

Сравнительный анализ точности расчёта копланарных линий передачи для СВЧ МИС: инструмент 2D ВЕМ-анализа SimPCB Lite и полноволновой 3D-симулятор Ansys HFSS

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин,
Дмитрий Коломенский, Владислав Дворников

В статье представлены результаты сравнительного исследования точности расчёта электрофизических характеристик копланарной линии передачи (CPW) на подложке арсенида галлия (GaAs) с использованием двух инструментов численного анализа: быстрого 2D-решателя на основе метода граничных элементов (BEM) – SimPCB Lite – и полноволнового 3D-симулятора Ansys HFSS, реализующего метод конечных элементов (МКЭ). Сравнение выполнено в диапазоне частот от 1 до 50 ГГц. Показано, что расхождение по волновому сопротивлению не превышает 0,89% во всём рассматриваемом диапазоне, тогда как отклонение по потерям на 50 ГГц составляет не более 0,05 дБ на отрезке линии длиной 2 мм. Установлена граница надёжного применения квазистатического ВЕМ-подхода при проектировании СВЧ МИС и сформулированы практические рекомендации по выбору инструмента в зависимости от этапа проектирования и рабочего диапазона частот.

Введение

Проектирование монолитных интегральных схем (МИС) для СВЧ-диапазона предполагает обязательный расчёт линий передачи на начальном этапе синтеза топологии. При этом инженер традиционно сталкивается с компромиссом между скоростью получения результата и его

точностью. Быстрые квазистатические калькуляторы, использующие аналитические или полуаналитические модели, обеспечивают результат за секунды, однако их применимость при высоких частотах ограничена принятыми упрощениями. Полноволновые 3D-симуляторы, такие как Ansys HFSS, обеспечивают высокую

точность за счёт численного решения уравнений Максвелла в полном объёме, но требуют значительных вычислительных ресурсов и времени.

Настоящая работа посвящена количественной оценке расхождения результатов, получаемых в системе инженерного анализа SimPCB Lite (2D-решатель на основе метода граничных элементов, ВЕМ) и полноволновом 3D-симуляторе Ansys HFSS (метод конечных элементов, МКЭ) применительно к расчёту копланарной линии передачи на подложке GaAs в диапазоне 1–50 ГГц. Цель исследования – определить границы применимости квазистатического ВЕМ-подхода на этапе первичного синтеза топологии СВЧ МИС.

Описание модели и материалов

В качестве объекта исследования выбрана копланарная линия передачи (Coplanar Waveguide, CPW) без экранирующей земляной плоско-

Настройки

Объект расчёта: Линия передачи

Тип линии передачи: Копланарная одиночная

Тип расчёта: Частотный анализ

Расчётный параметр: S-параметры

КМ-1Н

Толщина диэлектрика

H1: 0,1 мм

Диэлектрическая проницаемость

Er1: 12,9

Шероховатость

Учитывать в расчёте: ☐

a, Радиус узла неровности: 0,75 мкм

N, Количество узлов на яче...: 32

Af, Площадь ячейки: 0,0001 мм²

Дополнительные параметры

TC, Электропроводность: 45 МСм/м

tgδ, Тангенс угла диэлектр...: 0,0008

LTL, Длина проводника: 2 мм

TR, Фронт сигнала: 333,3333 пс

FREQ, Частота: Мин. 1 ГГц, Макс. ... X

Сопротивление

ZS, Источник: 50 Ом

ZL, Приемник: 50 Ом

Ширина проводника

W1: 0,065 мм

W2: 0,065 мм

Расстояние от проводника до опорной плоскости

D1: 0,045 мм

Толщина проводника

T1: 0,002 мм

Рис. 1. Интерфейс SimPCB Lite: ввод геометрических и материальных параметров CPW-структуры

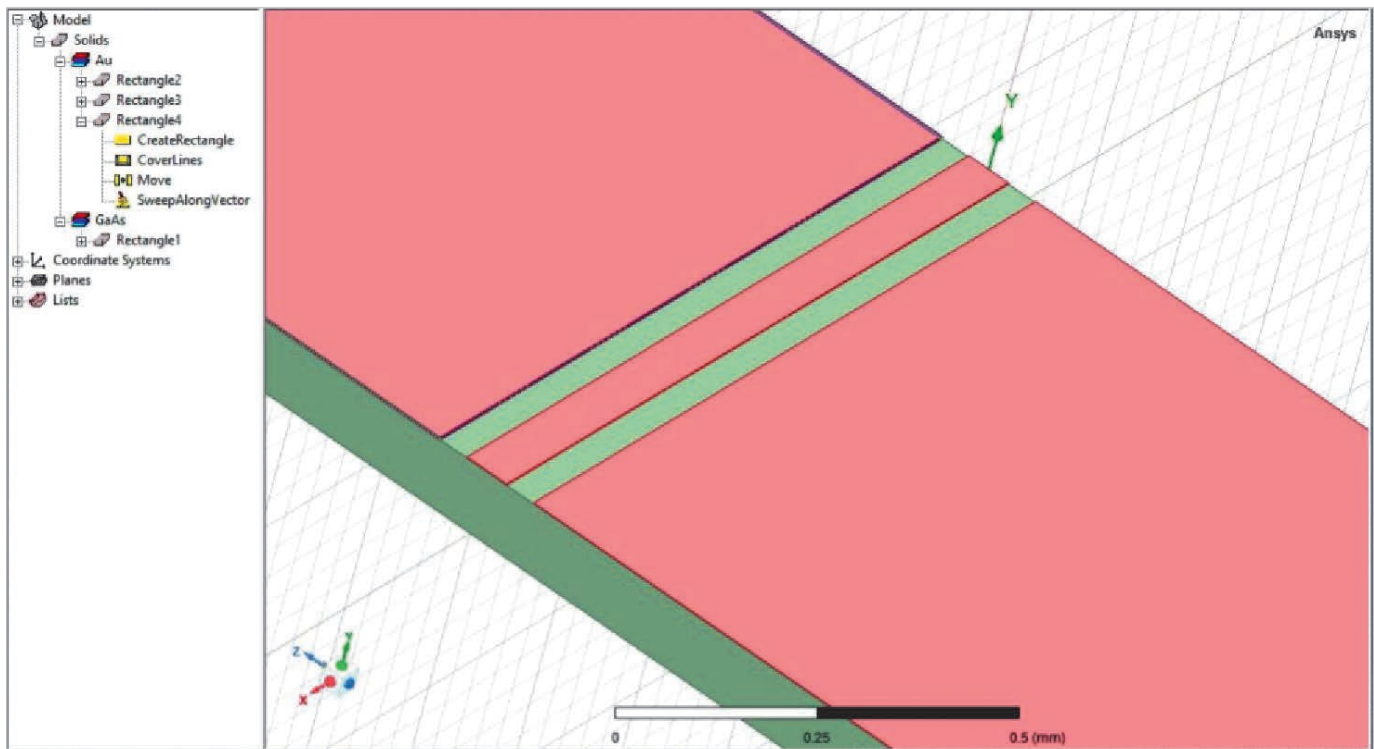


Рис. 2. Трёхмерная модель CPW-структуры в Ansys HFSS с заданными портами Wave Port

сти снизу (без нижней металлизации, так называемый CPW with No Bottom Ground Plane). Данная конфигурация является типовой для СВЧ МИС на подложках из полупроводниковых материалов. Параметры модели приведены в табл. 1.

Высокое значение относительной диэлектрической проницаемости GaAs ($\epsilon_r \approx 12,9$) обуславливает повышенную концентрацию электромагнитного поля в подложке и усиливает частотную дисперсию

Таблица 1. Параметры исследуемой CPW-структуры

Параметр	Значение
Тип линии	CPW (без экранной земли снизу)
Подложка	GaAs, $\epsilon_r = 12,9$; $\tan \delta = 0,0006$
Толщина подложки (H)	100 мкм
Металлизация	Au, $\sigma = 45 \text{ МСм/м}$
Толщина металла (T)	2 мкм
Ширина центрального проводника (W)	65 мкм
Зазор до опорной плоскости (G)	45 мкм
Длина проводника (L)	2 мм
Целевое волновое сопротивление	50 Ом
Частотный диапазон	1–50 ГГц

эффективной диэлектрической проницаемости, что представляет дополнительный интерес с точки зрения проверки точности квазистатических методов [1].

Методика моделирования

Расчёт в SimPCB Lite

В системе SimPCB Lite выбран тип линии Coplanar Waveguide; параметры материалов и геометрии заданы в соответствии с табл. 1. Частотный анализ проводился в диапазоне 1–50 ГГц. Для расчёта электрических характеристик CPW SimPCB Lite применяет метод граничных элементов (ВЕМ) (рис. 1). В отличие от объёмного разбиения сетки, характерного для МКЭ, ВЕМ оперирует исключительно на границах раздела сред: поверхностях проводников (сигнального проводника и заземляющих полосков) и на граничной поверхности раздела металлизация – GaAs – воздух. Задача Лапласа для электрического потенциала сводится к поверхностному интегральному уравнению; дискретизация объёма диэлектрика при этом не производится [2].

Данный подход обеспечивает высокую скорость расчёта (менее нескольких секунд), что принципиально важно при параметрической оптимизации. Вместе с тем квазистатическая природа метода накладывает

ограничения на точность при высоких частотах, когда длина волны в диэлектрике становится сопоставимой с поперечными размерами структуры.

Расчёт в Ansys HFSS

В Ansys HFSS построена трёхмерная модель отрезка линии, геометрически идентичная структуре, заданной в SimPCB Lite. Возбуждение осуществляется через Wave Port на торцевых гранях модели. Частотный анализ выполнен в диапазоне 1–50 ГГц с адаптивным уточнением сетки МКЭ. Полное время расчёта, включая построение и сходимость сетки, составило 5–10 минут. Результаты, полученные в HFSS, приняты в качестве эталонных для данного сравнительного анализа (рис. 2).

Результаты и сравнение

Волновое сопротивление

В табл. 2 и на рис. 3 представлено сравнение значений волнового сопротивления Z_0 , рассчитанных в SimPCB Lite и Ansys HFSS в зависимости от частоты.

SimPCB Lite демонстрирует высокую точность расчёта волнового сопротивления. Максимальное отклонение не превышает 0,89% (0,45 Ом) на частоте 50 ГГц. Характерно, что систематическое смещение $\sim 0,4 \text{ Ом}$

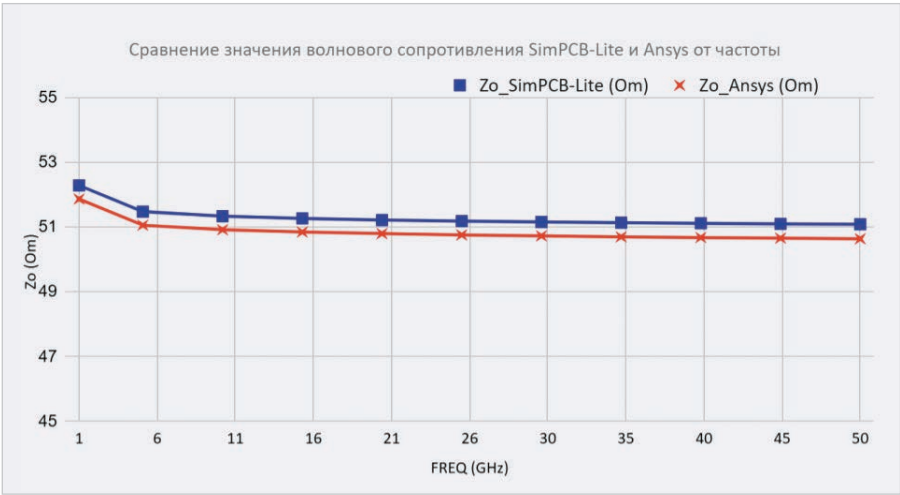


Рис. 3. Зависимость волнового сопротивления Z_0 от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

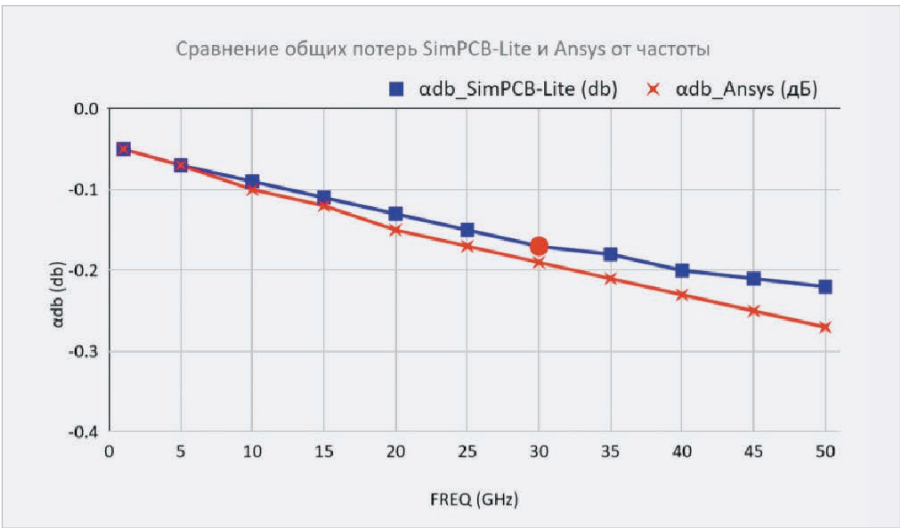


Рис. 4. Зависимость общих потерь adB от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

Таблица 2. Сравнение значений волнового сопротивления Z_0

FREQ (ГГц)	Zo_SimPCB Lite (Om)	Zo_Ansys (Om)	Отклонение (Om)	Отклонение (%)
1	52,29	51,87	0,42	0,81
5	51,48	51,06	0,42	0,82
10	51,34	50,92	0,42	0,82
15	51,27	50,85	0,42	0,83
20	51,22	50,8	0,42	0,83
25	51,19	50,76	0,43	0,85
30	51,16	50,73	0,43	0,85
35	51,14	50,7	0,44	0,87
40	51,12	50,68	0,44	0,87
45	51,1	50,66	0,44	0,87
50	51,09	50,64	0,45	0,89
Макс. откл-е			0,45	0,89

Таблица 3. Сравнение общих потерь в линии adB

FREQ (ГГц)	adb_SimPCB Lite (дБ)	adb_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-0,05	-0,05	0,00	0,00
5	-0,07	-0,07	0,00	0,00
10	-0,09	-0,1	0,01	-10,00
15	-0,11	-0,12	0,01	-8,33
20	-0,13	-0,15	0,02	-13,33
25	-0,15	-0,17	0,02	-11,76
30	-0,17	-0,19	0,02	-10,53
35	-0,18	-0,21	0,03	-14,29
40	-0,2	-0,23	0,03	-13,04
45	-0,21	-0,25	0,04	-16,00
50	-0,22	-0,27	0,05	-18,52
Макс. откл-е			0,05	18,52

сохраняется практически неизменным во всём частотном диапазоне. Данное обстоятельство свидетельствует о наличии небольшого константного расхождения в расчётном значении эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} , а не о деградации численного метода с ростом частоты.

Для задачи первичного синтеза топологии – подбора ширины центрального проводника W и зазора G под целевой импеданс – такой уровень точности является достаточным. Применение SimPCB Lite на данном этапе не требует верификации в Ansys HFSS.

Потери в линии

Результаты сравнения общих потерь (погонного коэффициента затухания adB) приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Наблюдается систематическое занижение потерь в SimPCB Lite по сравнению с результатами HFSS, нарастающее с ростом частоты. На частоте 50 ГГц относительное расхождение достигает 18%, однако в абсолютных единицах отклонение составляет лишь 0,05 дБ на отрезке линии длиной 2 мм, что соизмеримо с погрешностью измерения реального устройства.

Физическая причина занижения потерь в ВЕМ-подходе связана с упрощённым учётом скин-эффекта в тонком ($T = 2$ мкм) золотом проводнике и краевых токовых эффектах в области зазора. При частотах выше ~25 ГГц глубина скин-слоя в золоте становится значительно меньше толщины металлизации, и пространственное перераспределение тока по периметру сечения проводника оказывает существенное влияние на активные потери. В Ansys HFSS эти эффекты обрабатываются численно через адаптивную трёхмерную сетку на поверхности металла.

Для большинства задач первичного синтеза такая точность является приемлемой. Тем не менее при проектировании устройств с жёсткими требованиями к вносимым потерям (малошумящие усилители, полосовые фильтры с высокой добротностью) на частотах свыше 25–30 ГГц использование только SimPCB Lite недостаточно – требуется верификация в полномолновом симуляторе.

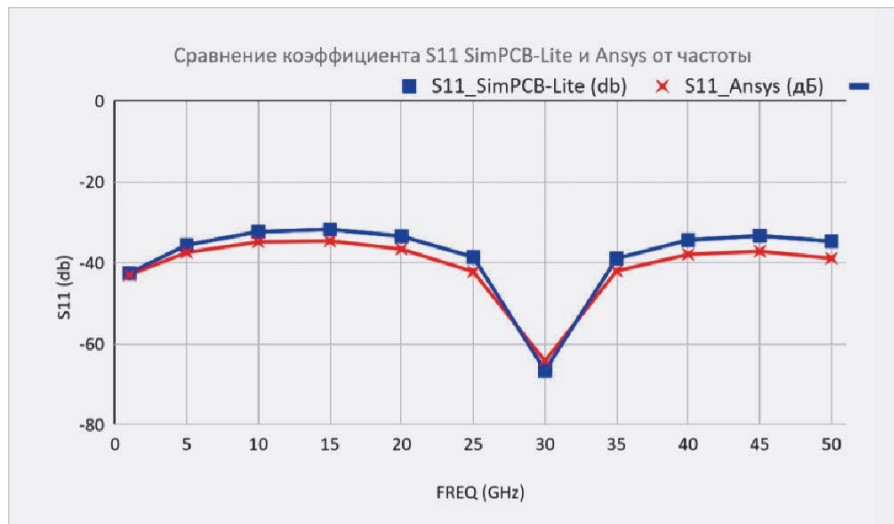


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения S_{11} от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

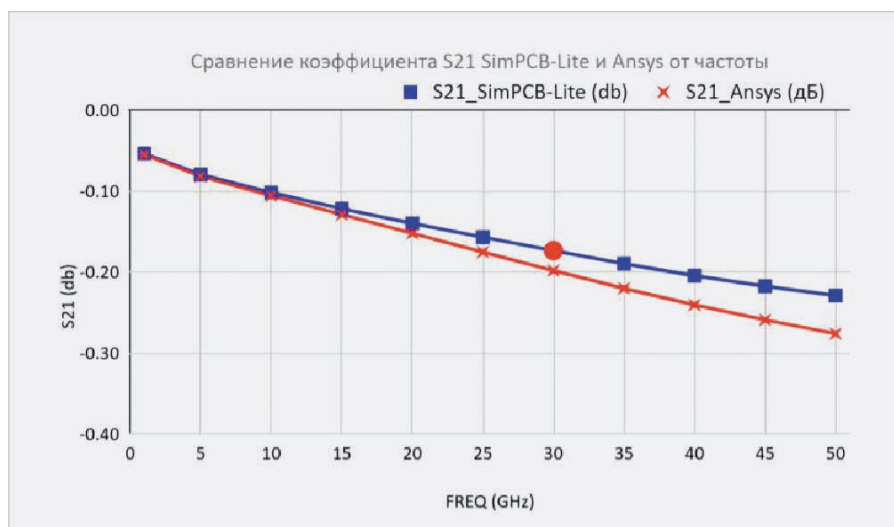


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи S_{21} от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

Таблица 4. Сравнение коэффициента отражения S_{11}

FREQ (ГГц)	S11_SimPCB_Lite (дБ)	S11_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-42,49	-42,89	0,40	-0,92
5	-35,53	-37,37	1,84	-4,93
10	-32,24	-34,76	2,54	-7,24
15	-31,66	-34,53	2,87	-8,31
20	-33,37	-36,54	3,17	-8,68
25	-38,50	-42,12	3,62	-8,58
30	-66,44	-64,10	-2,34	3,65
35	-38,84	-41,94	3,10	-7,39
40	-34,30	-37,84	3,54	-9,35
45	-33,22	-37,08	3,86	-10,41
50	-34,61	-38,82	4,22	-10,86
Макс. откл.			4,22	10,86

Таблица 5. Сравнение коэффициента передачи S_{21}

FREQ (ГГц)	S21_SimPCB_Lite (дБ)	S21_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-0,05	-0,05	0,00	-2,37
5	-0,08	-0,08	0,00	-2,82
10	-0,10	-0,11	0,00	-3,74
15	-0,12	-0,13	0,01	-5,57
20	-0,14	-0,15	0,01	-8,05
25	-0,16	-0,18	0,02	-10,53
30	-0,17	-0,20	0,02	-12,49
35	-0,19	-0,22	0,03	-13,87
40	-0,20	-0,24	0,04	-14,95
45	-0,22	-0,26	0,04	-16,01
50	-0,23	-0,28	0,05	-17,11
Макс. откл.			0,05	17,11

Коэффициент отражения S_{11}

Сравнение рассчитанных значений S_{11} представлено в табл. 4 и на рис. 5.

Оба инструмента демонстрируют уровень S_{11} в диапазоне от -32 до -43 дБ, что соответствует хорошему согласованию линии с 50-омным трактом при расчётном импедансе ≈ 51 Ом. Относительное отклонение $\sim 10\%$ от значения в дБ, хотя и кажется значительным на первый взгляд, физически соответствует разнице ~ 4 дБ между уровнями, например, -34 и -38 дБ. На практике оба значения однозначно характеризуют структуру как хорошо согласованную, а качественный вывод обоих методов совпадает.

Локальный минимум $S_{11} \approx -66$ дБ в SimPCB Lite на частоте 30 ГГц (-64 дБ в HFSS) является следствием резонанса при длине линии $\approx \lambda/2$. Небольшой сдвиг резонансной частоты между двумя моделями объясняется различием в расчётном значении ϵ_{eff} , обусловленным описанным выше систематическим смещением. Данный артефакт воспроизводим и физически обоснован.

Коэффициент передачи S_{21}

Коэффициент передачи S_{21} , непосредственно отражающий вносимые потери, сравнивается в табл. 5 и на рис. 6.

Закономерность, наблюдаемая по S_{21} , аналогична результатам анализа потерь: SimPCB Lite систематически занижает вносимые потери с ростом частоты. Максимальное абсолютное отклонение на 50 ГГц составляет 0,05 дБ – значение, идентичное полученному при анализе погонных потерь. Оба метода описывают структуру качественно одинаково.

Анализ границ применимости и частотных ограничений

Точность квазистатического ВЕМ-подхода определяется соотношением поперечных размеров структуры и длины волны в диэлектрике λd . Для подложки GaAs ($\epsilon_r = 12,9$) толщиной 100 мкм можно выделить следующие частотные зоны.

- **До 30 ГГц:** отклонения по S-параметрам и потерям не превышают $\sim 10\%$, что приемлемо для задач первичного синтеза топологии. Применение SimPCB Lite без верификации в HFSS обосновано.

- **Свыше 30 ГГц:** начинает проявляться частотная дисперсия эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{eff}(f)$, которую 2D-квазистатическая модель учитывает приближённо. Результаты SimPCB Lite на данных частотах следует рассматривать как ориентировочные.

- **По волновому сопротивлению:** граница надёжного применения шире – погрешность не превышает 1% во всём диапазоне до 50 ГГц.

- **Геометрические ограничения:** при отношении $W/H > 5$ или зазорах $G < 10$ мкм точность расчёта ϵ_{eff} и Z_0 снижается – в таких случаях целесообразно сразу переходить к трёхмерному моделированию.

Следует также учитывать, что значение $\epsilon_r = 12,9$ является справочным для низких частот и постоянного тока. В диапазоне 40–60 ГГц реальное значение диэлектрической проницаемости GaAs составляет 12,4–12,5, что вносит дополнительный вклад в расхождение расчётных данных при экстраполяции на область миллиметровых волн.

Заключение

Проведённое сравнительное исследование показало, что инструмент SimPCB Lite на основе 2D ВЕМ-решателя обеспечивает достаточную для практических задач точность расчёта электрических характеристик CPW-структур на подложке GaAs в диапазоне СВЧ. Основные результаты:

- по волновому сопротивлению Z_0 : погрешность не превышает 1% во всём диапазоне до 50 ГГц. Инструмент полностью пригоден для итерационного подбора геометрии CPW без верификации в HFSS;
- по потерям и S-параметрам: надёжная точность обеспечивается до ~25–30 ГГц (отклонение $\leq 10\%$). На частоте 50 ГГц абсолютное расхождение по α_{dB} и S_{21} составляет 0,05 дБ для отрезка линии длиной 2 мм;
- по скорости расчёта: SimPCB Lite обеспечивает принципиальное преимущество при параметрической оптимизации – расчёт занимает менее нескольких секунд против 5–10 минут в Ansys HFSS.

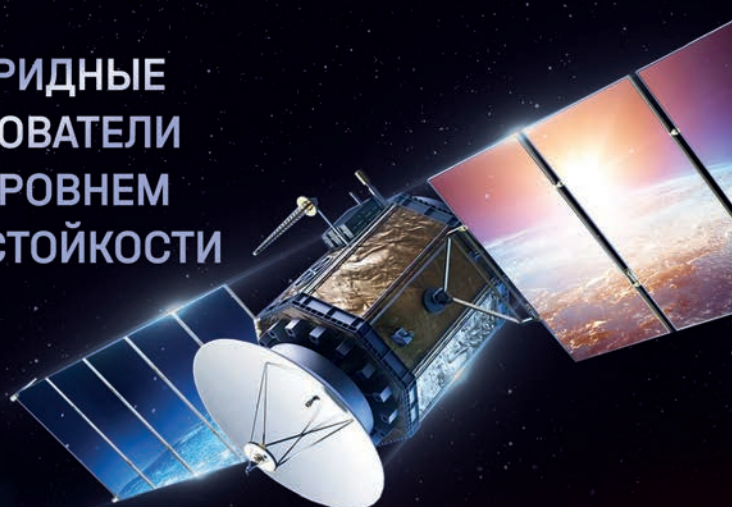
Рекомендуемый технологический маршрут: применение SimPCB Lite на этапе быстрого синтеза геометрии с последующей финальной верификацией в Ansys HFSS, особенно при работе выше 30 ГГц, наличии вертикальных переходов (via), многослойных подложек или жёстких требований к вносимым потерям. Для типовых задач (линии передачи, делители мощности, согласующие цепи в диапазоне до Ка-диапазона) инструмент обеспечивает достаточную точность при многократно меньших временных затратах.

Литература

1. A Review of Technologies and Design Techniques of Millimeter-Wave Power Amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A.-V. Pham // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2020. Vol. 68, № 7. P. 2957–2983.
2. Ухин В.А., Коломенский Д.С., Кухарук В.С., Смирнова О.В. Методы расчёта волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40–42. ©



**120-ВАТТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ
DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
С ПРЕДЕЛЬНЫМ УРОВНЕМ
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ**





ΔΔ YB
LDCD/(20-50)-15-120/SP MbCR
2401 2418

- Диапазон входного напряжения 20...50 В постоянного тока
- Выходные напряжения 3,3; 5; 6,3; 8; 9,5; 12; 15; 20; 28; ± 5 ; $\pm 9,5$; ± 12 ; ± 15 В
- КПД до 86%
- Обширный набор сервисных и защитных функций
- Стойкость к радиации: 100 крад (Si); 75 МэВ·см²/мг



ProCHIP
POWERED BY ProSOFT

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

+7 (495) 232-52-22 + INFO@PROCHIP.RU + WWW.PROCHIP.RU



Реклама