

Применение MATLAB/GNU Octave для расчета погонных параметров многопроводных линий передачи методом моментов

А.Е. Максимов ¹✉, П.П. Снетков ¹, А.А. Иванов ¹, С.П. Куксенко ¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) – Научно-исследовательская лаборатория «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств», г. Томск, 634050, Россия

Ссылка для цитирования

Максимов А.Е., Снетков П.П., Иванов А.А., Куксенко С.П. Применение MATLAB/GNU Octave для расчета погонных параметров многопроводных линий передачи методом моментов // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 3. С. 344–353. doi: 10.15827/0236-235X.142.344-353

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 1.2.2

Поступила в редакцию: 07.02.2024

После доработки: 09.03.2024

Принята к публикации: 18.03.2024

Аннотация. В данной статье описан разработанный с использованием языка программирования MATLAB/GNU Octave прототип программного средства для расчета (экстракции) первичных погонных параметров (матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции) многопроводных линий передачи с произвольным поперечным сечением, любым числом диэлектрических слоев и проводников на каждом слое. В созданном прототипе используется численный метод моментов. Реализованы равномерная и два способа неравномерной сегментации границ поперечных сечений линий передачи (сегментация с учащением в углах и проекционная), а также три способа ее итерационного учащения (учащение всех сегментов, только тех сегментов, длина которых превышает установленное пороговое значение, и сегментов с наибольшей плотностью заряда). Реализованы четыре метода решения получаемых матричных уравнений: LU-разложение, BI-BiCGStab, BI-IDR(S) и BI-GMRES. После экстракции параметров выполняется их проверка на физичность. Разработанный прототип также способен осуществлять многовариантный анализ, то есть автоматическую итерационную экстракцию параметров линии передачи при изменении по определенному правилу входных данных (геометрических и электрофизических параметров). На основе результатов многовариантного анализа может быть выполнен расчет основных статистических характеристик, таких как математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и доверительный интервал. Выполнена верификация прототипа, показавшая, что экстрагированные параметры согласуются с аналогичными из других программных средств. Большая гибкость конфигурирования, модульность, различные методы сегментации и решения матричного уравнения позволяют использовать как прототип в целом, так и его отдельные модули для исследовательских и академических задач. Применяя вычисленные первичные параметры линии, можно легко рассчитать ее параметры рассеяния.

Ключевые слова: программное средство, расчет первичных погонных параметров, многопроводные линии передачи, квазистатическое приближение, метод моментов

Благодарности. Разработка прототипа программного средства выполнена за счет гранта РФФ № 23-79-10165 (<https://rscf.ru/project/23-79-10165/>) в ТУСУР. Моделирование многопроводных линий передачи выполнено в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России

Введение. Для учета требований по целостности сигнала в межсоединениях радиоэлектронных средств при их производстве необходимо предварительное моделирование межсоединений с помощью специализированных программных средств. Поскольку одним из основных типов межсоединений являются различные линии передачи, повышение скорости передачи данных и плотности монтажа приводит к необходимости учета электромагнитных связей между всеми близко расположенными проводниками, а также их моделирования как *многопроводных линий передачи* (МПЛП) [1, 2]. Моделирование МПЛП при помощи аналитических методов из-за сложности их структуры на практике часто неприменимо, поэтому обычно используется квазистатическое приближе-

ние, в ходе которого выполняется расчет (экстракция) параметров (матриц погонных коэффициентов электростатической \mathbf{L} и электромагнитной \mathbf{C} индукции, сопротивлений \mathbf{R} и проводимостей \mathbf{G}) [1] с применением численных методов. Один из наиболее популярных и универсальных из них – метод моментов [3, 4]. В двумерном случае моделируется поперечное сечение исследуемой линии, в котором границы раздела сред (проводник–диэлектрик и диэлектрик–диэлектрик) разбиваются на сегменты для последующего расчета взаимовлияний. При этом некорректный выбор сегментации может привести к существенной погрешности при расчете параметров МПЛП. Так, малое число сегментов приводит к низкой точности аппроксимации распределения зарядов

на поверхности проводников, например, к возникновению скачкообразных переходов, а излишне большое – к существенному увеличению вычислительных затрат из-за того, что размерность итогового матричного уравнения равна числу сегментов (N), а вычислительная сложность составляет $O(N^2)$.

Подходы к сегментации в разных программных средствах различаются. Так, в ряде средств на основе метода моментов, например, в программах PathWave ADS и FasterCap, доступна только автоматическая сегментация, в других, таких как CONMTL и LINPAR, по умолчанию используется автоматическая сегментация с возможностью ее ограниченной модернизации. Поскольку автоматическая сегментация часто может быть неоптимальной, для эффективного анализа программное средство должно поддерживать как различные виды адаптивной сегментации, так и ручную сегментацию вплоть до указания числа сегментов для каждой границы. Кроме того, в популярных программных средствах, как правило, отсутствует проверка корректности элементов матриц. Тогда вычисленные матрицы \mathbf{L} , \mathbf{C} , \mathbf{R} и \mathbf{G} выводятся как есть, без проверки их физичности, которая возлагается на пользователя (о чем, например, сообщается в документации программы PathWave ADS). При этом критерии физичности хорошо известны, а способы программной проверки достаточно тривиальны.

Технологические вариации геометрических параметров МПЛП, анализ температурных зависимостей и прочее требуют многократной экстракции погонных параметров, то есть многовариантного анализа. Для последующей же обработки множества экстрагированных параметров требуется статистический анализ.

Цель данной работы – представить прототип программного средства расчета (экстракции) погонных параметров МПЛП, отличающегося наличием модулей равномерной и неравномерной сегментации, проверки проектных норм экстрагированных параметров, а также многовариантного и статистического анализа.

Метод моментов

При анализе МПЛП с помощью метода моментов рассматривается уравнение Пуассона–Лапласа [5] в интегральном виде:

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

где σ – поверхностная плотность заряда; \mathbf{r} и \mathbf{r}' – точки наблюдения и источника соответственно; $d\Gamma$ – дифференциал по поверхности МПЛП;

ε – диэлектрическая проницаемость; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция Грина.

В данной постановке задачи считаются заданными граничные условия по приложенному напряжению φ , при этом требуется найти поверхностную плотность заряда σ . Для двумерного случая функция Грина имеет вид

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \ln |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|. \quad (1)$$

При отсутствии в структуре анализируемой МПЛП бесконечной плоскости земли для корректного моделирования в ней должен присутствовать как минимум один опорный проводник. В этом случае для проводниковых границ (1) записывается как

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \int_{L_C} \sigma(\mathbf{r}') \ln |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| dl', \quad \mathbf{r} \in L_C, \quad (2)$$

где L_C – контур проводниковых границ; dl' – элемент этого контура, а для диэлектрических границ получается

$$0 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \frac{\sigma(\mathbf{r})}{2\varepsilon_0} + \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \int_{L_D} \sigma(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \mathbf{n} dl', \quad \mathbf{r} \in L_D, \quad (3)$$

где L_D – контур диэлектрических границ; \mathbf{n} – вектор внешней нормали; ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости с одной (на которую направлен \mathbf{n}) и другой (от которой направлен \mathbf{n}) сторон границы.

С использованием аппарата базисных и тестовых функций выражения (2) и (3) сводятся к матричному уравнению вида

$$\mathbf{Z}\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{\Phi}, \quad (4)$$

где \mathbf{Z} – матрица размера $N \times N$, описывающая МПЛП через связи сегментов ее границ между собой; $\boldsymbol{\Phi}$ – матрица размера $N \times M$, содержащая известные потенциалы на проводниках; $\boldsymbol{\Sigma}$ – матрица размера $N \times M$, содержащая неизвестные общие (соответственно свободные и поляризационные) плотности заряда на этих сегментах; N – число базисных и тестовых функций, число сегментов расчетной сетки; M – число проводников МПЛП, не считая опорного.

Матричное уравнение (4) может быть решено прямым или итерационным методом, использующим последовательные приближения для получения более точного решения на каждой следующей итерации. Из решения (4) плотность свободных зарядов $\boldsymbol{\Sigma}_F$ вычисляется как

$$\boldsymbol{\Sigma}_F = \varepsilon_r \boldsymbol{\Sigma}, \quad (5)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, к которому направлен вектор нормали от границы проводника.

Матрица \mathbf{C} , содержащая коэффициенты электростатической индукции, вычисляется из $\Sigma_F = \mathbf{C}\Phi$. (6)

Для получения значения c_{ij} нужно заземлить все проводники на опорный, кроме j -го, на который подается напряжение v_j , и определить заряд q_i на проводнике i . При этом на остальных проводниках будет минус q_i . В результате процесс вычисления элементов матрицы может быть представлен как M расчетов двухпроводной емкости, где остальные $(M - 1)$ проводники полагаются под одним потенциалом с опорным, а (4) служит для расчета зарядов на проводниках по заданным потенциалам.

При моделировании без учета потерь, кроме матрицы \mathbf{C} , также вычисляется матрица коэффициентов электромагнитной индукции \mathbf{L} как

$$\mathbf{L} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{C}_0^{-1}, \quad (7)$$

где \mathbf{C}_0 – матрица, полученная по тому же алгоритму, что и \mathbf{C} , но при удалении из структуры диэлектрических границ (линия с воздушным заполнением), а μ_0 и ϵ_0 – магнитная и электрическая постоянные.

Программная реализация

Прототип программного средства расчета первичных погонных параметров МПЛП по (1)–(7) разработан с использованием синтаксиса интерпретируемого языка программирования MATLAB, совместимого с GNU Octave. В его составе шесть независимых модулей:

- построение геометрической модели поперечного сечения МПЛП (M1);
- сегментация границ поперечного сечения МПЛП (M2);
- формирование и решение матричного уравнения (M3);
- расчет (экстракция) параметров (матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L}) (M4);
- проверка корректности элементов матриц (M5);
- многовариантный и статистический анализ (M6).

Каждый модуль получает данные и возвращает результат в заданных форматах. Схема взаимодействия модулей представлена на рисунке 1.

Модель поперечного сечения МПЛП задается в виде комбинации геометрических примитивов: прямоугольник, многоугольник и эллипс. Для их построения на вход модуля M1 подаются массивы **rect**, **poly** и **ellip** соответственно. Каждая замкнутая фигура образует область (электрически- и магнитнооднородную площадь).

Массив **rect** имеет размерность $M \times 4$, где M – число прямоугольников, каждый из которых определяется четырьмя координатами: минимальная и максимальная абсциссы, минимальная и максимальная ординаты. Трехмерный массив **poly** имеет размерность $2 \times L \times M$, где M – число многоугольников, а L – число линейных сегментов (граней) M -го многоугольника. Для каждой грани первой строкой массива указываются все абсциссы точек, а второй – ординаты. Массив **ellip** имеет размерность $M \times 5$, где M – число эллипсов. Для каждого из них последовательно указываются координаты центра (абсцисса и ордината), длины большой и малой полуосей и вращательный угол (в радианах). Кроме того, на входе модуля M1 для каждой области задается значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r внутри нее. После окончания работы модуля M1 реализующая его функция возвращает структуру данных *str* (размерностью $10 \times N$, где N – общее число границ), содержащую следующие поля: *s* – номер начальной вершины границы (поперечного сечения); *e* – номер конечной вершины границы; *d* – номер области, к которой относится граница; *sx* – абсцисса центра границы; *sy* – ордината центра границы; *h* – длина границы; *nx* – горизонтальная компонента единичного вектора нормали к границе; *ny* – вертикальная компонента единичного вектора нормали к границе; *ein* – значение ϵ_r внутри области (против вектора нормали); *eout* – значение ϵ_r снаружи области (по вектору нормали).

Структура данных *str* передается на вход модуля M2, где реализуется сегментация границ поперечного сечения МПЛП. Так, доступна равномерная сегментация, при которой пользователь может выбрать только максимальный размер сегмента, и ряд неравномерных, у которых доступны дополнительные параметры. При использовании равномерной сегментации каждая граница разбивается на сегменты равной длины. Их число определяется путем округления в большую сторону частного от деления длины границы на заданный пользователем максимальный размер сегмента. Реализованы два вида неравномерной сегментации: с учащением в углах [6] и проекционная. Также в модуле M2 реализована возможность автоматического итерационного учащения сегментации. Доступны три варианта учащения сегментов на каждой итерации: всех (разбиение каждого сегмента пополам); длина которых превышает установленное пороговое значение [7]; с наибольшей плотно-

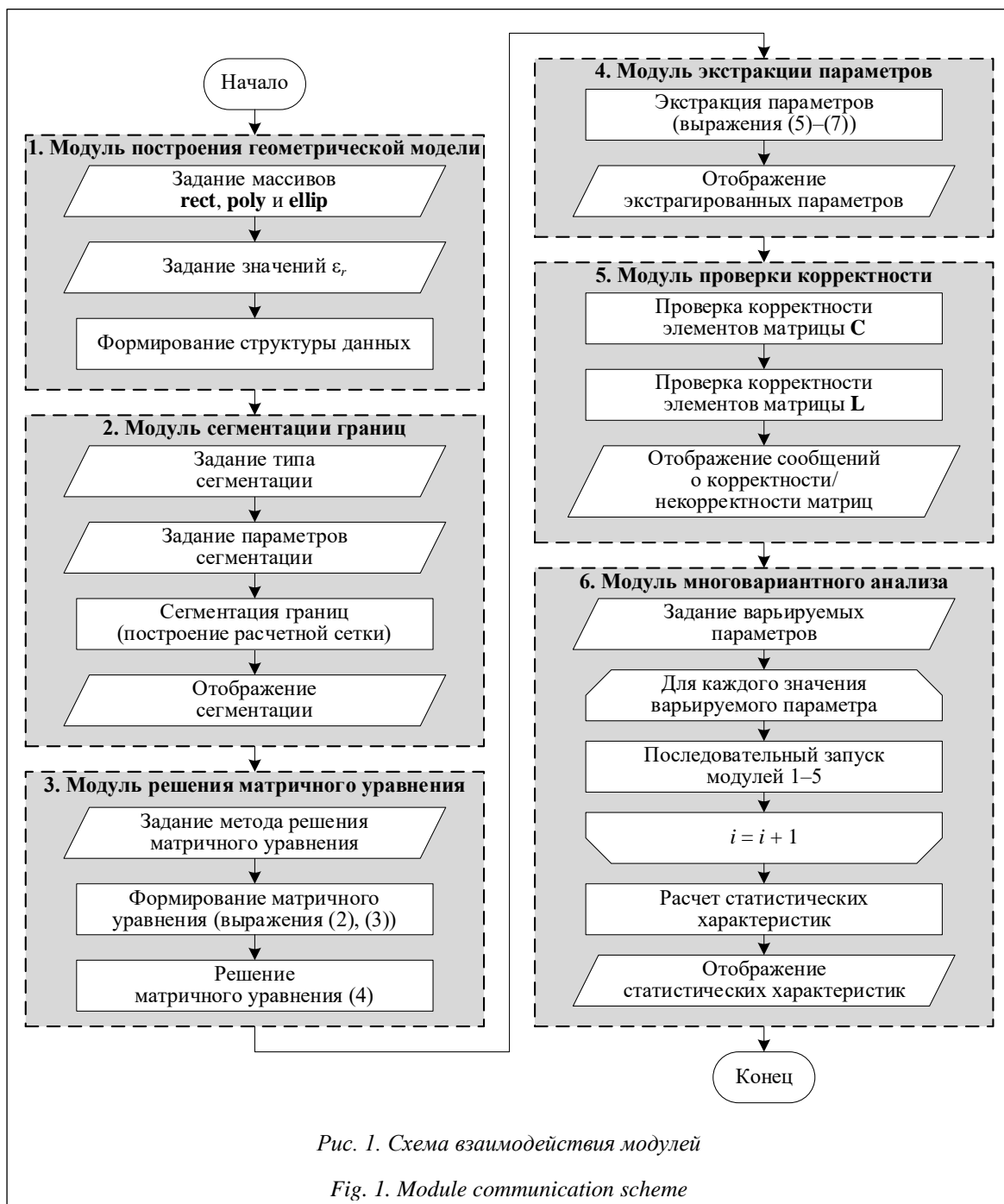


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей

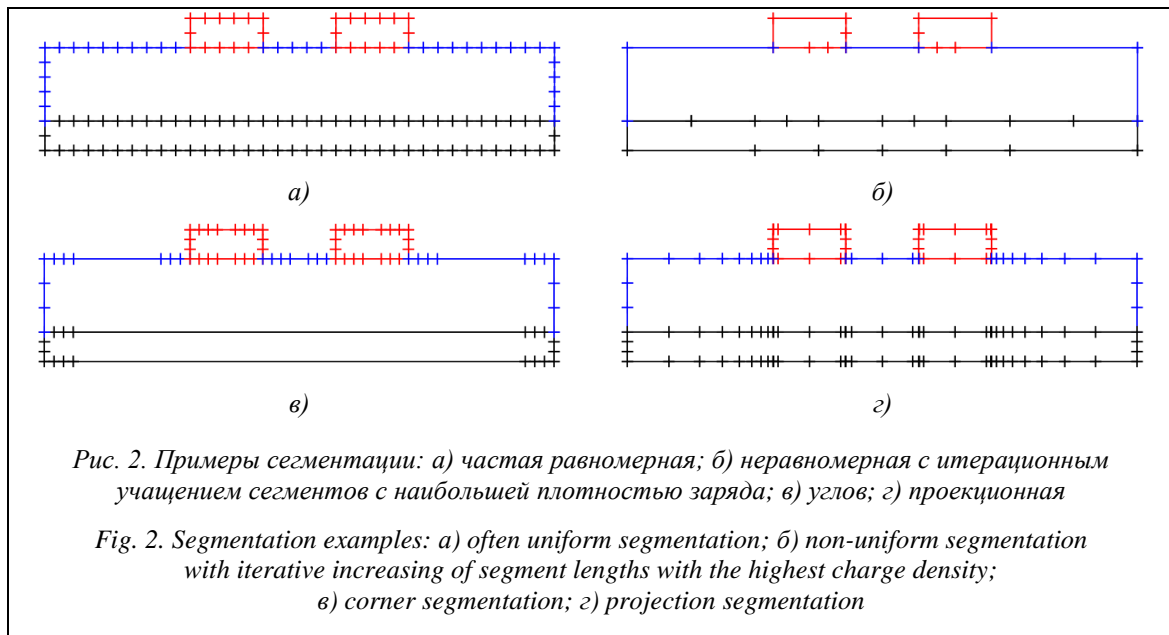
Fig. 1. Module communication scheme

стью заряда [5], используя информацию из модуля M4.

Различные методы сегментации и ее учащения могут быть скомбинированы. На выходе модуля M2 используется та же структура данных, что и у M1, но в ней описаны не границы, а их сегменты. Сегментация границ поперечного сечения может быть отображена графически. Около каждого сегмента по желанию пользователя отображаются номер сегмента, номер области, к которой относится сегмент,

относительные диэлектрические проницаемости сред слева и справа от сегмента, направление вектора нормали. Примеры итоговой сегментации приведены на рисунке 2.

В модуле M3 формируется и решается матричное уравнение (4). При решении уравнений небольшого размера и с плотной матрицей, как правило, используются прямые методы, такие как метод Гаусса или его модифицированная версия, основанная на LU-разложении [8]. Однако для больших матричных уравнений пря-



мые методы вычислительно затратны, поэтому применяются итерационные. Для прямых методов затраты времени на решение матричного уравнения соответствуют $O(N^3)$, а машинной памяти – $O(N^2)$. Для итерационных методов эти затраты, как правило, ниже и зависят от требуемой точности. Еще одной особенностью итерационных методов является то, что получаемая погрешность решения из-за конечного числа разрядов намного меньше, чем в методе Гаусса, так как она не накапливается, а определяется только последней итерацией и не зависит от их числа. Поэтому решение с заданной точностью при росте числа обусловленности матрицы достигается просто увеличением числа итераций.

Для больших матричных уравнений с несимметричными матрицами часто используют методы крыловского типа [9]. В основном они сводятся к генерации подходящего базиса векторного пространства, называемого подпространством Крылова, и к выбору фактической итерации в пределах этого пространства. Достаточно популярными методами крыловского типа являются стабилизированный метод бисопряженных градиентов (BiCGStab), метод обобщенных минимальных невязок (GMRES), метод индуцированного уменьшения размерности (IDR) и его модификация IDR(S) [9, 10].

Для решения последовательности матричных уравнений, что актуально при использовании многовариантного анализа (модуль М6), целесообразно использовать блочные версии итерационных методов, иначе возникает необ-

ходимость последовательных отдельных вычислений с каждой правой частью. Это дополнительно увеличивает вычислительные затраты [9]. Поэтому в модуле М3 реализованы метод LU-разложения (встроенная в MATLAB/GNU Octave версия) и блочные версии методов BiCGStab, IDR(S) и GMRES [11, 12] (авторские реализации).

Модуль М4 получает на вход матрицу Σ , вычисленную в модуле М3, реализует вычисления по (5)–(7) и возвращает (передает модулю М5) рассчитанные матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} .

Модуль М5 проверяет корректность элементов матриц в соответствии с блок-схемами, приведенными на рисунках 3 и 4, и выводит соответствующие сообщения.

Модуль М6 позволяет выполнять многовариантный анализ параметров МПЛП. При варьировании любого параметра МПЛП модуль автоматически итерационно запускает остальные модули, позволяя получать на выходе набор матриц \mathbf{C} и \mathbf{L} . Далее над этим набором может быть выполнен статистический анализ с расчетом основных статистических характеристик.

Верификация программного средства расчета первичных погонных параметров

Верификация разработанного прототипа программного средства выполнена на примере двухпроводной микрополосковой линии передачи (далее – ЛПП) со следующими параметрами [13]: ширина проводников $w = 2,35$ мм;

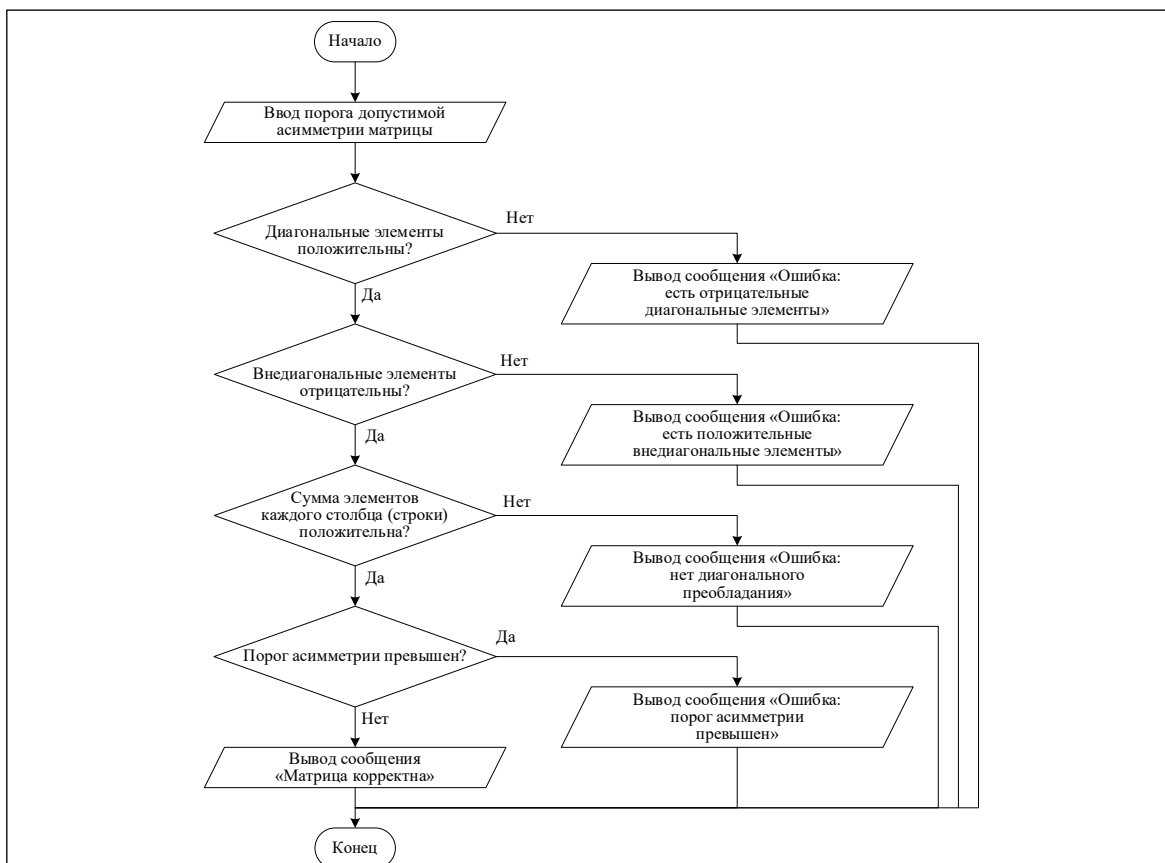


Рис. 3. Блок-схема алгоритма проверки корректности элементов матрицы C

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for checking the correctness of matrix C entries

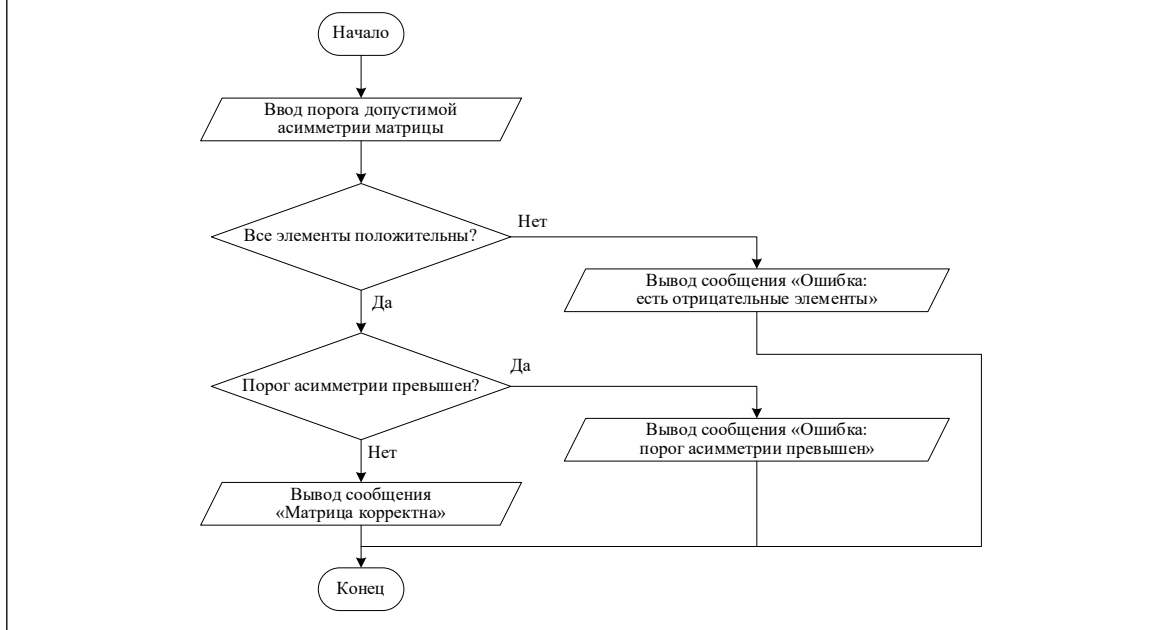


Рис. 4. Блок-схема алгоритма проверки корректности элементов матрицы L

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for checking the correctness of matrix L entries

расстояние между проводниками $s = 0,65$ мм; толщина проводников $t = 35$ мкм; толщина ди-

электрического слоя $h = 1,5$ мм; расстояние от проводников до границ структуры $d = 9,825$ мм;

$\epsilon_r = 5,18$. Ее поперечное сечение представлено на рисунке 5. Для вычисления матриц **C** и **L** использованы программные средства PathWave ADS, CONMTL, Ansys Q2D Extractor, а также численно-аналитический метод конформных отображений (МКО) с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца [13]. Полученные матрицы отображены в таблице 1. Также в ней указаны параметры сегментации.

Дополнительно выполнена верификация на примере более сложной МПЛП (далее – ЛП2), поперечное сечение которой представлено на рисунке 6. Ее параметры [14]: $w = 0,2$ мм, $t = 0,1$ мм, $h = 0,1$ мм, $h_1 = 0,5$ мм, $h_2 = 0,4$ мм, $h_3 = 9,1$ мм, $d = 1,5$ мм, $\epsilon_{r1} = 6,8$, $\epsilon_{r2} = 4,5$, $\epsilon_{r3} = 1$. В таблице 2 представлены экстрагированные матрицы.

Как видно из таблиц 1 и 2, параметры, экстрагированные в разработанном прототипе

Таблица 1

Матрицы **C** и **L** для ЛП1, полученные в различных программных средствах

Table 1

Matrices **C** and **L** for TL1 obtained in different programs

Программное средство	Сегментация	C, пФ/м			L, мкГн/м				
МКО [13]	Нет данных	131,30	-23,60	-23,60	131,30	0,3245	0,0916	0,0916	0,3245
PathWave ADS	Нет данных	131,85	-23,28	-23,28	131,85	0,3255	0,0915	0,0915	0,3255
CONMTL	Равномерная, $N = 2\ 320$	130,41	-22,83	-22,83	130,41	0,3262	0,0931	0,0931	0,3262
	Неравномерная, $N = 2\ 320$	130,96	-23,06	-23,06	130,96	0,3260	0,0931	0,0931	0,3260
Ansys Q2D Extractor (метод конечных элементов)	Неравномерная, число треугольных элементов $N_t = 2\ 248$	132,23	-23,56	-23,56	132,17	0,3408	0,0904	0,0904	0,3408
	Неравномерная с итерационным учащением, $N_t = 1\ 1986$	132,02	-23,48	-23,48	132,02	0,3408	0,0904	0,0904	0,3408
Разработанное программное средство	Равномерная, $N = 2\ 369$	132,65	-22,37	-22,37	132,65	0,3254	0,0929	0,0929	0,3254
	Неравномерная с итерационным учащением, $N = 1\ 262$	132,10	-22,19	-22,19	132,10	0,3252	0,0928	0,0928	0,3252

Таблица 2

Матрицы **C** и **L** для ЛП2, полученные в различных программных средствах

Table 2

Matrices **C** and **L** for TL2 obtained in different programs

Программное средство	Сегментация	C, пФ/м			L, мкГн/м												
Ansys Q2D Extractor (метод конечных элементов)	$N_t = 6\ 715$	126,61	-13,39	-13,39	33,82	-72,26	-7,67	376,50	0,5041	0,2178	0,1205	0,2178	0,6487	0,0835	0,1205	0,0835	0,2231
[14]	Нет данных	125,86	-13,13	-13,13	34,10	-69,56	-7,18	357,62	0,4919	0,1989	0,1775	0,1989	0,6128	0,0768	0,1775	0,0768	0,2299
Разработанное программное средство	$N = 576$	125,47	-10,00	-9,97	34,17	-69,37	-8,50	356,04	0,4669	0,1413	0,1101	0,1413	0,5522	0,0650	0,1101	0,0650	0,2267

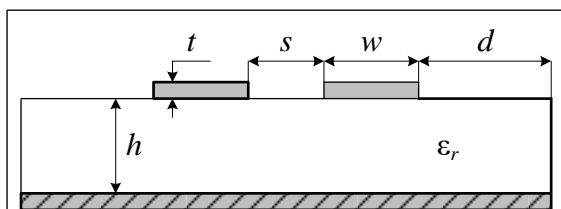


Рис. 5. Поперечное сечение двухпроводной микрополосковой линии передачи (ЛП1)

Fig. 5. Cross section of a two-conductor microstrip transmission line (TL1)

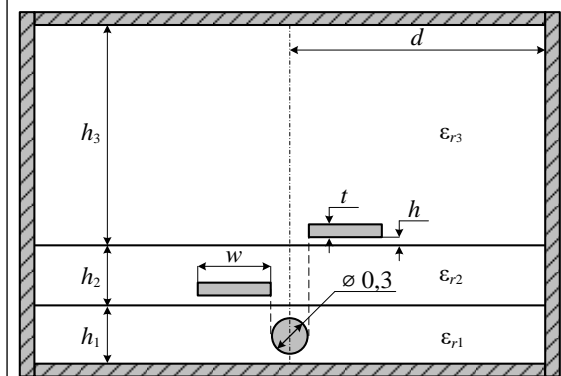


Рис. 6. Поперечное сечение МПЛП (ЛП2)

Fig. 6. Cross section of a multiconductor transmission line (TL2)

программного средства, хорошо согласуются с аналогичными параметрами в других программных средствах. Так, относительное различие по элементу c_{11} для ЛП1 не превышает 2 %, для ЛП2 – 1 %.

Выполним многовариантный анализ для ЛП1. Для этого последовательно варьируются геометрические параметры w и t в диапазоне от –7 % до 7 % с шагом 1 % (всего по 15 вариаций). Общее число вычислений (число экстрагированных матриц **C** и **L**) составило 225. По экстрагированным матрицам выполнен статистический анализ (вычислены характеристики: математическое ожидание E , дисперсия D , среднее квадратическое отклонение σ и довери-

тельный интервал δ), представленный в таблице 3. Как видно, все среднее квадратические отклонения находятся в диапазоне 1–3 % от среднего значения (E), при этом наименьшее значение σ наблюдается у c_{12} (1,2 %).

Таблица 3

Статистические характеристики для элементов матриц **C и **L** ЛП1**

Table 3

Statistical characteristics for the entries of TL1 matrices **C and **L****

Элемент матрицы	E	D	σ	δ
c_{11}	130,60, пФ/м	11,492, (пФ/м) ²	3,390, пФ/м	0,445, пФ/м
c_{12}	–22,84, пФ/м	0,069, (пФ/м) ²	0,264, пФ/м	0,035, пФ/м
l_{11}	0,3250, мкГн/м	56,160, (нГн/м) ²	7,494, нГн/м	0,979, нГн/м
l_{12}	0,0911, мкГн/м	7,885, (нГн/м) ²	2,808, нГн/м	0,369, нГн/м

Заключение

Таким образом, с использованием синтаксиса интерпретируемого языка программирования MATLAB, совместимого с GNU Octave, разработан прототип программного средства расчета первичных погонных параметров МПЛП (матриц **L** и **C**) и проверки корректности их элементов. Разработанный прототип состоит из шести модулей, первые пять из которых являются полностью самостоятельными, а шестой выполняет их последовательный запуск. Разработанный прототип верифицирован с использованием ряда существующих программных средств. В дальнейшем на его основе планируется создание программного комплекса экстракции параметров на низкоуровневом языке программирования. Кроме того, модульность прототипа позволяет использовать его отдельные модули, в частности, для академических задач.

Список литературы

1. Paul C.R. Analysis of multiconductor transmission lines. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Publ., 2007, 803 p.
2. Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A. et al. From symmetry to asymmetry: The use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration. Symmetry, 2020, vol. 12, no. 7, art. 1117. doi: 10.3390/sym12071117.
3. Makarov S.N., Noetscher G.M., Nazarian A. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Publ., 2015, 616 p.
4. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC Publ., 2021, 272 p.
5. Maksimov A.E., Kuksenko S.P. Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, vol. 64, no. 5, pp. 1514–1521. doi: 10.1109/TEMC.2022.3175717.
6. Maksimov A., Kuksenko S. Adaptive segmentation of multiconductor transmission lines in quasi-static analysis by the method of moments. JPCS, 2021, vol. 1862, no. 1, art. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012020.

7. Максимов А.Е., Куksenko С.П. Адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации при решении электростатических задач методом моментов // СИБРЕСУРС-26-2020: матер. Междунар. науч.-практич. конф. 2020. С. 112–116.
8. Gu Z., Wu H., Zhao X., Zhang Y. New LU decomposition accelerating parallel method of moments and its application. Proc. IEEE MTT-S IWS, 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/IEEE-IWS.2018.8400942.
9. Meurant G., Tebbens J.D. Krylov methods for nonsymmetric linear systems: From theory to computations. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2020, 691 p. doi: 10.1007/978-3-030-55251-0.
10. Kehl R., Nabben R., Szlyd D.B. Adaptive multilevel Krylov methods. ETNA, 2017, vol. 51, pp. 512–528. doi: 10.1553/etna_vol51s512.
11. Daas H., Grigori L., Hénon P., Ricoux P. Enlarged GMRES for solving linear systems with one or multiple right-hand sides. IMA J. of Numerical Analysis, 2019, vol. 39, no. 4, pp. 1924–1956. doi: 10.1093/imanum/dry054.
12. Sun D.L., Huang T.Z., Jing Y.F., Carpentieri B. A block GMRES method with deflated restarting for solving linear systems with multiple shifts and multiple right-hand sides. Numerical Linear Algebra with Applications, 2018, vol. 25, no. 5, art. e2148. doi: 10.1002/nla.2148.
13. Стручков С.М., Сычев А.Н. Методика измерения погонных параметров симметричных связанных линий // Электронные средства и системы управления: матер. Междунар. науч.-практич. конф. 2015. № 1-1. С. 159–163.
14. Musa S.M., Sadiku M.N.O. Application of the finite element method in calculating the capacitance and inductance of multiconductor transmission lines. Proc. IEEE SoutheastCon, 2008, pp. 300–304. doi: 10.1109/SECON.2008.4494308.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.344-353

2024, 37(3), pp. 344–353

MATLAB/GNU Octave for calculating per-unit-length parameters of multiconductor transmission lines using the method of moments

Aleksandr E. Maksimov ¹✉, Pavel P. Snetkov ¹,
Anton A. Ivanov ¹, Sergey P. Kuksenko ¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) –
Research Laboratory “Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment”,
Tomsk, 634050, Russian Federation

For citation

Maksimov, A.E., Snetkov, P.P., Ivanov, A.A., Kuksenko, S.P. (2024) ‘MATLAB/GNU Octave for calculating per-unit-length parameters of multiconductor transmission lines using the method of moments’, *Software & Systems*, 37(3), pp. 344–353 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.344-353

Article info

Received: 07.02.2024

After revision: 09.03.2024

Accepted: 18.03.2024

Abstract. The paper describes a prototype of software for calculating (extraction) primary per-unit-length parameters (electrostatic and electromagnetic induction coefficient matrices) developed using MATLAB/GNU Octave programming language. The program extracts parameters of multiconductor transmission lines with arbitrary cross-section, any number of dielectric layers and conductors on each layer. It uses the numerical method of moments. There are implemented uniform and 2 methods of non-uniform segmentation of transmission line cross-section boundaries (corner and projection segmentation). There are also 3 methods of iterative segmentation (segmentation of all segments, only those segments whose length exceeds the set threshold value and segments with the highest charge density). Four methods of solving the matrix equations are implemented: LU-decomposition, BI-BiCGStab, BI-IDR(S) and BI-GMRES. Parameter extracting is followed by their physicality check. The developed prototype is also able to perform multivariate analysis, i.e. automatic iterative extraction of transmission line parameters when the input data (geometric and electrophysical parameters) change according to a certain rule. The results of multivariate analysis can become a base for statistical analysis (calculation of basic statistical characteristics such as mathematical expectation, variance, standard deviation and confidence interval). Verification of the prototype showed that the extracted parameters agree with similar ones from other software. Great flexibility of configuration, modularity, different methods of segmentation and matrix equation solution allow using both the prototype as a whole and its separate modules for research and academic tasks. The calculated primary per-unit-length parameters of the line help to calculate its scattering parameters easily.

Keywords: program, primary per-unit-length parameter calculation, multiconductor transmission lines, quasi-static approximation, method of moments

Acknowledgements. The development of the software prototype was funded by the Russian Science Foundation 23-79-10165 (<https://rscf.ru/en/project/23-79-10165/>) at TUSUR. The modeling of multiconductor transmission lines was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEWM-2024-0005

References

1. Paul, C.R. (2007) *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Publ., 803 p.
2. Belousov, A.O., Chernikova, E.B., Samoylichenko, M.A. et al. (2020) ‘From symmetry to asymmetry: The use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration’, *Symmetry*, 12(7), art. 1117. doi: 10.3390/sym12071117.
3. Makarov, S.N., Noetscher, G.M., Nazarian, A. (2015) *Low-frequency Electromagnetic Modeling for Electrical and Biological Systems Using MATLAB*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Publ., 616 p.
4. Gibson, W.C. (2021) *The Method of Moments in Electromagnetics*. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC Publ., 272 p.
5. Maksimov, A.E., Kuksenko, S.P. (2022) ‘Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines’, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(5), pp. 1514–1521. doi: 10.1109/TEMC.2022.3175717.
6. Maksimov, A., Kuksenko, S. (2021) ‘Adaptive segmentation of multiconductor transmission lines in quasi-static analysis by the method of moments’, *JPCS*, 1862(1), art. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012020.
7. Maksimov, A.E., Kuksenko, S.P. (2020) ‘Adaptive iterative selection of optimal segmentation in solving electrostatic problems by the method of moments’, *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Natural and Intellectual Resources of Siberia*, pp. 112–116 (in Russ.).
8. Gu, Z., Wu, H., Zhao, X., Zhang, Y. (2018) ‘New LU decomposition accelerating parallel method of moments and its application’, *Proc. IEEE MTT-S IWS*, pp. 1–3. doi: 10.1109/IEEE-IWS.2018.8400942.
9. Meurant, G., Tebbens, J.D. (2020) *Krylov Methods for Nonsymmetric Linear Systems: From Theory to Computations*. Berlin, Heidelberg: Springer Publ., 691 p. doi: 10.1007/978-3-030-55251-0.
10. Kehl, R., Nabben, R., Szyld, D.B. (2017) ‘Adaptive multilevel Krylov methods’, *ETNA*, 51, pp. 512–528. doi: 10.1553/etna_vol51s512.
11. Daas, H., Grigori, L., Hénon, P., Ricoux, P. (2019) ‘Enlarged GMRES for solving linear systems with one or multiple right-hand sides’, *IMA J. of Numerical Analysis*, 39(4), pp. 1924–1956. doi: 10.1093/imanum/dry054.
12. Sun, D.L., Huang, T.Z., Jing, Y.F., Carpentieri, B. (2018) ‘A block GMRES method with deflated restarting for solving linear systems with multiple shifts and multiple right-hand sides’, *Numerical Linear Algebra with Applications*, 25(5), art. e2148. doi: 10.1002/nla.2148.
13. Struchkov, S.M., Sychev, A.N. (2015) ‘Methodology for measuring linear parameters of symmetrical coupled lines’, *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Electronic Means and Control Systems*, (1-1), pp. 159–163 (in Russ.).
14. Musa, S.M., Sadiku, M.N.O. (2008) ‘Application of the finite element method in calculating the capacitance and inductance of multiconductor transmission lines’, *Proc. IEEE SoutheastCon*, pp. 300–304. doi: 10.1109/SECON.2008.4494308.

Авторы

Максимов Александр Евгеньевич¹,
инженер, mae@tusur.ru
Снетков Павел Павлович¹,
техник, spp@tu.tusur.ru
Иванов Антон Андреевич¹, к.т.н.,
старший научный сотрудник, anton.ivvv@gmail.com
Куксенко Сергей Петрович¹,
д.т.н., доцент, зав. лабораторией,
sergei.p.kuksenko@tusur.ru

¹ Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР) –
Научно-исследовательская лаборатория
«Безопасность и электромагнитная совместимость
радиоэлектронных средств»,
г. Томск, 634050, Россия

Authors

Aleksandr E. Maksimov¹,
Engineer, mae@tusur.ru
Pavel P. Snetkov¹,
Technical Fellow, spp@tu.tusur.ru
Anton A. Ivanov¹, Cand. of Sci. (Engineering),
Senior Researcher, anton.ivvv@gmail.com
Sergey P. Kuksenko¹, Dr.Sci. (Engineering),
Associate Professor, Head of Laboratory,
sergei.p.kuksenko@tusur.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR) –
Research Laboratory
“Safety and Electromagnetic
Compatibility of Radioelectronic Equipment”,
Tomsk, 634050, Russian Federation