задать исходные параметры ЛП, а также требуемую точность вычислений tol , начальную сегментацию, максимальное число итераций для решения СЛАУ (N_{it}^{\max}) и определить контролируемую величину K .
2. Вычислить значение контролируемой величины K .
3. Для i от 1 до N_{it}^{\max} .
4. Участить 25% от общего числа сегментов с максимальными значениями плотности заряда на них.
5. Вычислить значение контролируемой величины K .
6. Если $\text{tol} < |K_i - K_{i-1}|/K_{i-1}$.
7. Продолжать итерации.
8. Иначе
9. Выйти из цикла.

Этот метод позволяет добиться уменьшения вычислительных затрат [12], но не решает проблему нефизичности результатов для МПЛП с торцевой связью. Поэтому выполнена его модернизация таким образом, чтобы учащалось $k\%$ от общего числа сегментов для каждой правой части СЛАУ (далее – метод I). В результате разбиению подлежат не только сег-

менты, имеющие наибольший заряд в решении для первого проводника, а учитываются решения для всех проводников. Поскольку за одну итерацию не может быть разбито более 100% границ ЛП, то процент разбиваемых сегментов не должен превышать значения $100/N$. В предварительных вычислительных экспериментах установлено, что при k в диапазоне 65–85 результирующая матрица C физична. Поэтому далее принято $k = 75$.

Вычислительный эксперимент

Для апробации метода I рассмотрены три МПЛП с торцевой связью: 1 [13], 2 [14] и 3 [12] (рис. 1). Отметим, что в указанных работах анализировались 6-проводные ЛП и решения оказывались физическими. В данной работе исследованы 10-проводные ЛП. Особенностью МПЛП 2 в отличие от МПЛП 1 являются различные ширины проводников w и расстояния между ними s .

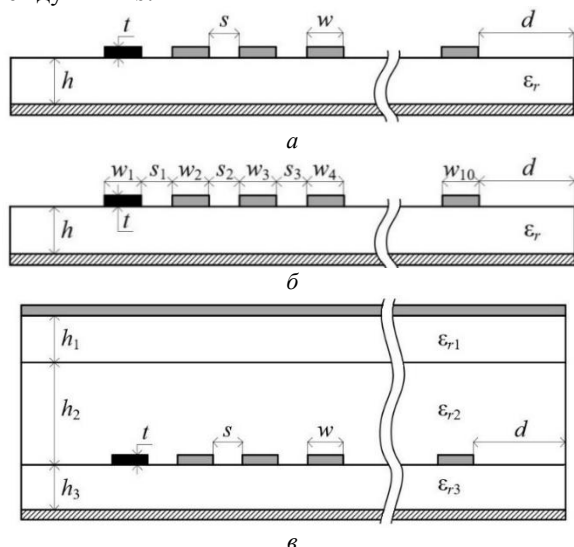


Рис. 1. Поперечные сечения МПЛП: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Геометрические параметры (мм) МПЛП I: толщина проводников $t = 0,01$; $w = 0,1$; $s = 0,1$; расстояние от крайнего проводника до границы ЛП $d = 0,2$; толщина подложки $h = 1,8$. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 6$.

Параметры МПЛП 2: $t = 0,02$; $w_1 = w_9 = 0,2$; $w_2 = w_8 = w_{10} = 0,3$; $w_3 = w_7 = 0,4$; $w_4 = w_6 = 0,5$; $w_5 = 0,6$; $s_1 = s_4 = s_6 = s_9 = 0,25$; $s_2 = s_7 = 0,3$; $s_3 = s_8 = 0,35$; $s_5 = 0,2$; $d = 2,48$; $h = 1$; $\epsilon_r = 4$.

Параметры МПЛП 3: $t = 0,005$; $w = 0,05$; $s = 0,05$; $d = 0,15$; $h_1 = h_3 = 0,05$; $h_2 = 0,15$; $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 3,8$, $\epsilon_{r2} = 2$.

При вычислениях использован пакет GNU Octave. СЛАУ решались методом Гаусса. В качестве контролируемых величин использованы коэффициенты C_{11} контрольных проводников (см. черные проводники на рис. 1).

Полученные результаты (первые строки матриц C) для МПЛП 1, 2 и 3 сведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. Для сравнения использована равномерная сегментация с длиной сегмента $t/3$ [12] (далее – метод II). Как видно из таблиц, метод II показывает нефизичные результаты, а I – физические. Так, для всех МПЛП при использовании метода II не наблюдается последовательного уменьшения значений элементов строки. При этом для метода I значения элементов постепенно уменьшаются при удалении от диагонального элемента.

Закключение

Предложен метод неравномерной сегментации границ МПЛП с торцевой связью, дающий физические результаты. На примере трех микрополосковых МПЛП показана его эффективность. В дальнейшем целесообразна его апробация для многовариантного анализа и оптимизации МПЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

Таблица 1

Значения элементов первой строки матрицы C для МПЛП 1, Ф/м

Метод	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{110}
I	5,77e-11	-3,42e-11	-8,86e-12	-4,63e-12	-3,05e-12	-2,33e-12	-2,01e-12	-1,57e-12	-1,30e-12	-1,23e-12
II	5,72e-11	-3,38e-11	-8,74e-12	-4,53e-12	-2,97e-12	-2,25e-12	-1,93e-12	-1,89e-12	-2,20e-12	-4,06e-12

Таблица 2

Значения элементов первой строки матрицы C для МПЛП 2, Ф/м

Метод	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{110}
I	4,95e-11	-1,90e-11	-2,40e-12	-5,76e-13	-2,62e-13	-1,51e-13	-1,10e-13	-9,97e-14	-8,69e-14	-7,09e-14
II	4,96e-11	-1,90e-11	-2,40e-12	-5,76e-13	-2,62e-13	-1,51e-13	-1,09e-13	-8,58e-14	-6,59e-14	-1,13e-13

Таблица 3

Значения элементов первой строки матрицы C для МПЛП 3, Ф/м

Метод	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{110}
I	9,85e-11	-9,95e-12	-1,39e-13	-5,11e-15	-3,22e-16	-8,37e-17	-5,00e-17	-3,45e-17	-2,49e-17	-2,44e-17
II	9,82e-11	-9,99e-12	-1,42e-13	-5,06e-15	-2,09e-16	-8,80e-18	-4,21e-19	-6,40e-20	-8,74e-20	-1,98e-18

Литература

- Saxena A. Computer aided engineering design / A. Saxena, B. Sahay. – Berlin: Springer, 2005. – 394 p.
- Gizatullin Z.M. Research of resonant effects in interconnects of multilayer PCB of computing equipment /

Z.M. Gizatullin, M.S. Shkinderov, A.O. Arkhipov // Proceedings of the 2020 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2020. – P. 116–119.

- Paul C.R. Analysis of multiconductor transmission lines / C.R. Paul, 2nd ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 800 p.

4. Djordjevic A.R. Analysis of finite conductivity cylindrical conductors excited by axially-independent TM electromagnetic field / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, S.M. Rao // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1985. – Vol. MTT-33. – P. 960–966.
5. Evaluation of quasi-static matrix parameters for multiconductor transmission lines using Galerkin's method / M.B. Bazdar, A.R. Djordjevic, R.F. Harrington et al. // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 1223–1228.
6. Causal RLGC (f) models for transmission lines from measured S-parameters / J. Zhang, J.L. Drewniak, D. Pommerenke et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2010. – Vol. 52, No. 1. – P. 189–198.
7. Peterson Z. Causal transmission line geometry optimization for impedance control in PCBs // 2020 IEEE 29th conference on electrical performance of electronic packaging and systems (EPEPS). – 2020. – 3 p.
8. Di Lorenzo E. The Maxwell capacitance matrix. – Fast-FieldSolvers S.R.L., 2020. – 2 p.
9. Pan G.W. Edge effect enforced boundary element analysis of multilayered transmission lines / G.W. Pan, G. Wang, B.K. Gilbert // IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications. – 1992. – Vol. 39, No. 11. – P. 955–963.
10. Linear time hierarchical capacitance extraction without multipole expansion / S. Balakrishnan, J. Park, H. Kim et al. // Computer design. – 2001. – P. 98–103.

11. Makarov S.N. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB / S.N. Makarov, G.M. Noetscher, A. Nazarian. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. – 616 p.
12. Maksimov A.E. Study of methods for constructing adaptive meshes for quasi-static analysis of multiwire transmission lines by the method of moments / A.E. Maksimov, S.P. Kuksenko // Journal of Radio Electronics. – 2021. – No. 1. – 25 p.
13. Khebir A. An absorbing boundary condition for quasi-TEM analysis of microwave transmission lines via the finite element method / A. Khebir, A.B. Kouki, R. Mittra // Journal of electromagnetic waves and applications. – 1990. – Vol. 4. – P. 145–157.
14. On the distortionless propagation in multiconductor transmission lines / L. Lombardi, G. Antonini, M. De Laetis [et al.] // IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology. – 2018. – Vol. 8. – P. 538–545.

Максимов Александр Евгеньевич

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа
Эл. почта: mae@tusur.ru