

Н.С. Павлов, В.А. Сурков, Е.С. Жечев

## Методика синтеза связанных микрополосковых линий передач без потерь с использованием технологий искусственного интеллекта

Представлена методика синтеза микрополосковых связанных линий передач без потерь с использованием различных базисных наборов проектных параметров и технологий искусственного интеллекта. Использование данной методики позволяет эффективно проводить проектирование связанных микрополосковых линий передач, уменьшая временные затраты на разработку. В методике используются точные выражения для перехода между базисными наборами проектных параметров и технологии искусственного интеллекта для синтеза геометрических параметров на основе данных базисных наборов.

**Ключевые слова:** связанные микрополосковые линии передач, погонные параметры, синтез, искусственный интеллект,  $N$ -нормы.

На сегодняшний день при создании радиоэлектронного устройства (РЭУ) принято уделять большое внимание надежности и электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за уязвимости РЭУ к большому количеству электромагнитных помех. К данным электромагнитным помехам относится, к примеру сверхширокополосная помеха, которая представляет особую опасность из-за способности обходить традиционные системы защиты. Для защиты РЭУ от электромагнитных помех используются различные фильтры. В составе данных фильтров используются связанные микрополосковые линии (МПЛ) передач. Данные линии используют модальные искажения, а именно изменение уровня помехи за счет разности задержек мод его поперечных волн [1, 2].

С развитием технологий и требований к устройствам становится необходимым создание более компактных и эффективных связанных МПЛ передач. Многократный анализ конструкции поперечного сечения связанной МПЛ передачи с процедурами оптимизации параметров не всегда является эффективным процессом. Поэтому для достижения более компактных и эффективных линий необходимо проводить синтез, чтобы эффективно подобрать электрические и геометрические параметры связанной МПЛ передач. Также для более эффективного синтеза параметров связанной линии возможно прибегнуть к технологиям искусственного интеллекта. Данные технологии позволяют значительно уменьшить временные затраты на проектирование и не требуют значительных вычислительных мощностей.

Цель работы – разработка методики синтеза связанной МПЛ передачи без потерь с использованием технологий искусственного интеллекта.

### Конструкция связанной МПЛ передачи и ее параметры

Конструкция связанной МПЛ передачи представлена на рис. 1.

Конструкция связанной линии состоит из двух слоев. На верхнем слое расположены 2 параллельных симметричных сигнальных проводника, на нижнем слое расположен один опорный проводник в виде сплошного полигона.

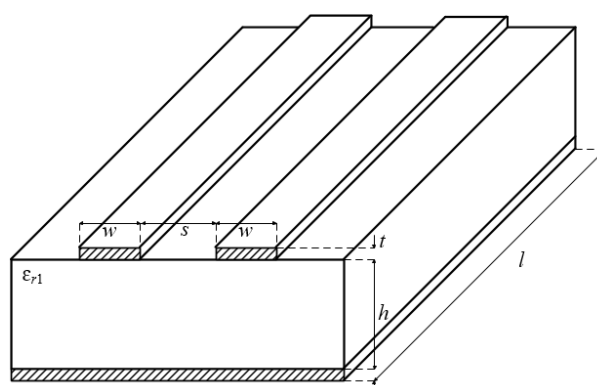


Рис. 1. Конструкция связанной МПЛ

К основным параметрам связанной линии относятся геометрические параметры, а именно:  $w$  – ширина проводников,  $s$  – расстояние между проводниками,  $t$  – толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $l$  – длина линии и  $\epsilon_r$  – величина диэлектрической проницаемости. К основным электрическим параметрам линии относятся погонные параметры:  $R$  (Ом/м) – погонное сопротивление,  $G$  (См/м) – погонная проводимость,  $C$  (Ф/м) – погонная емкость и  $L$  (Гн/м) – погонная индуктивность. Погонное сопротивление  $R$  и проводимость  $G$  зависят от проводимости материала и качества диэлектрика соответственно. Погонные индуктивность  $L$  и ёмкость  $C$  определяются формой и размером поперечного сечения ЛП, а также расстоянием между проводниками. Так как в работе рассматривается методика синтеза для линии без потерь, то погонное сопротивление  $R$  и проводимость  $G$  равны нулю. Также к основным параметрам связанной линии относятся ее собственные и взаимные волновые сопротивления (импедансы) –  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$ .

### Базисные наборы проектных параметров

Для синтеза связанной МПЛ передачи для начала можно использовать базисные наборы проектных параметров. Данные параметры являются определенными наборами, между которыми существует взаимосвязь. Минимальное количество данных параметров равняется четырем [3]. Так как в большинстве случаев целью синтеза данных линий

являются погонные параметры [4], то их возможно синтезировать с помощью данных базисных наборов по известным выражениям. Предположим, что нам заранее известны собственное  $Z_{11}$  и взаимное  $Z_{12}$  волновые сопротивления линий и их необходимые эффективные погонные задержки  $\tau_{\text{eff}(e,o)}$ . С помощью выражений (1)–(4) возможно перейти к следующему базисному набору проектных параметров, которые представляют собой модальные параметры, а именно к значению четной и нечетной эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{reff } e}$  и  $\epsilon_{\text{reff } o}$ , а также значению четного и нечетного волнового сопротивления  $Z_{0e}$  и  $Z_{0o}$ .

$$\epsilon_{\text{reff}(e,o)} = \tau_{\text{eff}(e,o)}^2 \cdot c^2, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

$$Z_{0e} = Z_{11}(1+k), \quad (2)$$

$$Z_{0o} = Z_{11}(1-k), \quad (3)$$

где

$$k = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}. \quad (4)$$

На основе данных модальных параметров возможно перейти к следующему базисному набору, а именно к характеристическим (согласованным) параметрам: волновое сопротивление  $Z_0$ , характеристическая эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{reff}}$  и коэффициент неуравновешенности связи  $\delta$ .

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0o}Z_{0e}}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}\epsilon_{\text{reff } o}}, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{(\tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o})^2 - 1}{(\tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o})^2 + 1}. \quad (7)$$

Используя данные характеристические параметры, возможно перейти к следующему базисному набору проектных параметров, а именно к собственному волновому сопротивлению  $Z_1$ , диэлектрической проницаемости одной из линий  $\epsilon_{\text{reff } 1}$ , а также к коэффициенту емкостной и индуктивной связи  $k_C$  и  $k_L$  с помощью выражений (8)–(11). Для физической реализуемости значения  $k_C$  и  $k_L$  должны лежать в следующих пределах:  $0 \leq k_C, k_L < 1$ .

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}Z_{0e}} + \sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}Z_{0o}}}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}/Z_{0e}} - \sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}/Z_{0o}}}}, \quad (8)$$

$$\epsilon_{\text{reff } 1} = (\epsilon_{\text{reff } e}Z_{0e} + \epsilon_{\text{reff } o}Z_{0o}) \left( \frac{\epsilon_{\text{reff } e}}{Z_{0e}} + \frac{\epsilon_{\text{reff } o}}{Z_{0o}} \right) / 4, \quad (9)$$

$$k_C = \frac{Z_{0e}/Z_{0o} - \tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o}}{Z_{0e}/Z_{0o} + \tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o}}, \quad (10)$$

$$\delta = \frac{(\tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o})^2 - 1}{(\tau_{\text{eff } e}/\tau_{\text{eff } o})^2 + 1}. \quad (11)$$

Наконец, синтез погонных параметров, а именно синтез собственных и взаимных емкостей и индуктивностей:  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  с помощью следующих выражений:

$$C_{11} = (\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}/Z_{0e}} + \sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}/Z_{0o}})/(2c), \quad (12)$$

$$C_{12} = (\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}/Z_{0e}} - \sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}/Z_{0o}})/(2c), \quad (13)$$

$$L_{11} = (Z_{0e}\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}} + Z_{0o}\sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}})/(2c), \quad (14)$$

$$L_{12} = (Z_{0e}\sqrt{\epsilon_{\text{reff } e}} - Z_{0o}\sqrt{\epsilon_{\text{reff } o}})/(2c), \quad (15)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

Не обязательно заранее знать именно базисный набор с собственными и взаимными волновыми сопротивлениями и их эффективные погонные задержки. Достаточно иметь значения любого из базисных наборов проектных параметров, тогда перейти к другому не составит труда.

### Метод синтеза связанных МПЛ

Под синтезом связанной МПЛ подразумевают процесс проектирования связанной МПЛ и ее параметров с помощью известных выражений или характеристик. Для эффективного синтеза связанных МПЛ передач необходимо учитывать значения  $N$ -норм [5]. Данные параметры используются для характеристики сигнала во временной области и исторически были предложены, чтобы определить пределы восприимчивости оборудования. Расчет  $N$ -норм основан на применении математических операторов ко всей форме сигнала. В таблице приведены формулы для вычисления норм, их названия и применение.

**$N$ -нормы и их характеристики**

№	Формула	Название	Применение
1	$N_1 =  R(t) _{\max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы, электрический пробой
2	$N_2 = \left  \frac{\partial R(t)}{\partial t} \right _{\max}$	Пиковая (абсолютное) производная	Искрение компонента, сбой схемы
3	$N_3 = \left  \int_0^t R(t) dt \right _{\max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой
4	$N_4 = \int_0^{\infty}  R(t)  dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
5	$N_5 = \left\{ \int_0^{\infty}  R(t) ^2 dt \right\}^{1/2}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

Для эффективного синтеза связанных МПЛ передач с применением технологий искусственного интеллекта можно использовать библиотеки Scikit-learn, Keras и Tensorflow. Данные библиотеки предназначены, в основном, для решения задач машинного обучения: классификации и регрессии, но не обладают возможностями для прямого синтеза данных линий. Однако можно настроить и обучить модели таким образом, чтобы по характеристикам связанной линии модели искусственного интеллекта предсказывали искомые параметры, а именно геометрические параметры линии. Для решения данной задачи можно использовать существующие модели, предназначенные для решения задач регрессии. Методом машинного обучения, который подходит для

данной задачи, является контролируемое машинное обучение [6–8]. Алгоритм работы контролируемого машинного обучения представлен на рис. 2.

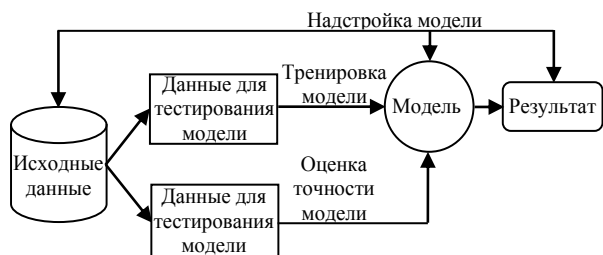


Рис. 2. Алгоритм работы контролируемого машинного обучения

На рис. 3 представлена предлагаемая методика в виде блок-схемы синтеза связанных МПЛ.

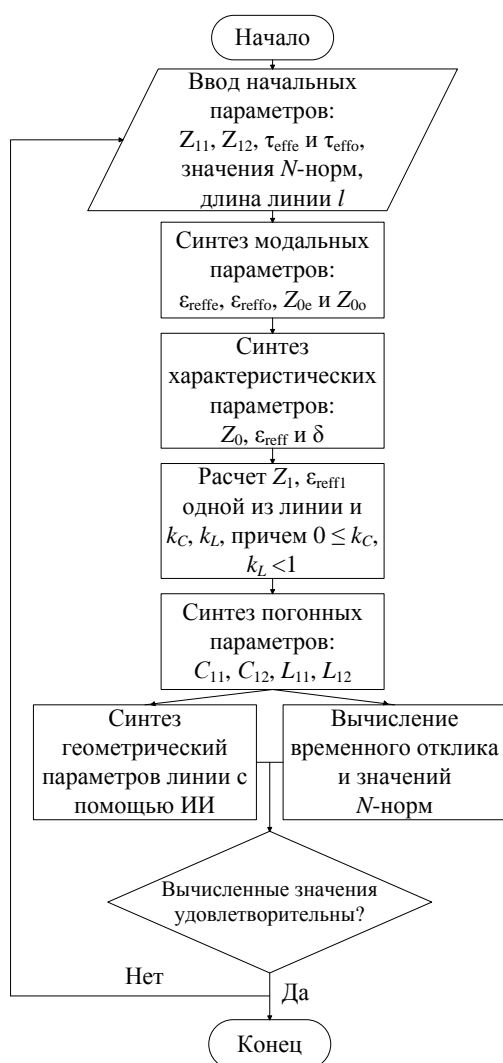


Рис. 3. Методика синтеза связанных МПЛ

Также предположим, что нам заранее известен базисный набор, который включает в себя значения собственного  $Z_{11}$  и взаимного  $Z_{12}$  волнового сопротивления линий и эффективные погонные задержки  $\tau_{\text{eff}(e,o)}$ , а также известны длина линии и значения  $N$ -норм. По известным выражениям производится

синтез модальных параметров связанных МПЛ передач. Далее происходит синтез характеристических параметров, а именно волнового сопротивления  $Z_0$ , характеристической эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{reff}}$  и коэффициента неуровненности связи  $\delta$ . На основе данных характеристических параметров происходит расчет собственного волнового сопротивления одной из линий  $Z_1$ , диэлектрической проницаемости одной из линий  $\epsilon_{\text{reff}1}$ , а также коэффициента емкостной и индуктивной связи  $k_C$  и  $k_L$  соответственно. Далее синтезируются погонные параметры связанной МПЛ передачи. Причем из-за того, что линия симметричная и собственные значения будут иметь равное значения, то достаточно рассчитать только значения  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $L_{11}$  и  $L_{12}$ .

На основе вычисленных погонных параметров происходят вычисления временного отклика и вычисления значений  $N$ -норм. На данном этапе также необходимо учитывать длину линии  $l$ . Также происходит синтез геометрических параметров поперечного сечения  $w$ ,  $h$ ,  $s$  и  $t$  с помощью использования технологий искусственного интеллекта. Для данной задачи необходимо иметь большую базу данных, чтобы обучение модели синтеза было эффективным и точным.

После синтеза всех необходимых параметров связанных МПЛ передач необходимо проанализировать полученные данные. Если геометрические параметры и значения  $N$ -норм удовлетворяют требованиям, то методика синтеза завершается. Если вычисленные данные не удовлетворяют требованиям, то необходимо заново перейти в подбору начальных параметров.

Причем, как говорилось ранее, начальные базисные наборы проектных параметров могут не обязательно состоять из собственного и взаимного волнового сопротивления линий и погонной задержки. В качестве начальных базисных наборов могут служить модальные параметры, характеристические параметры и т.д.

В результате, была предложена методика синтеза связанных МПЛ передач без потерь. Методика синтеза состоит из синтеза базисных наборов проектных параметров и синтеза данных параметров с помощью технологий искусственного интеллекта. В качестве начальных параметров синтеза могут выступать длина линии, значения  $N$ -норм и любой базисный набор проектных параметров. Предлагаемый метод позволит сделать процесс синтеза связанных МПЛ передач без потерь проще и эффективней.

### Литература

- Жечев Е.С. и др. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162–179.
- Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2013. – 151 с.

3. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 26–30.

4. Сычев А.Н. и др. Модальные параметры неодинаковых связанных линий // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 26–30.

5. Baum С.Е. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes. – 1979. – Vol. 63. – PP. 1–42.

6. Sarkar D. et al. Machine Learning Assisted Hybrid Electromagnetic Modeling Framework and Its Applications to UWB MIMO Antennas // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – PP. 19645–19656.

7. Mahesh B. Machine learning algorithms-a review // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2020. – Vol. 9, No. 1. – PP. 381–386.

8. Harshvardhan G.M. et al. A comprehensive survey and analysis of generative models in machine learning // Computer Science Review. – 2020. – Vol. 38. – P. 100285.

---

**Павлов Никита Сергеевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: pavlov.n@tu.tusur.ru

**Сурков Вячеслав Андреевич**

Магистрант каф. ПИШ ТУСУРа

Эл. почта: surkov.vyacheslav@tu.tusur.ru

**Жечев Евгений Сергеевич**

Канд. техн. наук, ст. преп. каф. СВЧиКР ТУСУРа

Эл. почта: zhechev@tu.tusur.ru