

Методика синтеза топологии платы узла радиочастотного тракта

Д.Н. Новомейский, М.Н. Пиганов, А.А. Лупцов, Д.С. Богданов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

Аннотация – Обоснование. Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью уменьшения трудоемкости процесса проектирования топологии плат пленочных узлов радиочастотного и микроволнового трактов. **Цель.** Разработка методики моделирования и синтеза параметров пленочных узлов радиочастотного и микроволнового трактов радиоэлектронной аппаратуры на базе модернизированной среды проектирования AWR Microwave Office Environment 15. **Методы.** В статье рассмотрена методика синтеза топологии плат, которая включает следующие основные операции и процедуры: настройку испытательных стендов, анализ исходных данных, оценку требуемых значений электрических параметров, адаптивное разбиение сетки, моделирование мультиплексированных сигналов, моделирование искажений элементов, маршрутизацию трассировки цепей, проверку решений с помощью таблиц, оценку выполненного проекта с помощью испытательных стендов, минимизацию расстояний между проводниками, построение и оптимизацию графиков. Отработка методики проводников проводилась на примере моделирования и конструкторского проектирования шлейфного направленного ответвителя РЧ- и МКВ-трактов. **Результаты.** Синтезирована топология шлейфного направленного ответвителя с частотой сигнала 10 ГГц для его реализации по толстопленочной технологии на подложке из поликора и Du Pont 951 толщиной 0,25 мм. Построена АЧХ ответвителя. **Заключение.** Полученная топология удовлетворяет требованиям технического задания. Экспериментальная отработка методики показала, что она позволяет на 20–40 % сократить трудоемкость моделирования основных характеристик узлов и уменьшить до 30 % информационные ресурсы.

Ключевые слова – методика; проектирование; топология; шлейфный направленный ответвитель; моделирование; операции синтеза; трудоемкость.

Введение

Конкурентоспособность выпускаемой продукции во многом определяется ее качеством. Это касается в первую очередь наукоемких отраслей, таких как радиотехника, электроника, приборостроение. Качество радиоэлектронных систем и устройств закладывается на этапе их проектирования. В связи с этим важно использовать высокоэффективные методы разработки, проектирования и синтеза этих изделий и процессов их производства.

На данном этапе разработано много методик такого типа. К ним можно отнести методики формирования конструктивного базиса бортовой радиоэлектронной аппаратуры [1], моделирования сверхширокополосных полосовых СВЧ-фильтров [2], моделирования матриц переходов СВЧ-коммутаторов [3], создания проектных решений обеспечения тепловых режимов аппаратуры БПЛА [4], оценки метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования [5], оптимизации эффективности экранирования от ЭМ-полей [6], моделирования и синтеза фазовращающих пленочных элементов [7], расчета усталостной надежности паяных соединений [8],

организации процесса сквозного проектирования радиоэлектронных средств на базе интегрированных САПР, CALS-технологий [9] и др. Качество устройств и узлов РЧ-тракта, заложенное на этапе проектирования, реализуется на этапах производства, испытания и контроля [10; 11].

Основным недостатком этих методик является большие трудоемкость проектирования и объем информационных ресурсов.

Целью данной работы является разработка методики моделирования и синтеза параметров пленочных узлов радиочастотного и микроволнового трактов радиоэлектронной аппаратуры на базе модернизированной среды проектирования AWR Microwave Office Environment 15, обеспечивающей уменьшение трудоемкости процесса разработки и сокращение информационных ресурсов.

1. Методика синтеза

Предлагаемая методика отличается тем, что она включает следующие операции и процедуры: предварительную настройку испытательных стендов системы (библиотек); электромагнитный (ЭМ) анализ исходных данных и требуемых значений электрических параметров; выявление и анализ

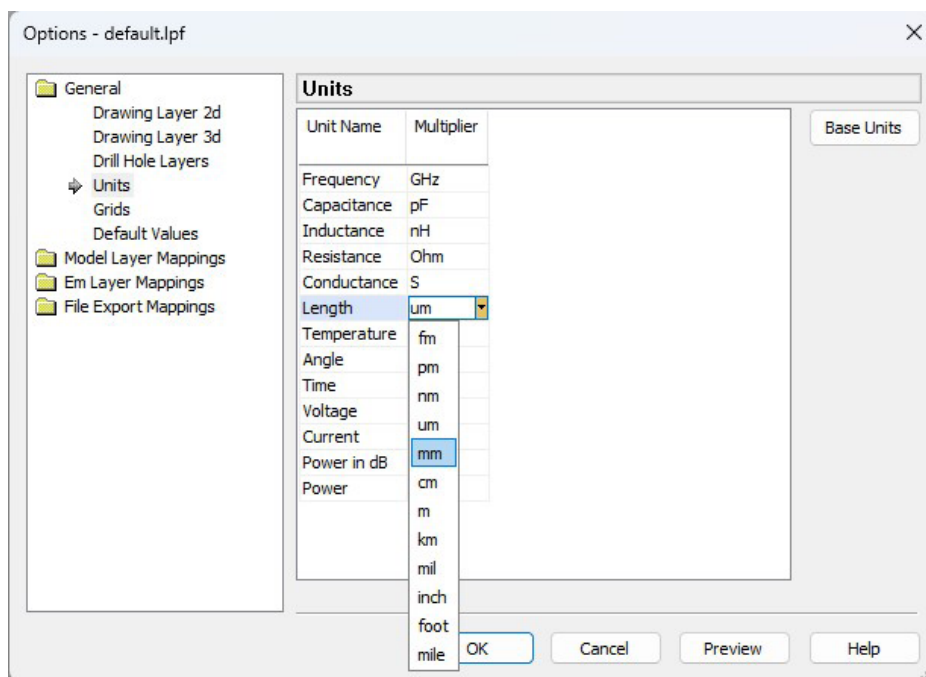


Рис. 1. Установка глобальной переменной «Длина» в миллиметровый диапазон
 Fig. 1. Setting the global variable «Length» to the millimeter range

возможных паразитных параметров; предварительную разработку испытательных стендов для конфигурирования; предварительную проверку испытательных стендов; настройку испытательных стендов системы проектирования; анализ электромагнитных пленочных структур с помощью интеллектуально адаптивного разбиения сетки; моделирование предполагаемых радиочастотных мультиплексированных сигналов; моделирование цифрового предварительного искажения элементов (фрагментов); маршрутизацию трассировки цепей с помощью динамически рассчитанных направляющих; сравнение комбинаций топологических решений; проверку решения с помощью справочных таблиц; оценку качества элементов и компонентов схемы; оценку выполненного проекта с помощью испытательных стендов; проверку проектного решения с помощью динамически расчлененных направляющих для маршрутизации трассировки проводников с минимально допустимыми расстояниями; минимизацию размеров топологических элементов; построение графиков; оптимизацию графиков и нанесение на них обозначений из диалогового окна измерения.

В качестве базовой среды проектирования использована AWR Design Environment 15.

2. Отработка методики

Отработка методики проводилась на примере моделирования основных характеристик и

конструкторского проектирования шлейфного направленного ответвителя (ШНО) РЧ- и МКВ-трактов.

2.1. Краткая характеристика объекта исследования. В технике СВЧ мостовые схемы обычно используются как делители мощности на два канала (в равных отношениях при высокой развязке между ними) и как балансные смесители с высокой развязкой между входными каналами.

При использовании мостовой схемы в качестве делителя энергия подается на плечо 1, распределение мощности энергии происходит в равном соотношении между плечами 2 и 4, а при подаче мощности в плечо 2 энергия распределяется между плечами 1 и 3. В первом случае в плече 3, а во втором – в плече 4 устанавливается оконечная нагрузка.

При использовании мостовой схемы в качестве смесителя энергия подается в плечи 1 и 3, выходными плечами будут 2 и 4.

Направленные ответвители шлейфные применяются в аппаратуре СВЧ: в разветвителях и сумматорах мощности, в фазовращателях, переключателях, балансных смесителях, для изоляции передающих и приемных устройств, работающих на одну общую нагрузку. Шлейфные направленные ответвители имеют большие габариты и узкую рабочую полосу частот.

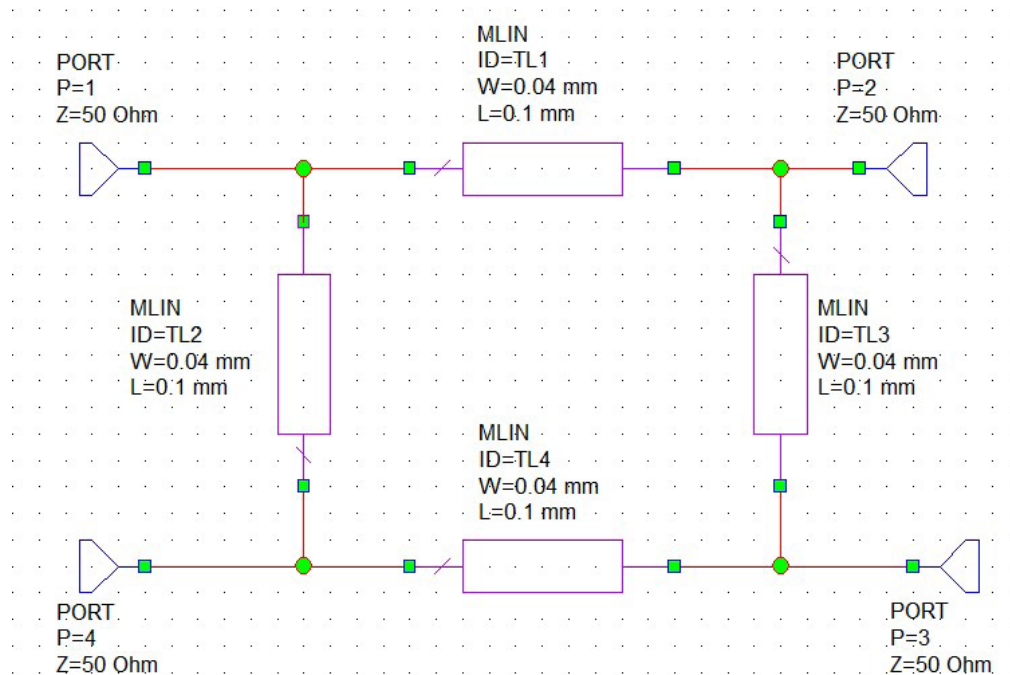


Рис. 2. Электрическая схема с параметрами по умолчанию
Fig. 2. Electrical diagram with default parameters

Основные частотные характеристики следующие:

- связь (переходное ослабление) $\bar{C} = 10\lg(P_1 / P_4)$, дБ. Здесь P_1 и P_4 – мощность в 1-м и 4-м плечах направленного ответвителя соответственно;
- направленность $D = 10\lg(P_4 / P_3)$, дБ. Здесь P_4 и P_3 – мощность в 4-м и 3-м плечах направленного ответвителя соответственно;
- коэффициент стоячей волны, KCB .

2.2. Требования к параметрам шлейфного ответвителя: частота сигнала 10 ГГц, материал подложки – поликор и Du Pont 951 толщиной 0,25 мм. Технология изготовления – толсто пленочная.

Опираясь на требования технического задания, синтезируем топологию шлейфного направленного ответвителя. Для этого используем вышеуказанную методику и модернизированную программу Microwave Office, а именно – AWR Design Environment 15. Последовательность операций будет следующей: создаем новый проект «ШНО»; открываем Options → Project Options → Edit Units → Length; устанавливаем этот параметр («длина») в миллиметровый диапазон, так как длины и ширины элементов MLIN (двухсторонняя микрополосковая линия) удобнее рассматривать в миллиметрах. Схема установки параметра приведена на рис. 1.

Теперь во вкладке Elements → Ports → PORT вынесем четыре порта в рабочее поле. Затем во вкладке Elements выберем опцию Microstrip и

подопцию Lines. Затем выберем пункт MLIN и вынесем четыре двухсторонние микрополосковые линии в рабочее поле. Соединим между собой порты и линии для получения топологической схемы. Таким образом, получаем схему (рис. 2) со стандартными значениями ширины и длины у микрополосковых линий. Везде установлены значения $W = 0,04$ мм и $L = 0,1$ мм, что не соответствует волновым сопротивлениям, необходимым для работы мостового устройства.

Необходимо получить на линиях MLIN ID = 1 и MLIN ID = 4 такие длины и ширины, которые будут соответствовать волновому сопротивлению Z_1 и $Z_4 = 50 / \sqrt{2}$ Ом. А на линиях MLIN ID = 2 и MLIN ID = 3 такие длины и ширины, которые будут соответствовать волновому сопротивлению Z_2 и $Z_3 = 50$ Ом. Для этого воспользуемся встроенным в среду проектирования AWR Design Environment 15 инструментом (вкладкой) TXLine: Tools. В этой вкладке выбираем опцию TXLine, при этом открывается окно (рис. 3).

В этом окне установим параметры диэлектрической постоянной Dielectric Constant, то есть нашу диэлектрическую постоянную $\epsilon_r = 7,8$ и тангенс угла диэлектрических потерь Loss Tangent $\tan(\delta) = 0,006$. Затем вводим через клавиатуру для параметров MLIN ID = 1 и MLIN ID = 4 Impedance равным $50 / \sqrt{2} = 35,36$ Ом. А для MLIN ID = 2 и MLIN ID = 3 установим параметр импеданса Impedance равным 50 Ом. В поле Frequency устано-

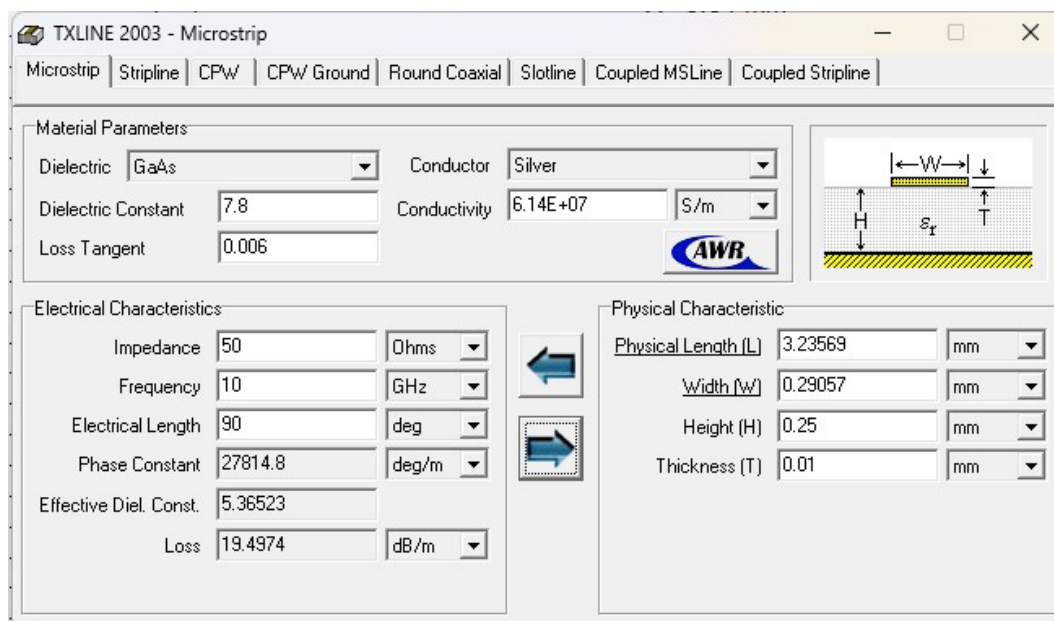


Рис. 3. Окно настроек инструмента TXLine
 Fig. 3. TXLine tool settings window

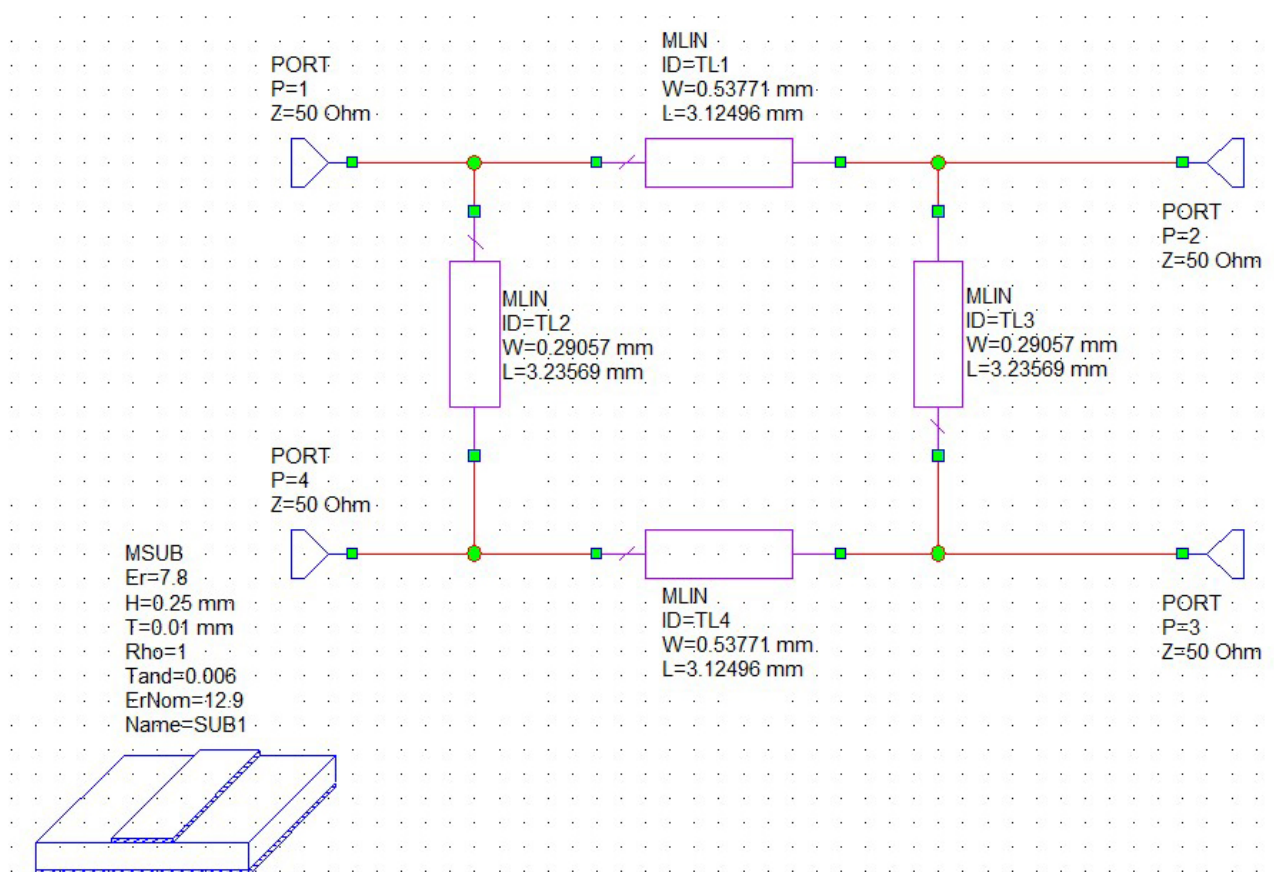


Рис. 4. Электрическая схема с параметрами, соответствующими техническому заданию
 Fig. 4. Electrical diagram with parameters corresponding to the technical specifications

вим 10 ГГц для всех линий. Electrical Length также для всех линий равна 90°. Вводим параметры высоты и толщины Height(H) = 0,25 мм и Thickness (T) = 0,01.

После, выбрав в папке Substrates опцию MSUB, зададим наши электрические параметры в соответствии с техническим заданием. Электрическая схема ШНО приведена на рис. 4.

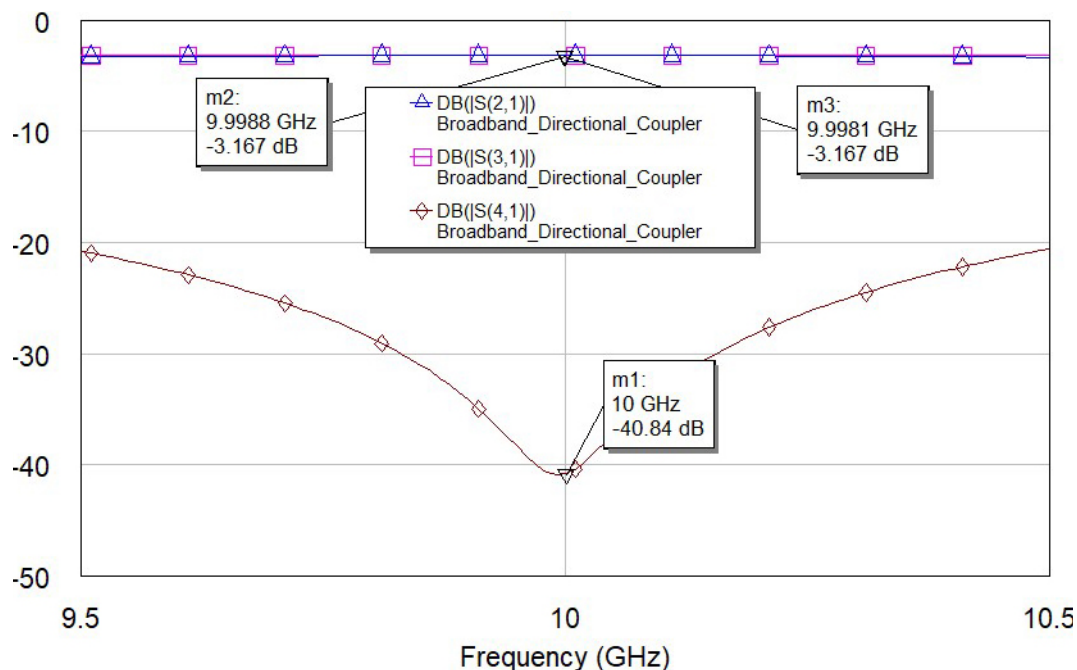


Рис. 5. АЧХ шлейфного направленного ответвителя
Fig. 5. Frequency response of a directional coupler

3. Построение графиков

Построим АЧХ для схемы шлейфного направленного ответвителя. Для этого во вкладке Graphs выбираем опцию New Graph и внутри New Graph добавим измеряемые параметры. В нашем случае это передаточные характеристики матрицы рассеяния в прямом направлении S_{21} , S_{31} , S_{41} . Для построения графиков также необходимо добавить некоторый диапазон частот около нашей рабочей частоты 10 ГГц. Во вкладке Options выберем опцию «проект» Project и во вкладке Options выберем опцию Frequences и задаем $f = 9,5$ Start 9,5 GHz, в той же вкладке Options в опции Project Options → Frequences задаем частоту Stop 10,5 GHz. АЧХ приведена на рис. 5.

Отметим, что у 2-го и 3-го выхода передаточная характеристика соответствует уровню 3 дБ, а у 4-го выхода – 40 дБ, что удовлетворяет техническому заданию.

На рис. 6 приведена топология шлейфного ответвителя, смоделированная с помощью программы.

Заключение

1. Разработана методика синтеза пленочных узлов РЧ- и МКВ-трактов. В качестве базовой среды проектирования использована модернизирован-

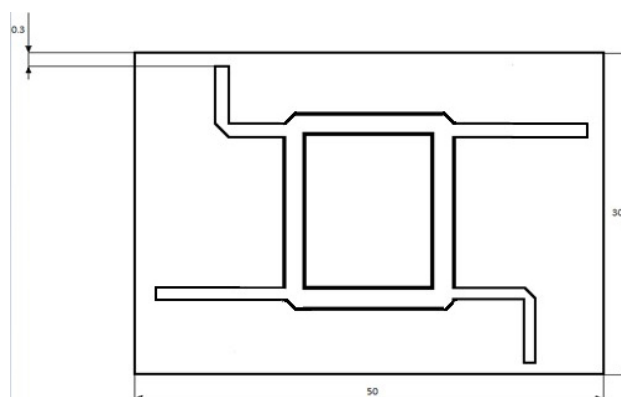


Рис. 6. Топология шлейфного ответвителя
Fig. 6. Topology of a pigtail splitter

ная AWR Design Environment 15. Методика предусматривает использование интегрированных технологий.

2. Проведена экспериментальная отработка методики на примере моделирования и проектирования ШНО. Получена топология ответвителя, удовлетворяющая требованиям технического задания.

3. Предложенная методика позволяет сократить трудоемкость моделирования основных характеристик узлов и конструкторского проектирования, а также уменьшить информационные ресурсы.

Список литературы

1. Кузнецов А.С., Ушкар М.Н. Методика формирования конструктивного базиса бортовых РЛС БПЛА // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. № 9. С. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202309-06>

2. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Моделирование сверхширокополосных полосковых СВЧ-фильтров, встроенных в печатную плату // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2018): сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы. Самара: Новая техника, 2018. С. 1689–1697. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34894908>
3. Маклашов В.А., Пиганов М.Н., Петров М.В. Моделирование матрицы переходов и полосковых линий СВЧ-коммутатора // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2019): сб. тр. V Междунар. конф. и молодежной школы. Т. 3: Математическое моделирование физико-технических процессов и систем. Самара: Новая техника, 2019. С. 199–206. URL: <http://repo.ssau.ru/handle/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Modelirovanie-matricy-perehodov-i-poloskovykh-linii-SVCh-kommutatora-76262>
4. Старенченко А.В. Разработка САПР теплонагруженных устройств БПЛА // Труды МАИ. 2016. № 95. С. 1–8.
5. Слепцов В.В., Мостовской М.В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схмотехнического моделирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 1. С. 22–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dczgaq>
6. Муратов А.В., Романченко М.А., Судариков А.В. Методика оптимизации эффективности экранирования для экранов электромагнитных полей // Системные проблемы надежности в инновационных проектах: материалы Междунар. конф.: в 2 ч. Ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 2012. С. 52–54.
7. Камалетдинов А.Г., Гильмутдинов А.Х. Широкополосный фазовращатель на основе RC элемента // Электронное приборостроение. 1998. Вып. 5. С. 55–62.
8. Пиганов М.Н., Иванов А.В. Разработка программы расчета усталостной надежности паяных соединений с использованием моделей Энгельмайера // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 2. С. 68–77. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7038>
9. Сизов С.Ю., Шуваев В.А., Макаров О.Ю. Организация процесса сквозного проектирования радиоэлектронных средств на базе интегрированных САПР и CALS-технологий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3, № 12. С. 17–19.
10. Куликов А.В. Методы контроля и измерений составных частей бортового радиотехнического комплекса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.32-39>
11. Быков А.П. Алгоритм проведения автономных испытаний радиоэлектронных средств // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104>

Информация об авторах

Новомейский Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: технология изготовления элементов радиочастотного тракта.

E-mail: dmitr.novomejsky@yandex.ru

Пиганов Михаил Николаевич, профессор кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: надежность бортовых радиоэлектронных устройств.

E-mail: piganov@ssau.ru

Лупцов Антон Алексеевич, аспирант кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: моделирование частотно-избирательных систем.

E-mail: antonluptsov@yandex.ru

Богданов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: проектирование печатных плат и узлов радиотехнических систем.

E-mail: kipres@ssau.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 3, pp. 49–55

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.3.49-55](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.49-55)

UDC 621.396

Original Research

Received 17 March 2025

Accepted 18 April 2025

Published 30 September 2025

Methodology for synthesizing the topology of a radio frequency path node board

Dmitry N. Novomeisky, Mikhail N. Piganov, Anton A. Luptsov, Dmitry S. Bogdanov

Samara National Research University

34, Moskovskoye shosse,

Samara, 443086, Russia

Abstract – Background. The relevance of the topic of this work is due to the need to reduce the complexity of the process of designing the topology of boards of film nodes of radio frequency and microwave paths. **Aim.** Development of a methodology for modeling and synthesizing parameters of film assemblies of radio frequency and microwave paths of electronic equipment based on the upgraded AWR Microwave Office Environment 15 design environment. **Methods.** The article discusses a method for synthesizing board topology, which includes the following basic operations and procedures: setting up test benches, analyzing source data, estimating required electrical parameter values, adaptive grid partitioning, modeling multiplexed signals, modeling element distortions, routing circuit tracing, verifying solutions using tables, evaluating a completed project using test benches, minimizing the distances between conductors, plotting and optimizing graphs. Development of the conductor methodology using the example of modeling and design of a directional loop coupler of RF and MV paths. **Results.** The topology of a directional loop coupler with a 10 GHz signal frequency has been synthesized for its implementation using thick-film technology on a 0,25 mm thick polycor and Du Pont 951 substrate. The frequency response of the coupler is built. **Conclusion.** The resulting topology meets the requirements of the technical specification. Experimental testing of the technique has shown that it can reduce the complexity of modeling the main characteristics of nodes by 20–40 % and reduce information resources by up to 30 %.

Keywords – methodology; design; topology; directional loop coupler; modeling; synthesis operations; labor intensity.

✉ piganov@ssau.ru (Mikhail N. Piganov)

 © Dmitry N. Novomeisky et al., 2025

References

1. A. S. Kuznetsov and M. N. Ushkar, “Methodology for forming a constructive basis for on-board radars of UAVs,” *Uspekhi Sovremennoy Radioelektroniki*, no. 9, pp. 51–62, 2023, doi: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202309-06>. (In Russ.)
2. V. A. Maklashov and M. N. Piganov, “Simulation of ultrawideband embedded multilayer RF filters embedded in a printed circuit board,” in *IV Int. Conf. and Youth School Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2018)*, Samara: Novaya Tekhnika, 2018, pp. 1689–1697, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34894908> (In Russ.)
3. V. A. Maklashov, M. N. Piganov, and M. V. Petrov, “Simulation of transition matrix and strip lines of RF switch,” in *V Int. Conf. and Youth School Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2019)*, vol. 3, Samara: Novaya Tekhnika, 2019, pp. 199–206, url: <http://repo.ssau.ru/handle/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Modelirovanie-matricy-perehodov-i-poloskovykh-linii-SVCh-kommutatora-76262> (In Russ.)
4. A. V. Starenchenko, “Development of CAD for heat-loaded UAV devices,” *Trudy MAI*, no. 95, pp. 1–8, 2016. (In Russ.)
5. V. V. Sleptsov and M. V. Mostovskoy, “Methodology for assessing metrological characteristics of adjustable electric drive using circuit simulation method,” *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, vol. 87, no. 1, pp. 22–26, 2021, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dczgaq> (In Russ.)
6. A. V. Muratov, M. A. Romashchenko, and A. V. Sudarikov, “Methodology for optimizing shielding effectiveness for electromagnetic field screens,” in *System Problems of Reliability in Innovation Projects: Materials of the International Conference*, pt. 2, Moscow: Energoatomizdat, 2012, pp. 52–54. (In Russ.)
7. A. G. Kamaletdinov and A. Kh. Gilmudinov, “Wideband phase shifter based on RC element,” *Elektronnoe Priborostroenie*, no. 5, pp. 55–62, 1998. (In Russ.)
8. M. N. Piganov and A. V. Ivanov, “Development of a program for calculating the fatigue reliability of solder joints using the Engelmaier models,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 68–77, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/index.php/pwp/article/download/7038/6897.pdf> (In Russ.)
9. S. Yu. Sizov, V. A. Shuvaev, and O. Yu. Makarov, “Organization of end-to-end design process for electronic equipment based on integrated CAD and CALS technologies,” *Vestnik VGTU*, vol. 3, no. 12, pp. 17–19, 2007. (In Russ.)
10. A. V. Kulikov, “Methods of control and measurement of components of onboard radio engineering complex,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 32–39, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.32-39>. (In Russ.)
11. A. P. Bykov, “Algorithm for conducting autonomous tests of electronic equipment,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 97–104, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104>. (In Russ.)

Information about the Author

Dmitry N. Novomeisky, postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: manufacturing technology of radio frequency path elements.

E-mail: dmitr.novomejsky@yandex.ru

Mikhail N. Piganov, professor of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: reliability of on-board electronic devices.

E-mail: piganov@ssau.ru

Anton A. Luptsov, postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: modeling of frequency-selective systems.

E-mail: antonluptsov@yandex.ru

Dmitry S. Bogdanov, postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: design of printed circuit boards and components of radio engineering systems.

E-mail: kipres@ssau.ru