

# Проектирование малошумящего усилителя на 10 ГГц

Винсент Гриджис, Legrand France

При разработке малошумящих высокочастотных усилителей необходимо правильно учитывать различные факторы, влияющие на работу устройства. В статье описывается комплексный подход к процессу разработки и моделирования малошумящего усилителя при помощи современных программных средств.

Малошумящие усилители (МШУ) играют ключевую роль в работе приёмного тракта радиоустройств и необходимы для усиления слабых сигналов, уровень мощности которых зачастую едва превышает фоновый уровень шума. При этом важно сохранить соотношение сигнал/шум на приемлемом уровне. В большинстве приёмников наибольший вклад в общий коэффициент шума вносится входными элементами приёмного тракта, описанными в уравнениях Фрииса, определяющих коэффициент шума в многокаскадной системе.

Главная задача, стоящая перед разработчиками МШУ, – минимизировать вносимый усилителем шум путём учёта таких факторов, как согласование импеданса, выбор компонентов усилителя (в частности, малошумящих транзисторов) и подбор параметров смещения. У доступных на рынке малошумящих полевых транзисторов этого диапазона, при условии оптимальных параметров смещения и согласования импедансов источника и нагрузки, коэффициент шума может достигать 0,3 дБ. МШУ, используемые в любительской радиоэлектронике, обладают коэффициентом шума порядка 0,7 дБ. Разница

в 0,4 дБ возникает из-за вносимых на участке между антенной и МШУ потерь, во многом связанных с неидеальностью входных согласующих цепей и особенностями волноводного перехода.

Совершенствование процесса проектирования каждого из блоков может обеспечить значительное повышение общих характеристик радиоэлектронного устройства. В данной статье будет рассмотрено применение NI AWR Design Environment и, в частности, модуля Microwave Office, при проектировании малошумящего усилителя на 10 ГГц (см. рис. 1) с улучшенными характеристиками в X-диапазоне.

Подробно остановимся на следующих этапах проектирования:

- выбор транзистора;
- выбор подложки и покрытия;
- выбор геометрии волноводного перехода;
- создание полосового фильтра и выходного каскада;
- проектирование корпуса для подавления паразитных явлений.

## Выбор транзистора

В данном проекте был выбран транзистор фирмы Renesas модели

NE3515S02 [1]. Он доступен на рынке, а его характеристики вполне соответствуют поставленным требованиям: минимальный коэффициент шума на частоте 10,4 ГГц близкий к 0,3 дБ, коэффициент усиления 12 дБ. Транзистор обеспечивает хороший уровень потерь на отражение при согласовании на минимум коэффициента шума (Gopt). S-параметры транзистора и данные об уровне шумов, полученные на основе измерений, доступны для загрузки на сайте разработчика в виде файлов формата s2p [2].

На основе этих данных в Microwave Office были рассчитаны и построены на диаграмме Смита контуры коэффициента шума (NF) и потерь на отражение (RL) для транзистора, работающего при смещении  $V_{сн} = 2$  В и  $I_{сн} = 10$  мА (см. рис. 2). Как видно из рисунка 2, входной импеданс транзистора NE3515S02 рассчитан на его применение в МШУ X-диапазона. Область пересечения контуров RL (синяя линия) и NF (красная линия) соответствует ожидаемому уровню шума -0,4 дБ и потерям на отражение в ~10 дБ. Помимо разработки согласующей цепи, преобразующей характеристический импеданс системы 50 Ом в требуемый импеданс источника, должны учитываться и иные факторы для минимизации вносимых входной согласующей цепью потерь.

Источниками потерь в печатных платах могут быть различные её элементы, включая диэлектрические и медные проводящие слои. При выборе материалов платы ключевыми параметрами, определяющими характеристики устройства на высоких частотах, являются диэлектрическая постоянная, тангенс угла потерь и толщина диэлектрика. Диэлектрическая постоянная может меняться в зависимости от частоты, температуры или иных факторов, что оказывает негативное влияние на характеристики широкополосных высокочастотных аналоговых схем. Дисперсия диэлектрической постоянной (то есть зависимость её от частоты) может быть вызвана особенностями материалов печатной платы, такими как: поляризация диэлектрика, внутренние потери или даже неодно-



Рис. 1. МШУ на 10 ГГц, спроектированный при помощи NI AWR Design Environment

родность поверхности медного проводящего слоя.

Между потерями в диэлектрике, потерями в проводнике и потерями на излучение есть определённая взаимосвязь. При одинаковой толщине диэлектрика более широкие линии передачи обладают меньшим характеристическим импедансом и, как правило, диэлектрические потери в них выше, чем в линиях меньшей ширины. Напротив, в последних характеристический импеданс выше, поэтому в них преобладают потери в проводнике. Потери на излучение зависят от конфигурации схемы, конструкции, толщины материала, диэлектрической постоянной и частоты. Рассогласование импеданса, вызванное изменением ширины линий передачи, также является значимым источником потерь на излучение.

С учётом информации, доступной в спецификациях транзистора, и данных об импедансах различных линий передачи, используемых в печатной плате, был выбран материал с медным покрытием RO4003С компании Rogers Corporation толщиной 305 мкм. Этот керамический материал обладает малыми потерями, является экономичным, рекомендован к использованию широким рядом производителей печатных плат и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к проектируемому устройству.

### Широкополосный волноводный переход с малыми потерями

Входной каскад МШУ играет важнейшую роль в обеспечении преобразования входного импеданса системы (обычно 50 Ом) к оптимальному импедансу транзистора Горт, при этом необходимо уделить внимание минимизации вносимых потерь. В данном проекте для уменьшения потерь и физических размеров было решено использовать переходник волновод-микроразветвляющаяся линия.

Общепринятой практикой при разработке МШУ (DB6NT [3], HB9BBD [4]) является проектирование усилителя и переходника по отдельности с согласованием каждого на стандартный характеристический импеданс 50 Ом. Тем не менее, у такого подхода есть ряд недостатков, включая узкополосные эффекты согласования, чувствительность к производственным допускам и потери в согласующих цепях. Альтернативным решением является проектирование волноводного пере-

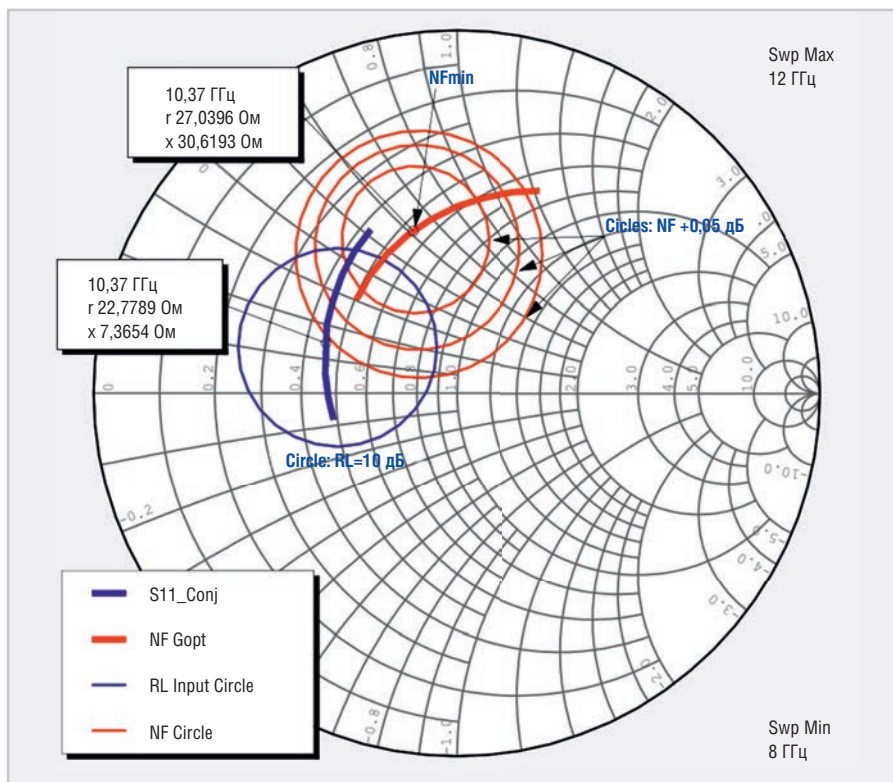


Рис. 2. Результаты расчёта коэффициента шума (красные линии) и потерь на отражение (синие линии)

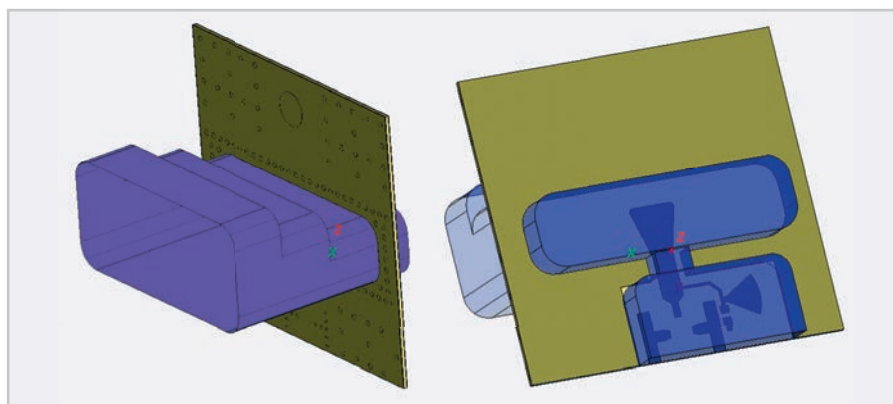


Рис. 3. Оптимизированная геометрия волноводного перехода

хода таким образом, чтобы его выходной импеданс был равен оптимальному импедансу транзистора на опорной плоскости микроразветвляющейся линии для наименьшего коэффициента шума. Поскольку значение этого импеданса комплексное, при моделировании согласования необходимо уделить особое внимание возможному вращению опорной плоскости, что может привести к неоптимальному подбору импеданса источника и, как следствие, более высокому коэффициенту шума.

На рисунке 3 представлена оптимизированная геометрия переходника. Использование ступенчатой структуры позволило уменьшить импеданс волновода со стороны микроразветвляющейся линии. Использование нескольких ступеней, а также оптимальной геоме-

трии зонда и расположения короткозамкнутой задней стенки волновода, позволило получить более широкую рабочую полосу усилителя.

Моделирование проводилось при помощи Analyst™ – трёхмерного симулятора на основе метода конечных элементов. Один порт был размещён на входе волновода, другой – на опорной плоскости устройства. После некоторых корректировок импеданса преобразователя, геометрии зонда и положения задней стенки волновода был получен результат, показанный на рисунке 4. Моделирование подтвердило достижимость высоких требуемых параметров и возможность использования такого типа конструкции при согласовании Горт транзистора в полосе от 9 до 12 ГГц с отклонением

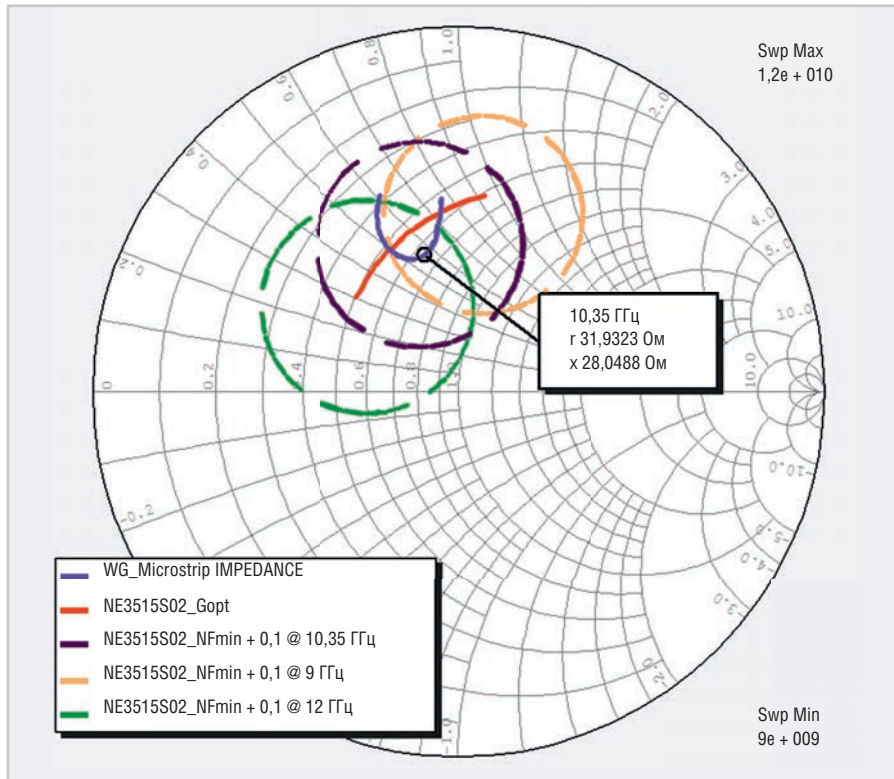


Рис. 4. Результаты моделирования волноводного перехода при помощи Analyst™

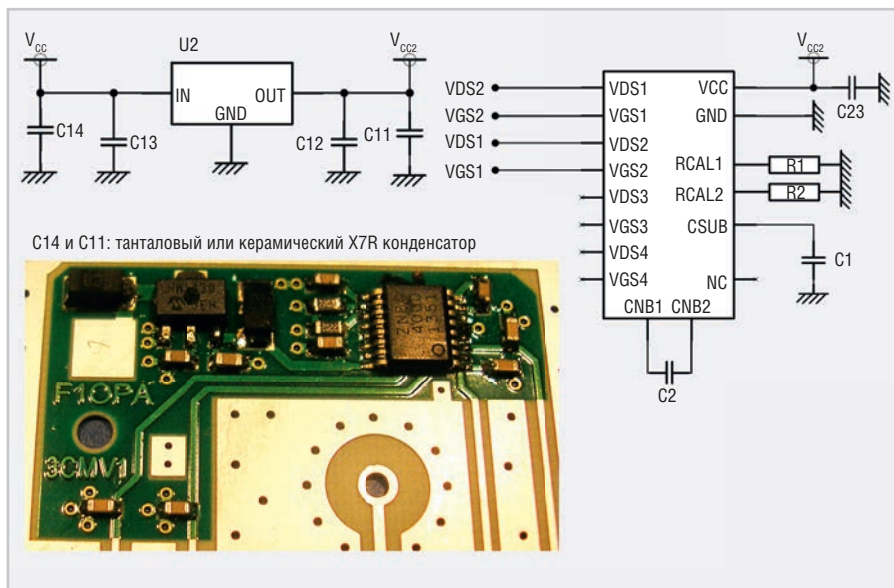


Рис. 5. Контроллер смещения транзистора с линейным регулятором напряжения для повышения диапазона входного напряжения

от минимального коэффициента шума всего в 0,1 дБ.

Разрабатываемый МШУ является двухкаскадным. Параметры смещения транзистора по постоянному току также значительно влияют на коэффициент шума. Основными требованиями к цепи смещения являются обеспечение напряжения питания в диапазоне от 8 до 14 В и возможность подстройки тока каждого транзистора. Помимо этого, цепь смещения не должна быть причиной нестабильного поведения

устройства на высоких частотах, а также занимать слишком много места на печатной плате. В данном случае было принято решение использовать специальный контроллер смещения транзистора ZNBG4000 с линейным регулятором напряжения для увеличения диапазона входного напряжения (см. рис. 5). Подстройкой номиналов резисторов R1 и R2 можно контролировать значение тока, протекающего в каждом из каскадов, и добиться оптимального коэффициента шума.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРЫ

После создания входного преобразователя необходимо провести проектирование планарных структур (см. рис. 6). В данном проекте МШУ используется конструкция с двумя каскадами усиления (общий коэффициент усиления более 20 дБ) и полосовым фильтром на выходе для подавления внеполосного усиления.

Моделирование и оптимизация проводились в Microwave Office, сначала – на основе аналитических моделей распределённых линий передачи, затем – при помощи трёхмерного планарного электромагнитного (ЭМ) симулятора АХИЕМ для верификации и финальной подстройки. Использование АХИЕМ позволило получить значительно более точные результаты и учесть взаимодействия между печатными и механическими элементами схемы.

Проектирование полосового фильтра (см. рис. 7) в основном определялось общими требованиями к рабочей полосе МШУ, включая учёт совместной работы двухкаскадного усилителя и фильтра, отклик которого зависит от таких параметров, как выбранная геометрия, материал и возможные технологические отклонения.

## ВЫХОДНОЙ ПЕРЕХОД

Последний этап проектирования высокочастотных элементов МШУ – создание выходного перехода, который в данном случае является выходным коаксиальным разъёмом, расположенным перпендикулярно плоскости печатной платы. Такая конструкция содержит разрыв в линии передачи между выходом полосового фильтра и разъёмом. Без согласующей цепи результаты ЭМ моделирования показали неудовлетворительный уровень потерь на отражение – порядка –6 дБ. Использование простого ступенчатого преобразователя (см. рис. 8), оптимизированного при помощи Analyst, обеспечило более приемлемое значение возвратных потерь менее –20 дБ.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСА

При работе в X-диапазоне важно помнить о влиянии конструкции корпуса на характеристики устройства ввиду непредвиденных взаимодействий между элементами, а также резонансными эффектами. Резонансной частоте в данном случае соответствует частота, при которой целое число полуволн уклады-

вается в линейные размеры экранирующего корпуса. Внутри корпуса может возникнуть волна, если её узлы (точки с нулевой амплитудой) совпадают с положением проводящих стенок корпуса, то есть структура представляет собой резонатор. Например, в металлическом корпусе  $2 \times 0,5$  дюйма возникает резонанс на частоте около 12 ГГц [5].

Экранирование наиболее эффективно, когда используется совместно с другими способами подавления паразитных эффектов: заземление, фильтрация, конструктивные решения для печатной платы. К сожалению, зачастую разработчики оставляют экранирование «на потом» и рассматривают его в качестве последнего средства, поскольку экраны могут устанавливаться только по завершении проектирования самого устройства. Тем не менее, если заложить предполагаемые параметры экранирования на начальном этапе проектирования, можно получить гораздо более эффективное и выгодное решение этой проблемы.

Зачастую в корпус помещается поглощающий радиоволны материал для подавления электромагнитных полей, вызывающих паразитные возбуждения. Тем не менее, такие факторы, как температура и влажность, с течением времени значительно снижают надёжность поглотителей при работе в неблагоприятных условиях. В данном проекте для подавления нежелательных возбуждений было решено использовать специальное покрытие ключевых элементов МШУ, чтобы предотвратить возможное возникновение направленных мод, определяемых геометрией корпуса. На рисунке 9 подробно показаны детали корпуса.

Входной переходник-преобразователь импеданса входного каскада МШУ и выходной коаксиальный разъём были размещены на грани, противоположной крышке корпуса, контактирующей с заземляющей плоскостью печатной платы. Сама плата размещается между двумя частями металлического корпуса и крепится при помощи болтов. Для обеспечения механической точности и хорошей воспроизводимости элементов производство составных частей корпуса выполнялось на станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

После изучения различных видов покрытия, разработчиками был выбран SURTEC 650. Данное покрытие сертифицировано и соответствует требовани-

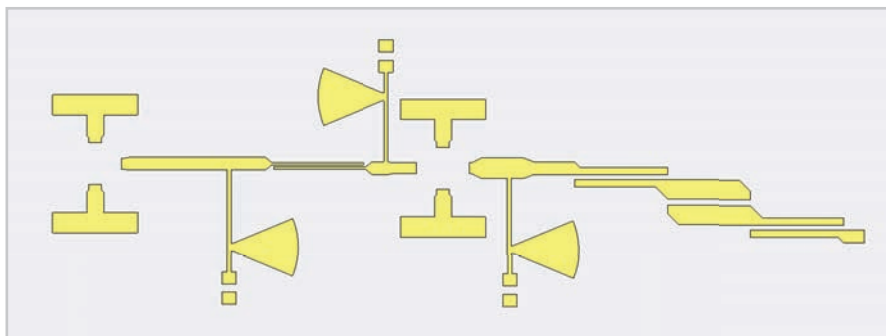


Рис. 6. Проектирование планарной структуры

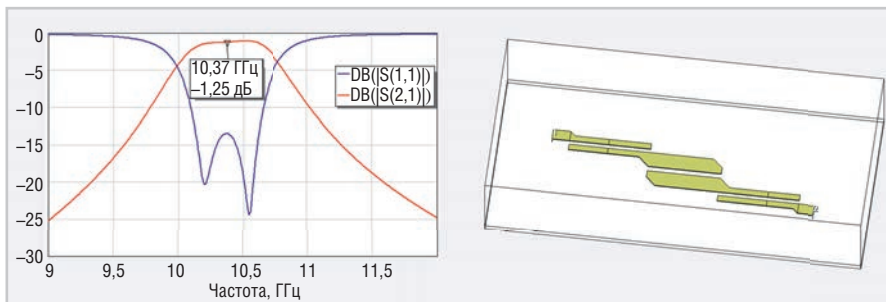


Рис. 7. Полосовой фильтр с рабочей полосой, определяемой различными параметрами материала и техпроцесса

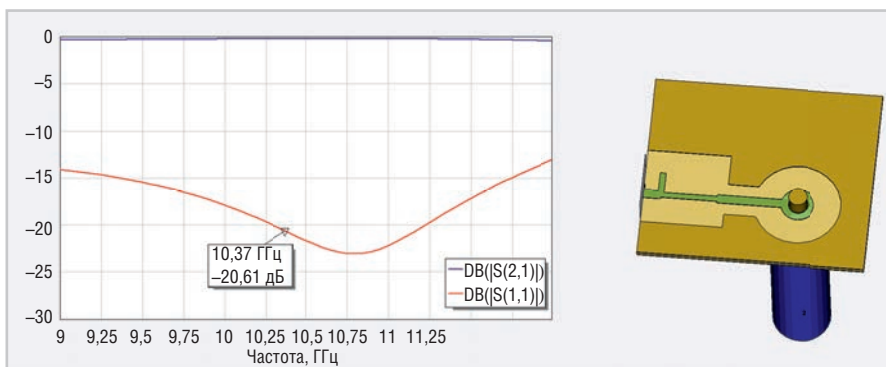


Рис. 8. Выходной преобразователь, оптимизированный с помощью Analyst™

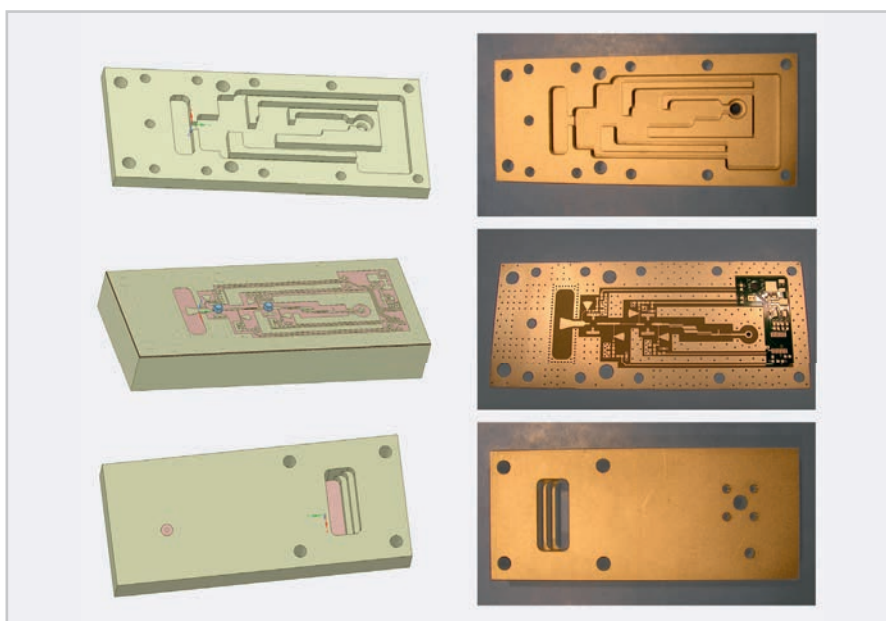


Рис. 9. Части корпуса, спроектированного для подавления паразитных возбуждений

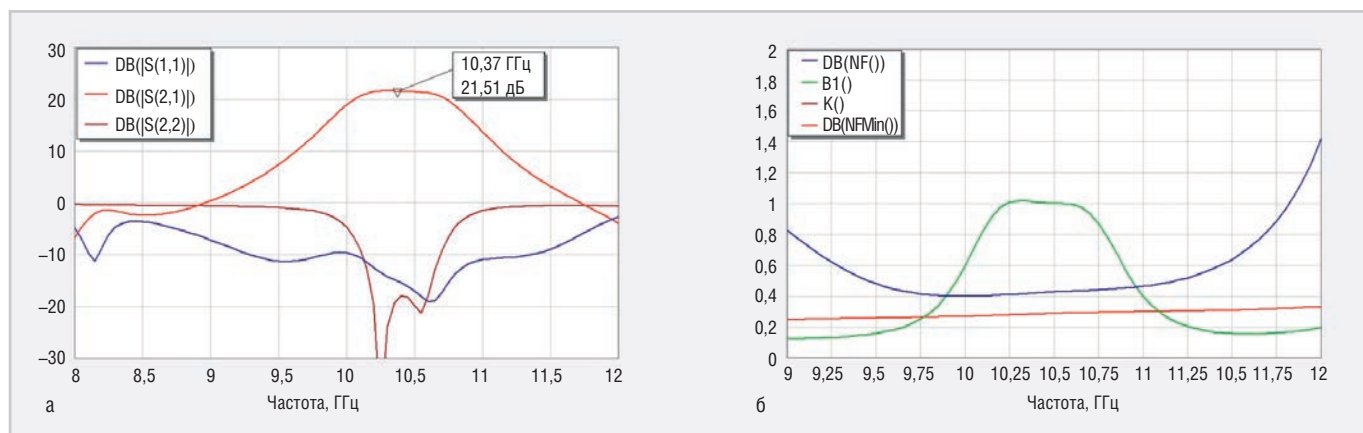


Рис. 10. Итоговые результаты моделирования в Microwave Office: а) моделирование усиления; б) моделирование коэффициента шума и стабильности

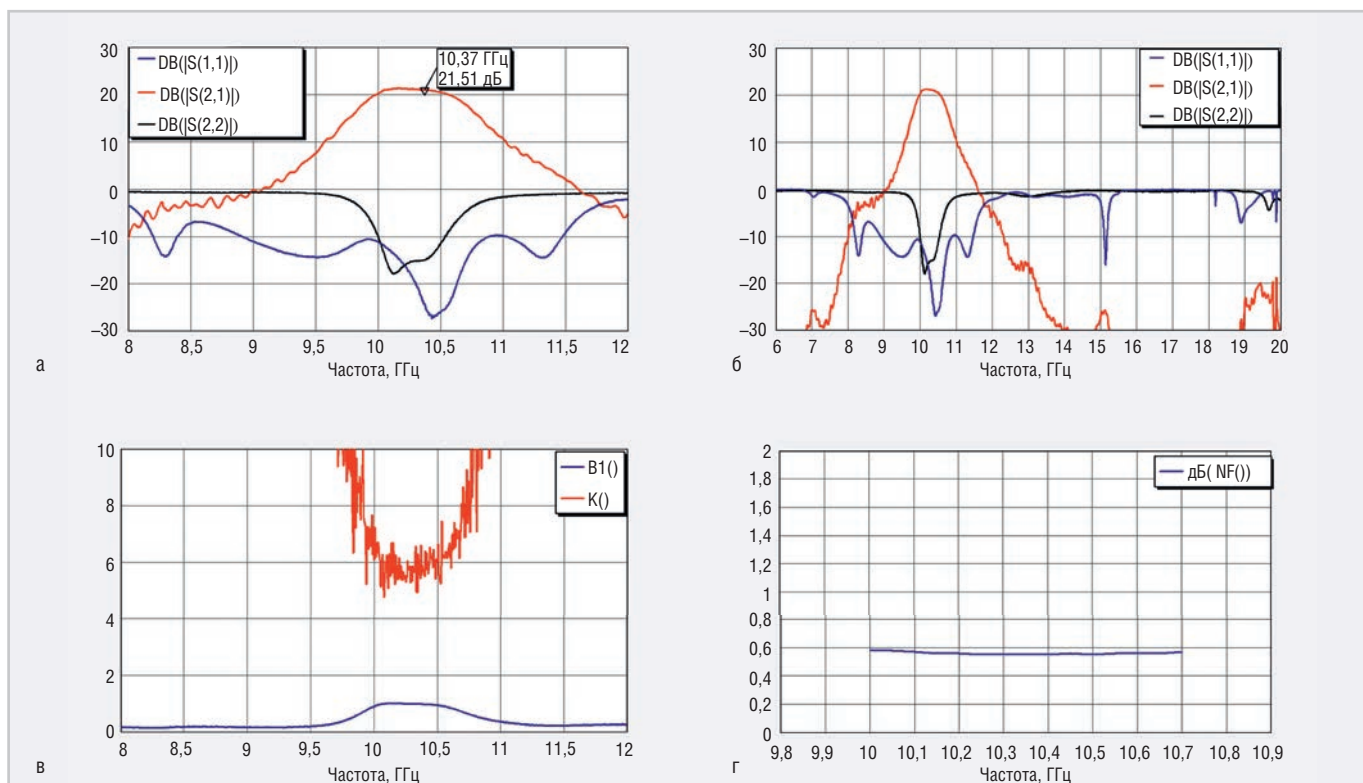


Рис. 11. Сравнение результатов моделирования и измерений: а) усиление прототипа; б) усиление прототипа в широком диапазоне; в) стабильность прототипа; г) коэффициент шума прототипа

**Характеристики МШУ**

Параметр	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение
Частота, ГГц	10	10,35	10,7
Рабочая полоса, МГц	-	700	-
Коэффициент усиления, дБ	20	-	-
Потери на отражение на частоте 10,35 ГГц, дБ	10	15	-
Коэффициент шума, дБ	-	0,6	-
Напряжение питания, В	7	-	14
Ток питания, мА	-	35	-

ямя Европейского Союза по обеспечению безопасности здоровья и окружающей среды, а его влияние на параметры устройства пренебрежимо мало и не поддаётся измерению. Основным преимуществом является защита от окисления, обеспечивающая стабильную

работу устройства на протяжении длительного периода времени.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для моделирования полного отклика усилителя данные каждого из блоков, полученные при помощи AXIEM и

Analyst™, были импортированы в виде S-параметров в Microwave Office. Такая методика позволяет очень быстро и легко оптимизировать каждую из подсхем независимо друг от друга.

Возможен и другой подход, при котором все компоненты могли бы моделироваться и оптимизироваться одновременно по всей конструкции МШУ в виде иерархически организованных ЭМ-структур, поддерживаемых в NI AWR Design Environment.

Итоговый результат моделирования (см. рис. 10) получился более чем удовлетворительным и хорошо соответствующим спецификации во всей рабочей полосе. Стоит отметить, что потери во входном волноводе и эффекты неоднородности поверхности проводящих

линий полагались пренебрежимо малы-ми и при моделировании не учитывались.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе созданной конструкции были собраны и измерены 10 прототипов устройства для анализа разброса результатов. При этом ни для печатной платы, ни для деталей корпуса никакие параметры более не подстраивались. Данные типового измерения (см. рис. 11) продемонстрировали, что результаты моделирования и измерений очень близки. Коэффициент шума превысил ожидаемый на 0,1...0,15 дБ, однако по-прежнему находился в заданных пределах (меньше 0,6 дБ) в полосе 700 МГц. Как и было предсказано при моделировании, значение потерь на отражение

подтвердило применимость согласованного проектирования волноводного перехода, а стабильность работы устройства обеспечивается использованием качественно спроектированного корпуса, предотвращающего возникновение паразитных возбуждений.

Характеристики разработанного МШУ представлены в таблице.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения требуемых характеристик МШУ при разработке оказалось достаточно всего одной итерации проектирования. Возможность получения хорошего результата с первой попытки демонстрирует способность NI AWR Design Environment моделировать сложные высокочастотные структуры, исполь-

зуя подходящий для каждой конкретной задачи инструмент, будь то схемотехническое, планарное или трёхмерное электромагнитное моделирование. Ключом к успеху является понимание специфики поставленной задачи и выбор правильного инструмента для её решения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.cel.com/pdf/datasheets/ne3515S02.pdf>
2. <http://www.cel.com:8080/parts.do?command=load&idRootPart=2036#>
3. The Challenge of LNAs for 10 GHz: D. Fässler, HB9BBD – DUBUS 2015
4. MKU LNA 102 S EME: kuhne-electronic
5. <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jan/rf-shielding-the-art-and-science-of-eliminating-interference> ©

### НОВОСТИ МИРА

#### Предпочтения РФ в поставщиках ЭКБ для «Союза-5» изменятся не в пользу американцев

Предпочтения РФ в поставщиках электронно-компонентной базы для новой российской ракеты-носителя «Союз-5» изменятся не в пользу американцев. Иностранную помощь планируется получать, в первую

очередь, от Франции. Об этом сообщил в интервью радиостанции «Эхо Москвы» официальный представитель Роскосмоса Игорь Буренков.

Он пояснил, что у России есть определённые сложности в разработке электронно-компонентной базы для ракеты, поскольку на территории страны необходимые отрас-

ли приборостроения только восстанавливаются после того, как ранее они долгое время не функционировали.

Официальный представитель Роскосмоса также подчеркнул, что ракета «Союз-5» является «своего рода ответом на современные вызовы».

Радио «Эхо Москвы»

[www.jtagtechnologies.ru](http://www.jtagtechnologies.ru)





Любое количество TAP-портов (JTAG-портов)  
Любое количество цифровых I/O-каналов  
Любое количество аналоговых I/O-каналов

Сконфигурируйте свою собственную систему периферийного сканирования без ограничений с новыми модульными контроллерами JT 57xx/RMI



Представительство JTAG Technologies в России  
Телефон: [812] 313-9159  
E-mail: [russia@jtag.com](mailto:russia@jtag.com)

Эксклюзивный дистрибьютор: ООО «Остек-Электро»  
Телефон: [495] 788-4444  
E-mail: [info@ostec-group.ru](mailto:info@ostec-group.ru)

Реклама