

# Проектирование МШУ S-диапазона с большим коэффициентом усиления в среде NI AWR DE

Кирилл Петров (k.petrov@mrcur.ru)

Практически в любой современной БКА (бортовой космической аппаратуре) присутствует приёмная часть с низким коэффициентом шума. Нередки случаи, когда необходим приёмник с большим коэффициентом усиления. Создание приёмных устройств с большим коэффициентом усиления и одновременно низким коэффициентом шума является комплексной задачей, связанной с рядом технических особенностей. В качестве основной проблемы можно выделить возможность самовозбуждения как отдельных нелинейных элементов устройства, так и всего изделия. Данная статья посвящена обзору возможностей анализа устойчивости нелинейных устройств, доступных в программном продукте Microwave Office среды NI AWR Design Environment.

## ВВЕДЕНИЕ

Приёмная часть БКА обычно строится по принципу каскадирования МШУ (малошумящих усилителей) до достижения необходимого коэффициента усиления ( $K_v$ ). При этом результирующий коэффициент шума (NF) приёмного тракта определяется в большей степени коэффициентом шума первого каскада усиления. Опционально в схему приёмной части БКА могут входить межкаскадные ППФ (полосно-пропускающие фильтры), входное УЗ (устройство защиты), управляемый аттенюатор и управляемый фазовращатель.

Для достижения минимального коэффициента шума необходимо выполнить согласование входного импеданса МШУ в комплексно-сопряжённое значение импеданса, соответствующее оптимальному коэффициенту шума первого каскада усиления. Зачастую к

БКА предъявляются требования по КСВ (коэффициенту стоячей волны) в сечениях радиочастотных соединителей, поэтому одновременное обеспечение минимально достижимого коэффициента шума нелинейного элемента первого каскада, требуемого значения КСВ и приемлемого коэффициента усиления требуют компромиссных решений.

Нелинейные элементы, на основе которых построены усилительные каскады МШУ, в общем случае при определённых значениях импедансов, подключённых к их входу и выходу, способны к самопроизвольной генерации электромагнитных колебаний [1, 2]. Кроме того, при реализации большого коэффициента усиления в МШУ возможно возникновение обратной связи за счёт волновода, образованного корпусом изделия. Если со второй проблемой всё ясно

и борьба с ней сводится к принятию оптимальных конструктивных решений (образование заградительного волновода обратной связи, применение поглощающего материала), то решение первой проблемы требует более детального подхода на этапе разработки схемотехники изделия.

Возможности Microwave Office позволяют на ранних этапах разработки оценить устойчивость нелинейных элементов к самопроизвольной генерации электромагнитных колебаний. Кроме того, полноволновое электромагнитное 3D-моделирование, доступное в NI AWR Design Environment [3], позволяет получить модель реального изделия с максимально правдоподобными характеристиками.

## Подготовка модели МШУ CIRCUIT SCHEMATICS

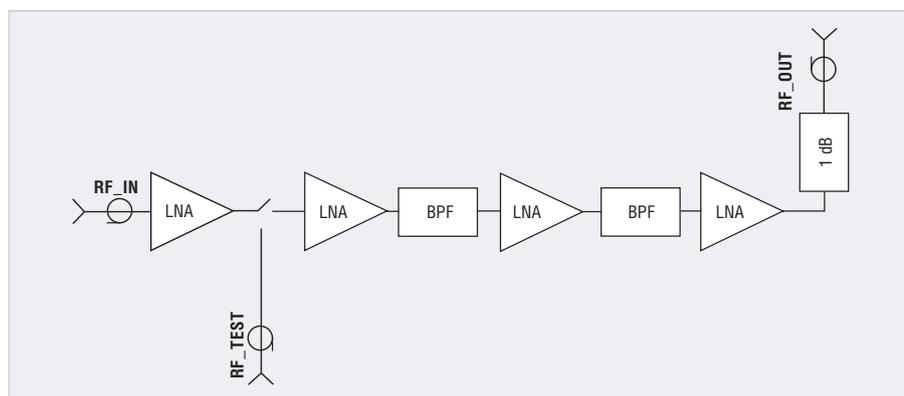
### Исходные данные

Согласно требованиям заказчика, необходимо разработать МШУ с коэффициентом передачи не менее 60 дБ в полосе рабочих частот от 2090 до 2102 МГц. Коэффициент шума приёмного тракта не должен превышать значения 1 дБ. Коэффициент стоячей волны в сечениях высокочастотных соединителей в полосе рабочих частот не должен превышать значения 1,6. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочей полосе частот должна быть не более 0,5 дБ. Неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) в рабочем диапазоне частот не должна превышать 5 нс. Уровень мощности входного синусоидального сигнала не превышает -110 дБм.

### Структурная схема

На рисунке 1 представлена структурная схема проектируемого МШУ. МШУ построен на основе четырёх каскадов усиления, двух полосно-пропускающих фильтров и однодецибельного аттенюатора на выходе. После первого каскада усиления на печатной плате предусмотрена возможность ответвления сигнала для контроля параметров первого каскада усиления.

Первый и второй каскады усиления построены на основе псевдоморфного



Примечание: LNA – каскад усиления; BPF – полосно-пропускающий фильтр; 1 dB – однодецибельный аттенюатор; RF\_IN – вход МШУ; RF\_OUT – выход МШУ; RF\_TEST – ответвление сигнала для контроля параметров первого каскада усиления

Рис. 1. Структурная схема МШУ



Рис. 2. Схема МШУ в модуле Circuit Schematics

транзистора с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ). В основу третьего и четвертого каскадов положена микросхема типа Gain Block. ППФ на основе технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) фильтруют внеполосные сигналы. Перед входом МШУ, согласно идеологии изделия, расположен узкополосный диплексер на объёмных резонаторах, защищающий приёмный тракт от излучения передающего тракта.

**Моделирование в Circuit Schematics**

Первый этап моделирования заключается в построении схемы МШУ в модуле Circuit Schematics. В качестве дроселей, блокировочных и согласующих элементов схемы использованы модели реактивных элементов, представленные на веб-сайте NI AWR Design Environment [4]. Данные модели основаны на SPICE-моделях, представленных производителями используемых

элементов, и с большим запасом перекрывают используемый при моделировании диапазон частот.

Для описания нелинейных усилительных элементов используются S-параметры, предоставленные производителями этих элементов для режима, в котором применяются данные элементы. Согласно определению, S-параметры изделия измеряются в режиме малого сигнала. Исходя из требований заказчика к уровню входного сигнала не более -110 дБм, использование малосигнальных S-параметров для описания поведения нелинейных элементов модели МШУ в первом приближении является вполне допустимым.

Схемы МШУ и первого каскада МШУ в модуле Circuit Schematics представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

В качестве критериев оценки устойчивости нелинейных элементов и усилительных каскадов на их основе используются:

- фактор Роллетта (К-фактор) [1, 2]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1; \quad (1)$$

- дополнительный коэффициент стабильности [1, 2]:

$$B = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0; \quad (2)$$

- определитель матрицы рассеяния [1, 2]:

$$\Delta = \det[S] = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} < 1; \quad (3)$$

- геометрически определяемые коэффициенты стабильности со стороны нагрузки (выражение 4) и источника (выражение 5) [5]:

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11}^* \Delta| + |S_{12}S_{21}|} > 1; \quad (4)$$

$$\mu' = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - S_{22}^* \Delta| + |S_{12}S_{21}|} > 1. \quad (5)$$

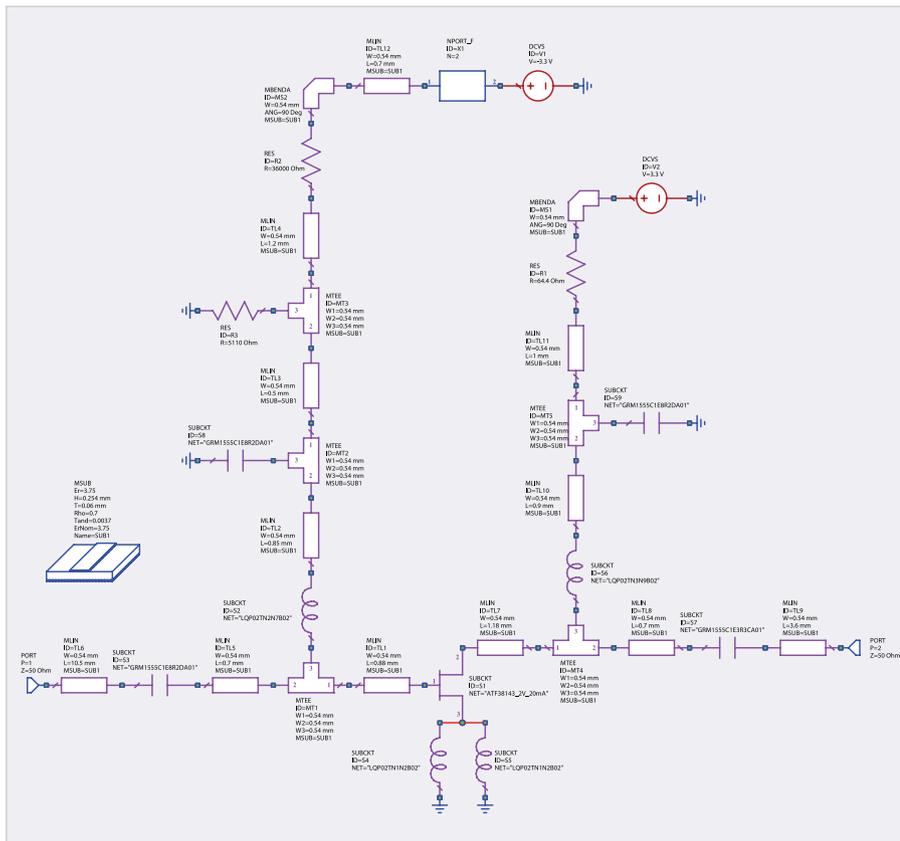


Рис. 3. Схема первого каскада МШУ в модуле Circuit Schematics

Транзистор, на основе которого построены первый и второй каскады усиления, является условно стабильным, т.е. способен к генерации паразитных частотных составляющих при определённых значениях импеданса нагрузки и источника. Зависимости критериев оценки устойчивости уединённого транзистора от частоты приведены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, неравенства 1, 3–5 не выполняются в широком диапазоне частот. Это означает, что включение данного транзистора без цепи стабилизации приведёт к паразитной генерации. В качестве элемента стабилизации в цепь истока введена дополнительная индуктивная последовательная обратная связь. Зависимости критериев оценки устойчивости первого каскада усиления от частоты после стабилизации приведены на рисунке 5.

На рисунке 5 видно, что неравенства 1–5 выполняются в интересующем нас диапазоне частот. Вне рабочего диапазона частот усилитель также является стабильным в широких пределах.

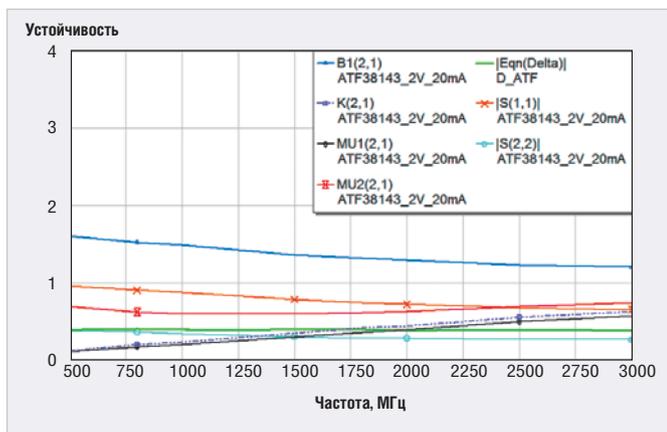


Рис. 4. Зависимость критериев устойчивости pHEMT-транзистора от частоты

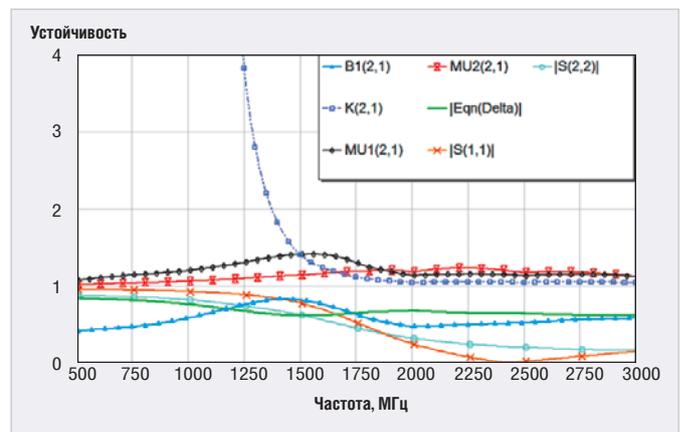


Рис. 5. Зависимость критериев устойчивости первого каскада усиления от частоты

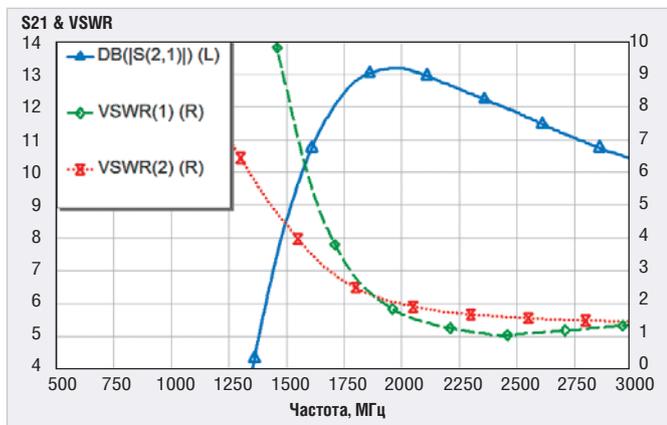


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи и КСВ входа и выхода первого каскада усиления от частоты

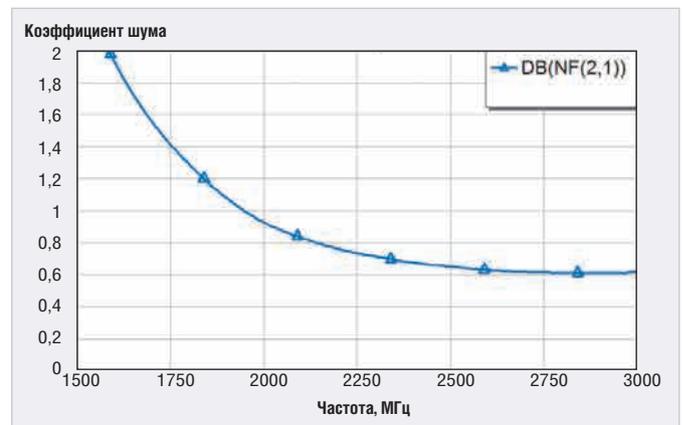


Рис. 7. Зависимость коэффициента шума первого каскада от частоты

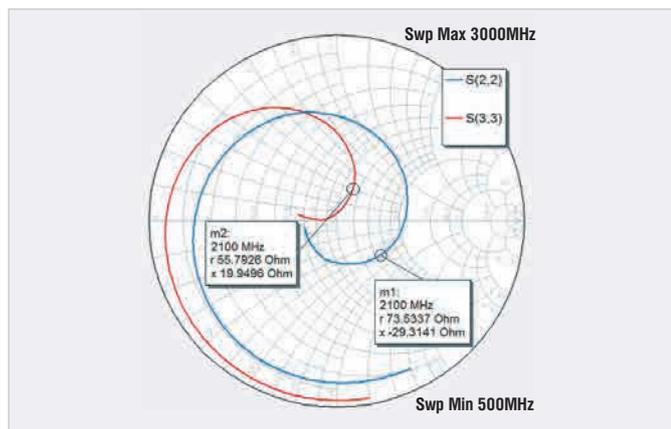


Рис. 8. Частотная зависимость импедансов выхода и входа первого и второго каскадов усиления

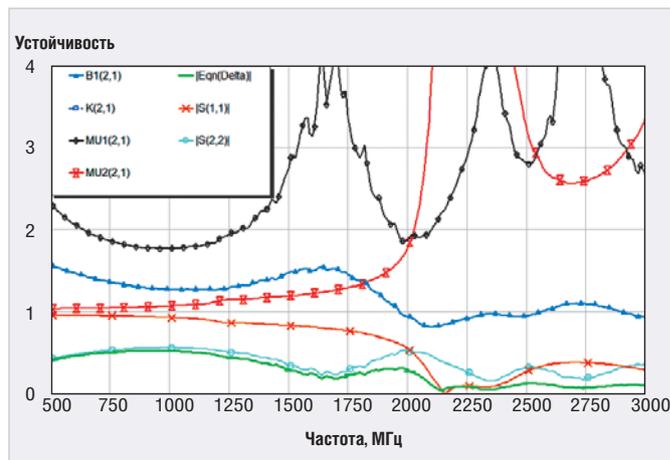


Рис. 9. Зависимость критериев устойчивости МШУ от частоты

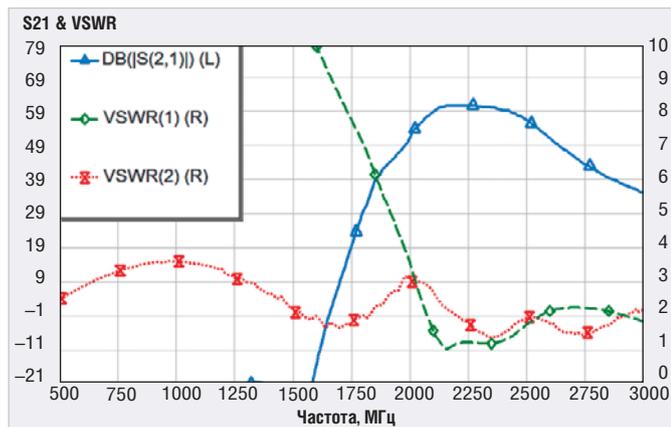


Рис. 10. Зависимость коэффициента передачи и КСВ входа и выхода МШУ от частоты

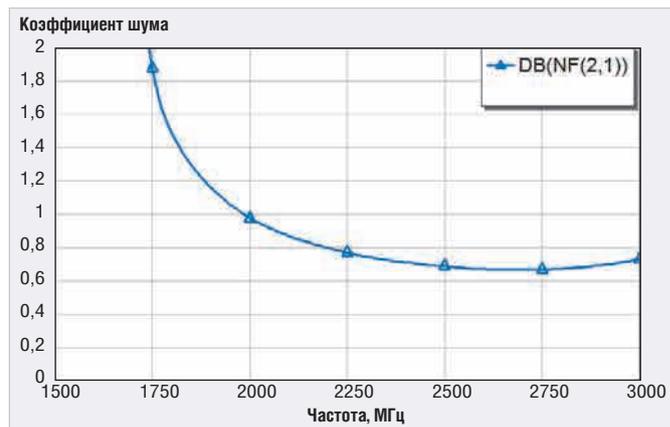


Рис. 11. Зависимость коэффициента шума МШУ от частоты

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В CIRCUIT SCHEMATICS

### Результаты моделирования первого каскада усиления в Circuit Schematics

На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента передачи и КСВ входа и выхода от частоты для первого каскада усиления. Согласно рисунку 6, расчётный коэффициент передачи первого каскада в интересующем нас диапазоне частот составляет около 13 дБ. Расчётные значения КСВ входа и выхода составляют 1,5 и 2 соответственно.

На рисунке 7 приведена зависимость коэффициента шума первого каскада от частоты. Расчётное значение коэффициента шума в рабочем диапазоне частот не превышает 0,85 дБ.

На рисунке 8 приведена частотная зависимость импеданса выхода первого каскада усиления и импеданса входа второго каскада. Как видно из рисунка 8, импеданс входа второго каскада усиления является комплексно сопряжённым импедансу выхода первого каскада, что обеспечивает комплексно сопряжённое согласование между каскадами.

### Результаты моделирования четырёх каскадов усиления в Circuit Schematics

Второй каскад МШУ стабилизирован дополнительной индуктивной последовательной обратной связью так же, как и первый. Третий и четвёртый каскады усиления МШУ построены на базе малошумящих микросхем типа Gain Block, которые не нуждаются во внешних цепях стабилизации. Результаты моделирования четырёхкаскадного МШУ представлены на рисунках 9–11.

Из анализа зависимости критериев устойчивости МШУ от частоты на рисунке 9 видно, что четырёхкаскадная схема МШУ также устойчива в исследуемом диапазоне частот.

Коэффициент усиления МШУ в интересующем нас диапазоне частот, как видно из рисунка 10, составляет не менее 60 дБ. Расчётные значения КСВ входа и выхода МШУ составляют не более 1,5 и 2,5 соответственно.

Как видно из рисунка 11, расчётный коэффициент шума не превышает 0,9 дБ.

## ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ МШУ В EM STRUCTURES

На основе топологии МШУ из математических моделей линий передачи в модуле Circuit Schematics была разработана печатная плата в Altium Designer. На рисунке 12 представлена поэтапная схема получения электромагнитной модели топологии из файла печатной платы.

Из файла печатной платы в Altium Designer формируются производственные файлы в формате ODB++, которые с помощью утилиты PCB Import Wizard конвертируются в модуль EM Structures. В модуле EM Structures назначаются порты ввода/вывода сигнала в точках подключения элементов схемы МШУ. Здесь же описываются параметры слоёв печатной платы, такие как диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, параметры материала металлизации и т.д. Отдельно можно выделить такие параметры, как толщина, шероховатость и угол травления металлизации. С повышением рабочего диапазона частот проектируемых устройств эти параметры начинают влиять на

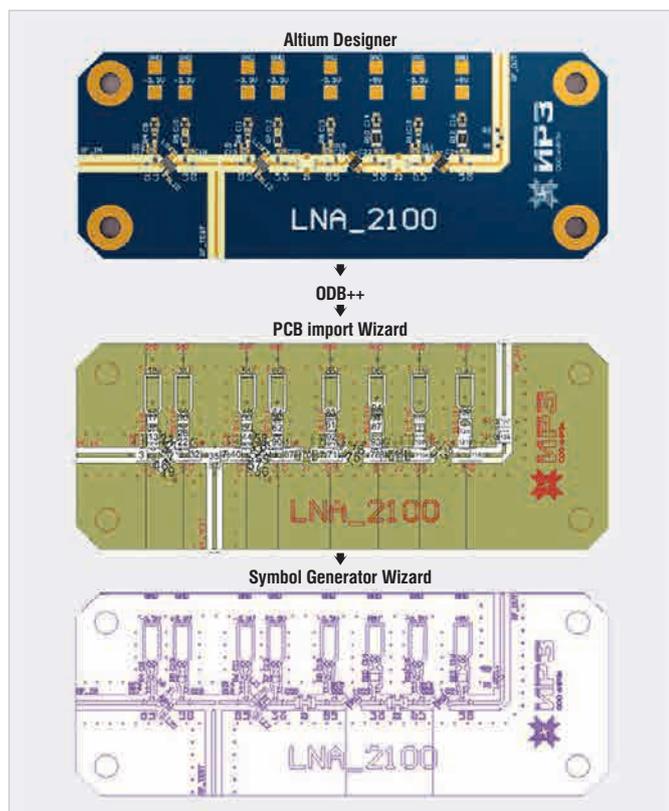


Рис. 12. Схема получения электромагнитной модели топологии печатной платы МШУ

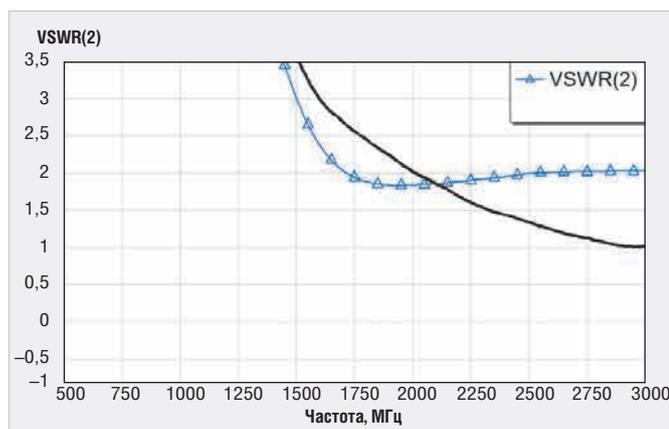


Рис. 15. Зависимость КСВ выхода первого каскада усиления от частоты

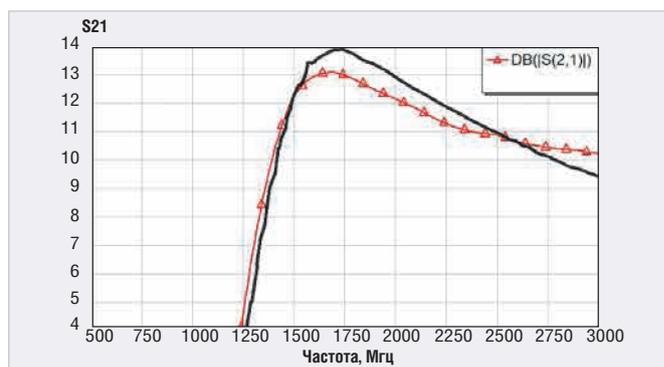


Рис. 13. Зависимость коэффициента передачи первого каскада усиления от частоты

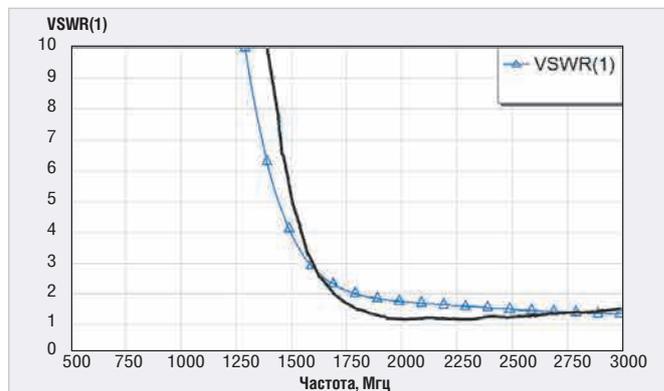


Рис. 14. Зависимость КСВ входа первого каскада усиления от частоты

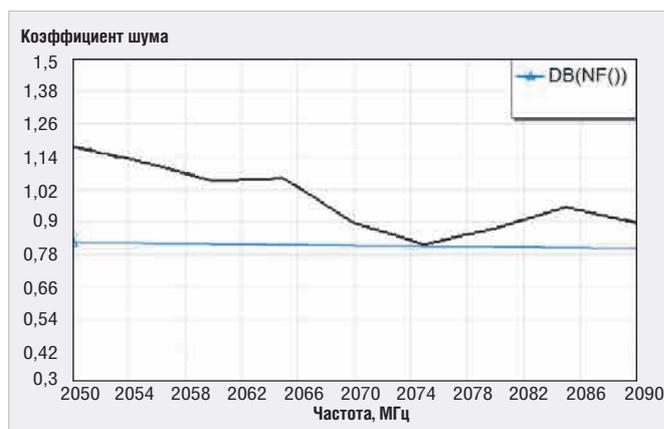


Рис. 16. Зависимость коэффициента шума первого каскада от частоты

сходимость результата моделирования с измерениями всё в большей степени. Угол травления металлизации (Etch Angle) на данный момент является всего лишь анонсированным параметром, не влияющим на расчёт и предназначенным для будущих версий Microwave Office. После расчёта топологии в модуле EM Structures с помощью утилиты Symbol Generator Wizard создаётся условное обозначение печатной платы МШУ для модуля Circuit Schematics. Условное обозначение платы помещается в модуль Circuit Schematics в качестве подцепи (SubCircuit), где к нему подключаются ВЧ-модели активных и пассивных

элементов схемы МШУ для проведения комбинированного расчёта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В EM STRUCTURES

#### Результаты моделирования первого каскада усиления в EM Structures

На рисунке 13 отражена зависимость коэффициента передачи первого каскада усиления от частоты, полученная после моделирования топологии печатной платы в модуле EM Structures. На этом же рисунке приведены результаты измерений первого каскада МШУ.

Как видно из рисунка 13, расчётная зависимость коэффициента передачи

с учётом электромагнитного расчёта топологии смещена вниз по частоте примерно на 250 МГц относительно зависимости на рисунке 6. Полученные результаты измерений качественно повторяют форму зависимости коэффициента передачи с учётом электромагнитного расчёта. Ошибка по абсолютному значению не превышает 1 дБ.

Измеренная зависимость КСВ входа и выхода от частоты, графически представленная на рисунках 14 и 15, также качественно повторяет результаты, полученные с учётом электромагнитного расчёта топологии.

Измеренное значение коэффициента шума первого каскада МШУ не превы-

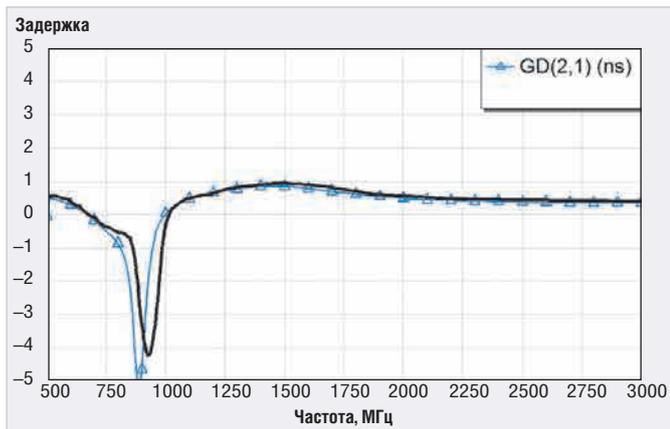


Рис. 17. Зависимость ГВЗ первого каскада от частоты

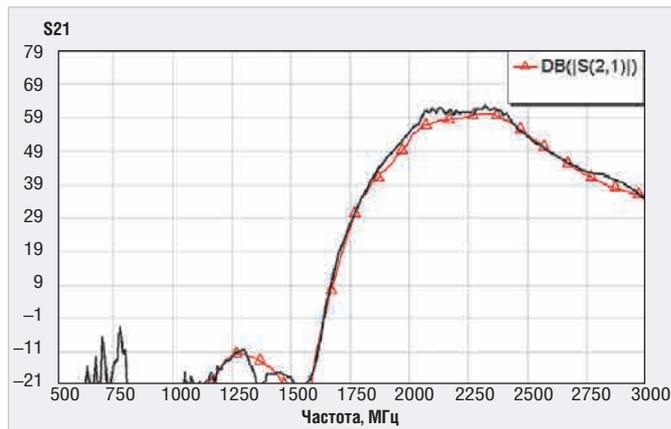


Рис. 18. Зависимость коэффициента передачи МШУ от частоты

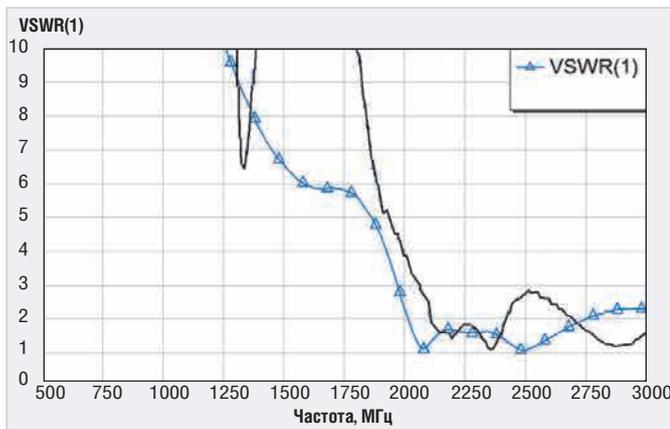


Рис. 19. Зависимость КСВ входа МШУ от частоты

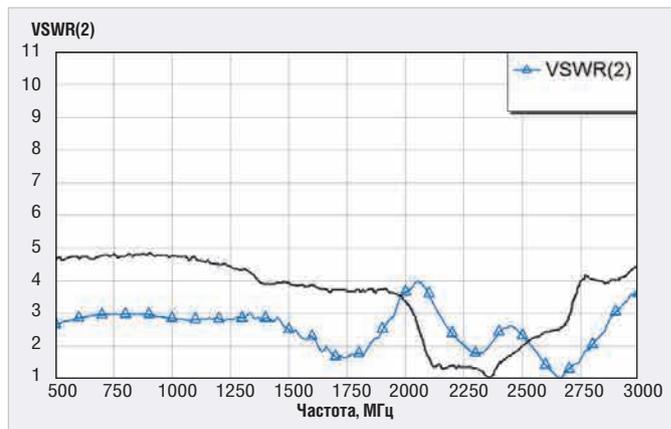


Рис. 20. Зависимость КСВ выхода МШУ от частоты

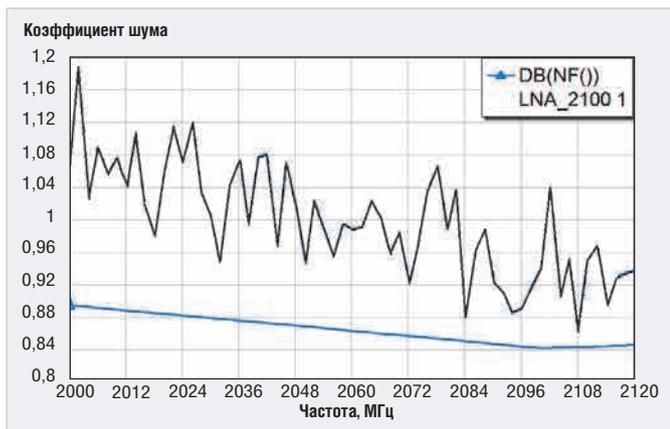


Рис. 21. Зависимость коэффициента шума МШУ от частоты

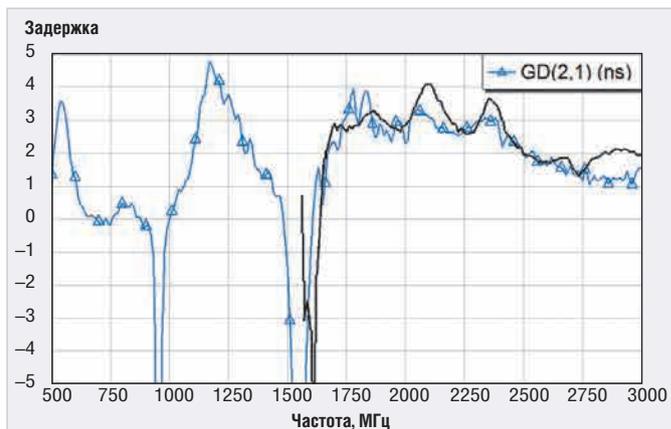


Рис. 22. Зависимость ГВЗ МШУ от частоты

шает 1 дБ. Сравнение частотной зависимости расчётного коэффициента шума с измеренными значениями представлено на рисунке 16.

На рисунке 17 приведён график зависимости группового времени запаздывания сигнала при прохождении через тракт усилителя.

**Результаты моделирования четырёх каскадов усиления в EM Structures**

На рисунке 18 изображён график зависимости коэффициента передачи

четырёхкаскадного МШУ от частоты, полученной после моделирования топологии печатной платы в модуле EM Structures. На этом же рисунке приведены результаты измерений.

Как видно из рисунка 18, результаты измерений точно повторяют смоделированную характеристику. Коэффициент передачи в интересующем нас диапазоне частот составляет не менее 60 дБ.

На рисунках 19 и 20 приведено сравнение измеренных значений КСВ входа и выхода МШУ с расчётными значениями. Результаты измерений и моделиро-

вания качественно повторяют друг друга. Значение КСВ входа не превышает 1,9 в интересующем диапазоне частот, значение КСВ выхода не превышает 1,3 в интересующем диапазоне частот.

Измеренное значение коэффициента шума МШУ не превышает 1 дБ в исследуемом диапазоне частот. Сравнение частотной зависимости расчётного коэффициента шума с измеренными значениями представлено на рисунке 21.

На рисунке 22 приведена зависимость ГВЗ сигнала при прохождении через тракт МШУ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с результатами моделирования был изготовлен макет МШУ S-диапазона. Смоделированные характеристики устройства были подтверждены результатами измерений. Полученная корреляция между результатами измерений и результатами моделирования обусловлена разумным подходом к моделированию устройства с учётом определённых особенностей технологии производства печатной платы, использования ВЧ-моделей активных и пассивных элементов схемы, проведения полномасштабного электромагнитного моделирования топологии МШУ.

Замечено, что при использовании верхнего слоя металлизации ненулевой толщины происходит смещение частотной зависимости характеристик устройства вниз по частоте. Данный эффект подтверждён результатами измерений. Введение такого параметра, как угол травления металлизации (Etch Angle), в будущих версиях Microwave Office ожидаемо должно привести к увеличению сходимости результатов макетирования и моделирования.

Некоторые несоответствия между результатами моделирования и макетирования можно отнести к тому, что при моделировании не были учтены моменты корпусированного испол-

нения МШУ и размещения разъёмов в корпусе МШУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kapcon P.* Высокочастотные усилители. – М.: Радио и связь, 1981.
2. *Gonzalez G.* Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design (2nd Edition). – ISBN 978-0132543354, 1996.
3. NI AWR Design Environment. Руководство по Microwave Office. – 2017.
4. NI AWR Design Environment. Model XML-list: [http://downloads.awrcorp.com/weblibs/13\\_0/top\\_v13.xml](http://downloads.awrcorp.com/weblibs/13_0/top_v13.xml)
5. *Marion L. E.* A new criterion for linear 2-port stability using a single geometrically derived parameter / IEEE transactions on microwave theory and techniques. Vol. 40, № 12, December 1992. ©

### НОВОСТИ МИРА

#### КАК УТЕКАЮТ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Для идентификации личности и доступа к различным сервисам всё чаще используется биометрическая информация (отпечатки пальцев, изображение радужной оболочки глаза, слепок голоса и т.д.). Компрометация подоб-

ных сведений из централизованных хранилищ влечёт ещё более тяжёлые последствия, чем утечка классических персональных данных.

Крупнейшей мировой базой биометрических данных на сегодня считается UIDAI – система идентификации граждан и резидентов Индии. В ней содержится более миллиарда

уникальных персональных номеров AADHAAR, которые, в частности, служат для аутентификации в банках и при получении ряда государственных услуг. В мае 2017 года правительственные организации допустили утечку порядка 135 млн данных. По сведениям портала WikiLeaks, биометрической информацией миллионов индусов завладело ЦРУ. Американская спецслужба использовала технологию кибершпионажа, разработанную Class Match.

Хотя власти Индии неоднократно заявляли о безопасности данных UIDAI, в начале 2018 года национальное хранилище было скомпрометировано полностью.

Охоту за сведениями физиологического и биологического характера уже ведут хакерские группировки. Так, в прошлом году злоумышленники взломали сеть американской компании Avanti Markets, производителя киосков самообслуживания для приобретения закусок и напитков. Судя по всему, киберпреступники получили доступ не только к платёжным данным, но и к биометрической информации клиентов компании.

На Филиппинах в феврале 2017 года произошла утечка данных всех избирателей. В компьютере, который был украден из Комиссии по выборам, находилась биометрия (отпечатки пальцев) 55 млн граждан. Хотя данные были зашифрованы, нельзя исключать, что злоумышленники могли извлечь их.

Аналогичный инцидент ранее случился в Гане. Из избирательной комиссии похищены четыре компьютера с данными биометрической регистрации голосующих граждан. К счастью, технические специалисты избиркома сделали копии данных на USB-накопители.

*Аналитический центр компании InfoWatch*

## Надёжные ИСТОЧНИКИ – успех МИССИИ В КОСМОСЕ



Interpoint®

БЕЗЛИЦЕНЗИОННАЯ ПОСТАВКА



SMRT Series™



SLH Series™



SMTR Series™



MFP Series™

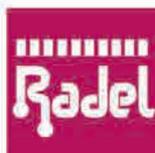
- Уровень дозовой стойкости 30, 50 и 100 крад
- Стойкость к воздействию заряженных частиц с ЛПЭ до 86 МэВ·см<sup>2</sup>/мг
- Высокая удельная мощность

### Продукция Interpoint® уровня качества Space

www.inter-pro.net  
interpro@embedded.ru



Реклама

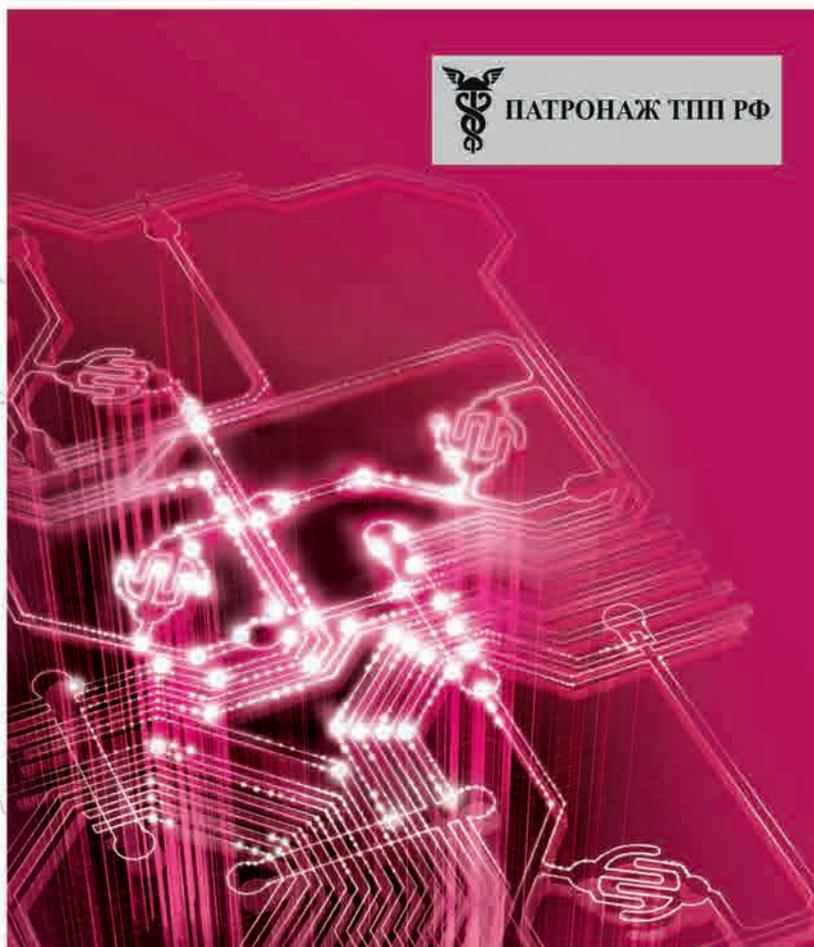


# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА



ПАТРОНАЖ ТПП РФ



- Электронные компоненты
- Комплектующие
- Печатные платы
- Светотехника
- Материалы
- Конструктивы
- Робототехника
- Технологии
- Промышленное оборудование и инструменты
- Контрольно-измерительные приборы и лабораторное оборудование

Организатор выставки: <http://radelexpo.ru/>



тел.: +7 (812) 777-04-07  
[radel2@farexpo.ru](mailto:radel2@farexpo.ru)

## 18 – 20 сентября 2018

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»,  
Петербургское шоссе 64/1, павильон F