

И. Е. САГИЕВА, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
ассистент каф. ТУ, ТУСУР, Томск
Т. Р. ГАЗИЗОВ, д-р техн. наук, зав. каф. ТУ, ТУСУР, Томск
А. С. КИРХМАЕР, магистрант каф. ТУ, ТУСУР, Томск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ И ЗАКРУГЛЕННЫМ ПРОВОДНИКАМИ

Рассматривается микрополосковая линия с прямоугольным и закругленным проводниками. Вычислены значения погонной ёмкости, погонной индуктивности, волнового сопротивления и погонной задержки. Приведена их сходимость с учащением сегментации. Показана возможность уменьшения затрат памяти в 50 раз, а времени в 343 раза при моделировании проводника линии не прямоугольной, а закругленной формы.

Совершенствование автоматизированного проектирования линий передачи (ЛП) радиоэлектронных средств (РЭС) актуально. Например, во многих случаях бывает сложно провести большой объем вычислений погонных параметров в широком диапазоне изменения различных величин. При этом существует противоречие между повышением точности вычислений и ростом затрат на них, неразрешенность которого препятствует быстрому получению точных результатов, а часто делает это и вовсе невозможным. Между тем широкое использование ЛП (например, в силовых шинах электропитания или различных полосковых устройствах и пр.), в т.ч. в ряде новых критичных приложений, требующих стабильной работы [1] в условиях жестких температурных и электромагнитных воздействий, невозможно без их автоматизированного проектирования на основе тщательного моделирования и оптимизации. Поэтому является актуальным создание и исследование новых вычислительных алгоритмов для моделирования, корректно учитывающего особенности реальных конструкций ЛП при минимальных затратах на вычисления с заданной точностью. Это достижимо за счет задания

ребер проводников и диэлектриков (в поперечном сечении) не идеальными прямыми углами (с хорошо известным нереально большим ростом плотности заряда на острые ребра при вычислении электрической емкости), а дугами, аппроксимированными полилиниями (что гораздо ближе к реальности, а главное, не создает нефизичного роста плотности заряда). Значимость данной работы заключается в выполнении такого исследования, позволяющего на примере микрополосковой линии (МПЛ) [2] изучить новую возможность уменьшения затрат времени и памяти. При этом важно исследовать более быструю сходимость решения с заданной точностью с оценкой уменьшения затрат. Цель работы – представить результаты первого исследования в виде сравнения МПЛ с прямоугольным и закругленным проводниками.

Выполнено моделирование МПЛ (рисунок 1) с прямоугольным проводником и при его закруглении в системе TALGAT [3]. Общие параметры поперечного сечения: ширина проводника $w = 250$ мкм, толщина проводника $t = 18$ мкм, толщина подложки $h = 90$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,2$, расстояние от края до проводника $d = 3w$.

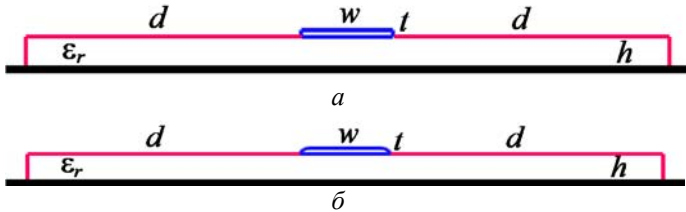


Рисунок 1 – Микрополосковая линия с прямоугольным (а) и закругленным (б) проводниками

Проведен сравнительный анализ сходимости значений погонной ёмкости C , погонной индуктивности L , волнового сопротивления Z и погонной задержки τ для прямоугольного и закругленного проводников. Уточнение сегментации требуется в основном для более точного моделирования плотности заряда именно в местах его наиболее резких изменений (обычно в углах проводника). На рисунке 2 представлена сегментация проводника с дугой при длине сегмента $S = 1$ мкм.

Меняя сегментацию как $S = 1 \text{ мкм}/k$, где $k = 0,2; 0,4; 0,8; 1; 2; 3; 4; 5$ и 6 , получены значения C, L, τ и Z (таблица 1), по которым построены графики сходимости в процентах для двух видов проводника (рисунок 3).

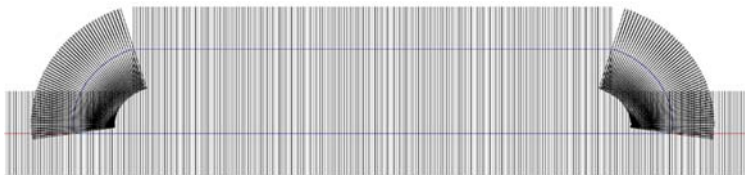


Рисунок 2 – Сегментация проводника при $S=1 \text{ мкм}$

Анализ результатов показал, что при одной и той же сегментации сходимость для закругленного проводника, как правило, лучше. Например, при $S = 1 \text{ мкм}$ ($N=3$) у закругленного проводника $\Delta C = 0,02 \%$, а у прямоугольного $\Delta C = 0,09 \%$, т.е. сходимость лучше в 4,5 раза. При $S = 2,5 \text{ мкм}$ ($N=1$) сходимость лучше у ΔC в 3 раза, у $\Delta \tau$ в 8 раз, у ΔZ в 2 раза.

Для оценки уменьшения вычислительных затрат можно задаться уровнем сходимости. Например, для $\Delta C \approx 0,05 \%$ при переходе от прямоугольного к закругленному проводнику N уменьшается примерно с 5 до 2, что соответствует увеличению длины сегмента S от 0,33 мкм до 2,5 мкм, т.е. более чем в 7 раз. Если полагать, что в это же число раз уменьшается количество сегментов, затраты памяти снижаются пропорционально квадрату этого числа, а время моделирования (решение системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса) пропорционально кубу этого числа, то получим уменьшение затрат памяти примерно в 50 раз, а времени – примерно в 343 раза.

Аналогичные оценки можно сделать для погонной задержки τ и волнового сопротивления Z .

Таблица 1 – Значения C , L , τ и Z при разных значениях сегментации

Тип	N	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	k	0,2	0,4	0,8	1	2	3	4	5	6
	S , мкм	5	2,5	1,25	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,166
Прямо- уголь- ный	C , нФ/м	0,1529	0,1535	0,1537	0,1538	0,1539	0,1539	0,1539	0,154	0,154
	ΔC , %	–	0,3987	0,1399	0,091	0,0754	0,0325	0,0158	0,011	0,0091
	L , мкГн/м	0,2318	0,2318	0,23161	0,23160	0,23158	0,23158	0,23158	0,23158	0,23158
	ΔL , %	–	0,05439	0,02504	0,00432	0,00734	0,00216	0,00086	0,00043	0,00043
	τ , нс/м	5,9533	5,96356	5,96698	5,96737	5,96939	5,97019	5,97171	5,97103	5,97129
	$\Delta \tau$, %	–	0,17255	0,05732	0,00653	0,03383	0,01339	0,02545	0,01138	0,00435
	Z , Ом	38,936	38,8477	38,8156	38,8113	38,7953	38,7894	38,7856	38,7834	38,7816
	ΔZ , %	–	0,22704	0,08269	0,01107	0,04124	0,01521	0,00979	0,00567	0,00464
Закруг- лен- ный	C , нФ/м	0,1886	0,18889	0,18899	0,18901	0,18905	0,18906	0,18907	0,18907	0,18907
	ΔC , %	–	0,12871	0,05328	0,0201	0,0201	0,00687	0,00317	0,00211	0,00158
	L , мкГн/м	0,2359	0,23570	0,23561	0,23559	0,23557	0,23556	0,23556	0,23555	0,23558
	ΔL , %	–	0,09164	0,03862	0,00636	0,00423	0,00197	0,00127	0,00911	0,00891
	τ , нс/м	6,6712	6,67246	6,67297	6,67306	6,67336	6,67349	6,67356	6,6736	6,67364
	$\Delta \tau$, %	–	0,01828	0,00764	0,00621	0,00449	0,00195	0,00104	0,00059	0,00059
	Z , Ом	35,364	35,3247	35,3084	35,3056	35,3002	35,2984	35,2976	35,2971	35,2968
	ΔZ , %	–	0,10984	0,04616	0,00793	0,00668	0,0051	0,00227	0,00142	0,00085

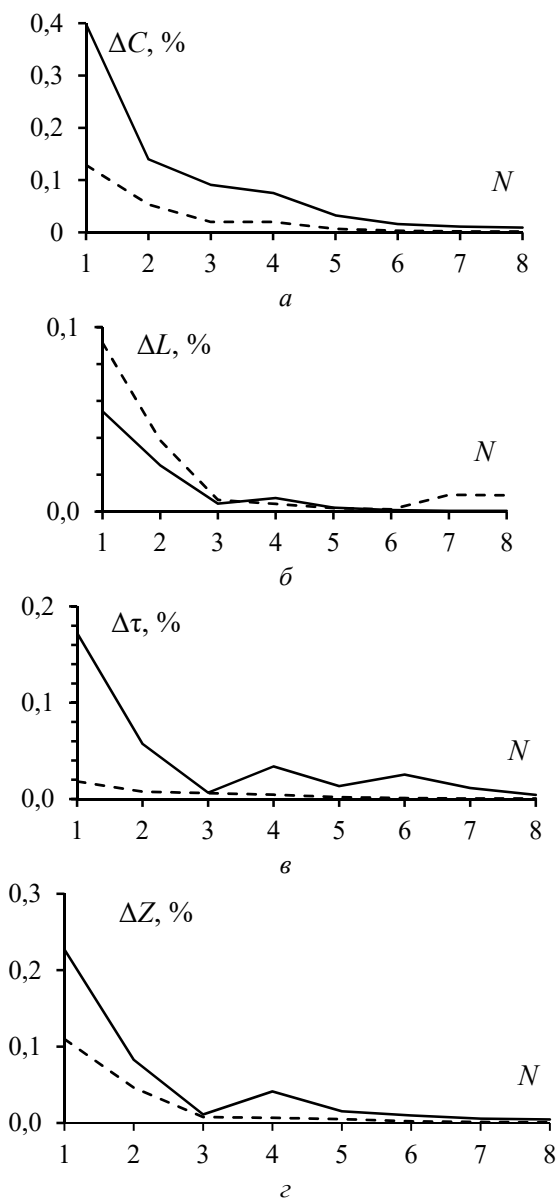


Рисунок 3 – Графики сходимости $C(a)$, $L(b)$, $\tau(\epsilon)$ и $Z(z)$ для прямоугольного (—) и закругленного (- -) проводников

Таким образом, моделирование проводника закругленной формы значительно снижает вычислительные затраты. Следовательно, в дальнейшем необходимо выполнить такое исследование более детально.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Сагиева И. Е. Стабильность характеристик модифицированных микрополосковых линий: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2021.
2. Maloratsky L. G. Using modified microstrip lines to improve circuit performance // High Frequency Electronics. 2011. Vol. 10, No 5. P. 38–52.
3. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С. П. Куксенко [и др.] // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45–50.

I.Y. Sagiyeva, T.R. Gazizov, A. Kirchmeyer

Comparative analysis of microstrip line with rectangular and rounded conductors

A microstrip line with rectangular and rounded conductors is considered. The values of wave impedance, per-unit-length capacitance, inductance and delay and are calculated. Their convergence with increasing segmentation is given. Their convergences with increasing segmentation are given. It is shown that it is possible to reduce the memory cost by 50 times, and the time by 343 times, when modeling the line conductor as rounded rather than rectangular.

indira_sagiyeva@mail.ru