

П.П. Снетков, А.Е. Максимов

## Экономичная сегментация границ поперечного сечения многопроводной микрополосковой линии передачи с закругленными торцами проводников

Исследовано влияние неравномерной сегментации границ поперечных сечений многопроводных микрополосковых линий передачи с закругленными проводниками на точность получаемых методом моментов матриц коэффициентов электростатической индукции. Предложен способ неравномерной сегментации, при котором учитывается плотность распределения зарядов на проводниках. Способ заключается в уменьшении числа сегментов на диэлектрике и в верхней части проводника и увеличении – в нижней. Показано, что при значительном уменьшении числа сегментов и, соответственно, объема требуемой машинной памяти матрицы коэффициентов электростатической индукции изменяются незначительно относительно равномерной сегментации с большим числом сегментов. Проведенные исследования показали универсальность способа и его работоспособность при разных соотношениях размеров линий передачи.

**Ключевые слова:** матрица коэффициентов электростатической индукции, метод моментов, многопроводная линия передачи, неравномерная сегментация.

Микрополосковые линии передачи (МПЛ) широко используются в современных радиоэлектронных средствах. При их анализе с использованием квазистатического подхода часто применяются численные методы (например, метод моментов), требующие моделирования их поперечных сечений. При этом обычно проводники в поперечном сечении моделируются прямоугольными. Более того, в ряде программных средств (например, PathWave ADS, LINPAR) доступна только прямоугольная форма проводников, в других (например, CONMTL) – прямоугольная и трапециевидная. Однако поперечное сечение проводников МПЛ на печатной плате часто имеет закругления углов на торцах [1], что, как правило, можно промоделировать лишь в программных средствах с построением поперечного сечения по точкам (например, TALGAT, FEMM, Elcut).

Замена закруглённых проводников прямоугольными может привести к несоответствию результатов моделирования и измерения характеристик и параметров линии. Известно, что у проводников с прямоугольным поперечным сечением наибольшая доля заряда находится на углах, поэтому при дискретизации таких проводников углы обычно сегментируются более часто. Однако отсутствуют сведения о распределении заряда на закругленных проводниках, поэтому неизвестно, как экономично и правильно сегментировать их поперечные сечения.

Таким образом, целью работы является разработка экономичного способа неравномерной сегментации многопроводных МПЛ с закругленными торцами проводников.

### Распределение плотности заряда

Для разработки способа сегментации поперечного сечения МПЛ исследовано распределение плотности заряда для различных форм поперечного сечения проводников: с закруглением в верхней и нижней частях торцов и на углах. Исследуемые типы закругления проводников показаны на рис. 1. Дополнительно на рис. 1, а показан порядок постро-

ения сегментов на проводниках, использованный при расчетах плотности распределения заряда.

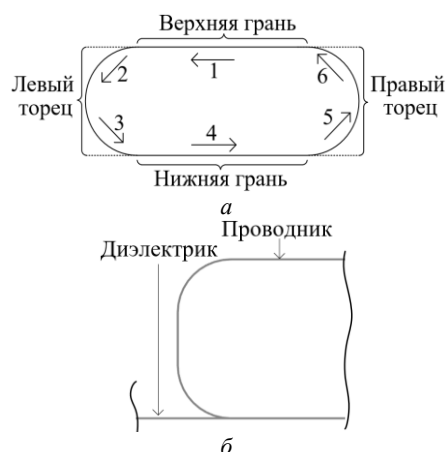


Рис. 1. Исследуемые типы поперечных сечений проводников: с закруглением в верхней и нижней частях торцов – а; с закруглением на углах – б

На рис. 2 приведено распределение поверхностной плотности заряда  $\rho$  по  $N$  сегментам для прямоугольного и закругленного (двух видов) проводников.

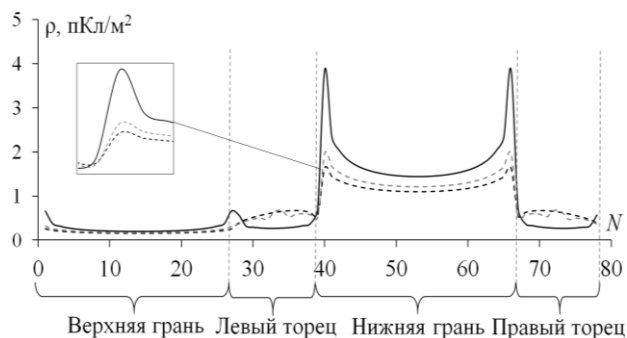


Рис. 2. Распределение поверхностной плотности заряда на проводнике с различной формой: прямоугольной (—), с закруглением в верхней и нижней частях торцов (---) и с закруглением на углах (-.-)

Видно, что наибольшая плотность заряда сконцентрирована на краях нижней грани, а также на нижней части закруглений. При закруглении проводников скачок  $\rho$  на углах существенно ниже.

#### Предложенный способ

На основе полученных результатов из рис. 2 предлагается (на примере проводников с закруглением в верхней и нижней частях торцов) сначала разделять нижнюю грань проводника на 4 части, две центральные части сегментировать редко (с длиной  $t$ , где  $t$  – толщина проводника), оставшиеся две боковые части сегментировать чаще ( $t/3$ ). Затем сег-

ментировать нижнюю часть закругления (длиной  $l$ ) на 5 сегментов и верхнюю часть закруглений на 3 сегмента. Наконец, сегментировать верхнюю грань (с длиной сегмента  $l$ ). Тогда области с наибольшей плотностью распределения заряда (нижние части закруглений и крайние части нижней грани проводника) сегментируются наиболее часто. Результат такой сегментации показан на рис. 3.

Проводники с закруглением углов сегментируются аналогично за исключением того, что центральная часть торца имеет 1 дополнительный сегмент (рис. 4).

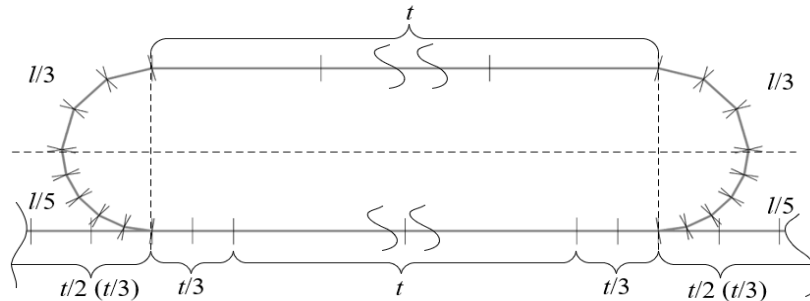


Рис. 3. Неравномерная сегментация проводника с закруглением в верхней и нижней частях торцов

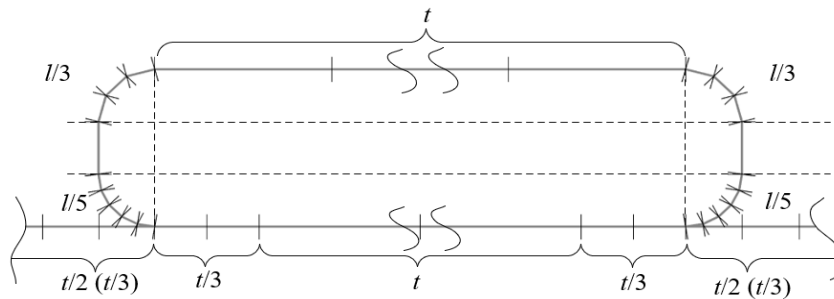


Рис. 4. Неравномерная сегментация проводника с закруглением на углах

Диэлектрик сегментируется в зависимости от толщины проводника. При  $t < 50$  мкм длина сегментов составляет  $t/2$ , а  $t \geq 50$  мкм –  $t/3$  (данные соотношения получены экспериментально).

#### Оценка точности способа

Предложенный способ сегментации реализован в системе моделирования TALGAT [2]. Предложенный способ сегментации выполнен на примере МПЛ с числом проводников  $n$  от 1 до 12 и следующими типами закругления: в верхней и нижней частях торцов; на углах (рис. 5).

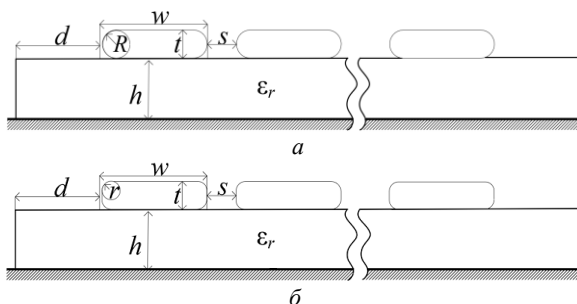


Рис. 5. Поперечные сечения  $n$ -проводных МПЛ с закруглением торцов ее проводников в верхней и нижней частях – а и с закруглением углов – б

Параметры поперечного сечения исследуемых МПЛ:  $t = 18$  и  $105$  мкм, ширины проводников  $w = 0,2$  и  $0,4$  мм, радиусы закругления проводников  $R = t$ ,  $r = t/3$ , расстояние между проводниками  $s = 0,6$  мм, расстояние от крайнего проводника до границы МПЛ  $d = 1,5$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 0,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 4,4$ .

Сначала исследована МПЛ с закруглением торцов ее проводников в верхней и нижней частях при  $n = 1$ . Рассчитанное при использовании предложенного подхода сегментации значение коэффициента электростатической индукции  $C$  составило  $74,82$  пФ/м. Для сравнения выполнено моделирование с частой равномерной сегментацией с длиной сегментов  $t/15$ .  $C$  составило  $75,16$  пФ/м. Различие в полученных значениях составило  $0,46\%$ .

Далее исследована та же МПЛ при  $n$  от 2 до 12. Для примера на рис. 6, а и б приведены полученные матрицы  $C$  для МПЛ с  $n = 6$  при использовании предложенного способа сегментации и равномерной сегментации с длиной сегментов  $t/15$ .

Остальные матрицы не приведены для экономии места.

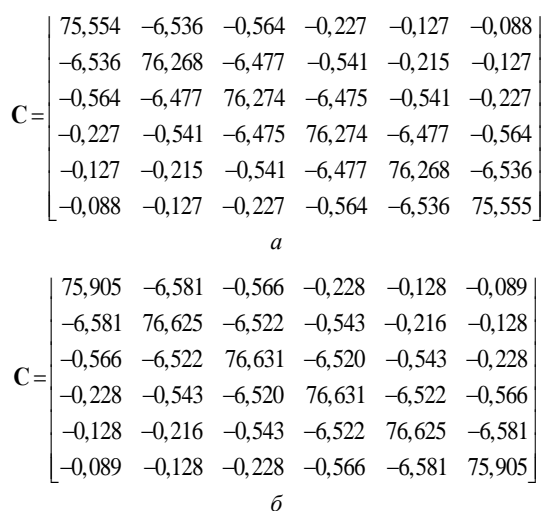


Рис. 6. Матрицы С (пФ/м) при  $n = 6, t = 18$  мкм и  $w = 0,4$  мм с предложенной сегментацией и закруглением проводников в верхней и нижней частях торцов – а и равномерной сегментацией с длиной сегментов  $t/15$  – б

На рис. 7 показано различие в результатах для МПЛ с закруглением проводников на углах. Из табл. 1 и рис. 7 видно, что различия не превышают 1%, кроме случая при  $n = 1$ .

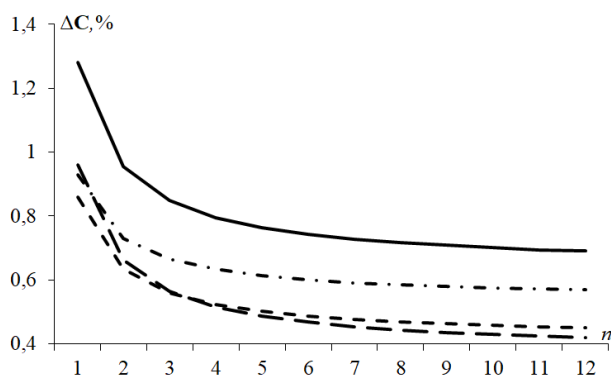


Рис. 7. Различия в результатах для МПЛ с закруглением проводников на углах: при  $t = 18$  и  $w = 0,2$  мкм (—);  $t = 18$  и  $w = 0,4$  мкм (--);  $t = 105$  мкм и  $w = 0,2$  мкм (---) и  $t = 105$  мкм и  $w = 0,4$  мкм (-.-)

Таблица 1

Различия в результатах для МПЛ с проводниками с закруглением в верхней и нижней частях торцов

n	ΔС, %		
	t = 18 мкм, w = 0,2 мм	t = 18 мкм, w = 0,4 мм	t = 105 мкм, w = 0,2 мм
1	0,668	0,458	1,146
2	0,675	0,464	0,712
3	0,677	0,466	0,569
4	0,678	0,467	0,498
5	0,678	0,467	0,457
6	0,679	0,468	0,429
7	0,679	0,468	0,409
8	0,679	0,468	0,395
9	0,679	0,468	0,303
10	0,679	0,468	0,288
11	0,679	0,468	0,288
12	0,679	0,468	0,288

В табл. 2 показано различие в результатах, полученных с использованием предложенного способа и равномерной сегментации (при  $t/15$ ) для проводников с закруглением в верхней и нижней частях торцов. Различие в результатах оценивалось как

$$\Delta C = \frac{\|C_{t/15} - C\|}{\|C_{t/15}\|},$$

где  $C_{t/15}$  – матрица, полученная при равномерной сегментации с длиной сегментов  $t/15$ , а  $C$  – при сегментации по предложенному способу.

Таблица 2

Вычислительные затраты при использовании предложенного способа сегментации относительно равномерной при  $t = 18$  мкм и  $w = 0,2$  мм

n	t/3		Наша		V1/V2
	N1	V1, КБ	N2	V2, КБ	
1	740	4278	494	1907	2,24
2	915	6541	609	2898	2,26
3	1090	9282	724	4095	2,27
4	1265	12502	839	5499	2,27
5	1440	16200	954	7110	2,28
6	1615	20377	1069	8928	2,28
7	1790	25032	1184	10952	2,29
8	1965	30166	1299	13183	2,29
9	2140	35778	1414	15620	2,29
10	2315	41869	1529	18264	2,29
11	2490	48438	1664	21632	2,24
12	2665	55486	1759	24173	2,30

### Оценка вычислительных затрат

Для определения вычислительных затрат использовано сравнение с равномерной сегментацией с длиной сегментов  $t/3$  при  $t = 18$  мкм и  $t/5$  при  $t = 105$  мкм аналогично [3].

Максимальное различие по требуемому объёму памяти составило 4,9 раза при  $t = 105$  мкм и  $w = 0,4$  мм для проводников с закруглением в верхней и нижней частях торцов. Минимальное различие составило 1,5 раза при  $t = 18$  мкм и  $w = 0,2$  мм для МПЛ с закруглением на углах.

В табл. 2 приведен пример сравнения вычислительных затрат для структуры с  $t = 18$  мкм и  $w = 0,2$  мм для проводников с закруглением в верхних и нижних частях торцов. Оценивалось число сегментов  $N$  и объем памяти  $V$ , необходимый для вычисления матриц  $C$  с использованием предложенного способа и равномерной сегментации с длиной сегментов  $t/3$ . Из табл. 2 следует, что минимальное различие по требуемому объёму памяти составило 2,2 раза, а максимальное – 2,3 раза в пользу предложенного способа.

### Выводы

Предложен способ неравномерной сегментации границ поперечных сечений многопроводных МПЛ с учетом распределения плотности заряда на границах. Выполнено сравнение предложенного способа сегментации с равномерной сегментацией. Установлено, что предложенный способ уменьшает требуемый объем памяти для расчета матрицы коэффициентов электростатической индукции. Уменьшение на

рассмотренных примерах составило до 4,9 раза при сохранении высокой точности результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00101, <https://rscf.ru/project/22-79-00101/>.

#### *Литература*

1. Carano M. A process engineer's guide to etching defects. – Part 3 // The PCB Magazine. – 2021. – No. PCB007. – PP. 98–101.

2. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУРе / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников и др. // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 170–178.

3. Maksimov A.E. Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines / A.E. Maksimov, S.P. Kuk-

senko // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, No. 5. – PP. 1514–1521.

---

#### **Снетков Павел Павлович**

Студент каф. телевидения и управления (ТУ)  
Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Эл. почта: p.snetkov@mail.ru

#### **Максимов Александр Евгеньевич**

Мл. н.с. науч.-исслед. лаб. безопасности  
и электромагнитной совместимости радиоэлектронных  
средств каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: mae@tusur.ru