

УДК 621.375.4

Н.Б. Дроботун

Модуль сверхширокополосного усилителя диапазона 10 МГц – 20 ГГц с диссипативной коррекцией АЧХ

Разработан и изготовлен модуль сверхширокополосного усилителя с рабочим диапазоном частот 10 МГц – 20 ГГц, особенностью конструкции которого является применение диссипативной цепи для коррекции амплитудно-частотной характеристики данного усилителя. Приведены результаты экспериментальных исследований основных параметров данного усилителя, а также результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: амплитудно-частотная коррекция, гибридная интегральная схема, монолитная интегральная схема, усилитель с распределённым усилением, возвратные потери, коэффициент шума.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-74-77

Одним из основных требований для современных систем связи и передачи данных является быстроедействие, например передача данных в оптических системах происходит со скоростью 10 Гбит/с (ОС-192) и 40 Гбит/с (ОС-768) на канал [1]. Для обеспечения такого быстрогодействия применение сверхширокополосных усилителей является практически безальтернативным решением.

Вторым не менее важным применением подобных усилителей является их использование в измерительной и генераторной технике сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. В СВЧ-тракте таких измерительных приборов, как векторные анализаторы цепей, анализаторы спектра, измерители коэффициента шума, как правило, используются усилители с распределённым усилением (УРУ), позволяющие реализовать усиление сигнала при сравнительно низком коэффициенте шума и с широким динамическим диапазоном [2].

Известны маломощные коммерческие арсенид-галлиевые и нитридгаллиевые монолитные интегральные схемы (МИС) УРУ с рабочим диапазоном до 24 ГГц, такие как СНА4220-98F (UMS) [3], TGA2227 (TriQuint) [4], MP540 (Микран) [5, 6] и НМС460 (Analog Devices) [7]. Представленный модуль реализован с применением НМС460, т.к. с точки зрения автора данная МИС является наиболее сбалансированной по своим техническим параметрам и не требует использования в схеме включения сверхширокополосных индуктивностей, что усложняет и удорожает конструкцию СВЧ-модуля.

Основной недостаток существующих модулей сверхширокополосных усилителей – довольно большая неравномерность АЧХ (спад усиления от 0,5 до 2 дБ на октаву). Кроме этого, в приёмном тракте с ростом частоты возрастают потери. Общая неравномерность АЧХ может достигать более 5 дБ. Для компенсации всех потерь предлагается использовать диссипативную коррекцию АЧХ.

Цель данной работы – представить результаты разработки и анализа параметров СВЧ-модуля с диапазоном рабочих частот 10 МГц – 20 ГГц с применением оптимальной по согласованию и глубине коррекции диссипативной корректирующей цепи (ДКЦ).

Структурная схема и требуемые параметры сверхширокополосного усилителя

Синтез модуля сверхширокополосного усилителя осуществляется на основе метода оптимизации, поэтому важным первоначальным этапом его реализации является задание исходных параметров. Исходя из применимости представляемого усилителя в приёмном тракте измерителя коэффициента шума Х5М-18 и анализатора спектра СК4М-18, были сформулированы определённые требования к его техническим параметрам (таблица).

Требуемые технические параметры

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,01–20
Усиление, дБ	Не менее 30
Величина коррекции, дБ	4...5 дБ
Возвратные потери (вход), дБ	Не менее –12
Возвратные потери (выход), дБ	Не менее –10
Коэффициент шума	Не более 5
Компрессия P1 по выходу, дБм	Не менее 12

Оценка достижимых параметров по таблице показала, что необходимое усиление достигается в трехкаскадной структурной схеме усилителя, которая представлена на рис. 1.

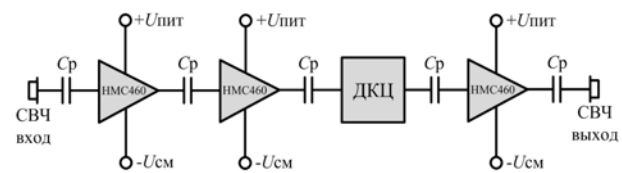


Рис. 1. Структурная схема усилителя

Схема построена на основе монолитной интегральной схемы (МИС) НМС460. Согласно документации производителя на МИС НМС460 [7] необходимо два напряжения питания: положительное $U_{пит}$ (+8 В) и отрицательное смещение $U_{см}$ (–0,9 В). При таком смещении и питании обеспечивается оптимальный режим работы МИС. Было проведено моделирование схемы по рис. 1, которое показало, что диссипативная корректирующая цепь, исходя из условия минимальных шумов и максимальной выходной мощности, включается между вторым и третьим каскадами.

Диссипативная корректирующая цепь

ДКЦ представляет собой частотно-зависимый П-образный аттенуатор [8]. Коррекция АЧХ реализована с помощью топологических связанных расщеплённых холстоходных линий (отмечены * на рис. 3) и индуктивных элементов, выполненных с помощью отрезков золотой проволоки (L_1 и L_2). Применение связанных расщеплённых линий обусловлено как необходимостью коррекции паразитных составляющих элементов L_1 и L_2 , так и для высокочастотного шунтирования резисторов R_1 , R_2 и R_3 .

Исходя из требуемого усиления (не менее 27 дБ), для ДКЦ было выбрано значение начального ослабления аттенуатора – 15 дБ. Оптимальной амплитудной характеристикой ослабления ДКЦ будет характеристика, близкая к логарифмической. Эквивалентная схема предлагаемой корректирующей цепи показана на рис. 2.

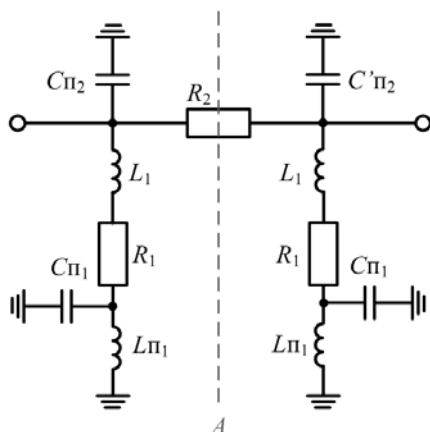


Рис. 2. Эквивалентная схема ДКЦ

Для удобства расчёта первоначальных значений элементов примем, что данная схема симметрична относительно оси A , но так как данная цепь будет находиться между каскадами усиления, входные и выходные КСВН которых отличаются между собой, для оптимального согласования каскадов введено условие, при котором $C_{п1} \neq C'_{п2}$. Реализация данного условия достигается с помощью асимметричного применения расщеплённых связанных холстоходных линий. Исходные значения сопротивлений R_1 и R_2 можно рассчитать по методике, представленной в [9], используя формулы для симметричной П-образной цепи:

$$R_1 = R_0 \frac{N+1}{N-1}, \tag{1}$$

$$R_2 = R_0 \left(\frac{N^2 - 1}{2N} \right), \tag{2}$$

где R_0 – волновое сопротивление, N – ослабление аттенуатора в раз. Используя (1) и (2), получаем значения $R_1 = 71,63$ Ом и $R_2 = 136,14$ Ом. Глубина и вид коррекции будут определяться реактивными элементами L_1 , $L_{п1}$, $C_{п1}$, $C_{п2}$, $C'_{п2}$.

Трёхмерная электромагнитная модель топологии ДКЦ представлена на рис. 3.

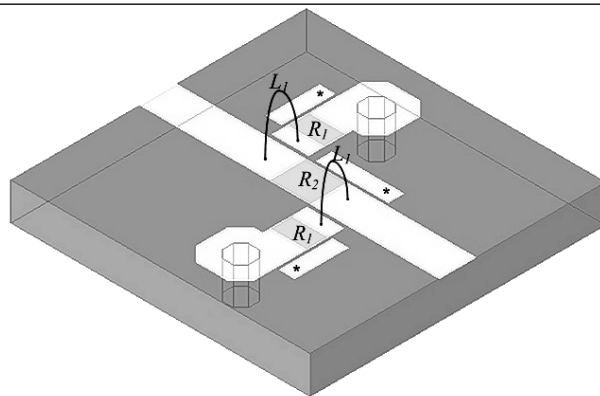


Рис. 3. Трёхмерная электромагнитная модель топологии ДКЦ

Основные корректирующие элементы (индуктивности L_1 и L_2) выполнены с помощью шлейфов из золотой проволоки. Также дополнительная коррекция осуществляется топологическими элементами, расположенными возле резисторов R_1 и R_2 .

Расчётные возвратные потери и потери на проход представлены на рис. 4. Электромагнитное моделирование и оптимизация топологий, а также все аналитические расчёты производились с помощью САПР ADS компании Keysight.

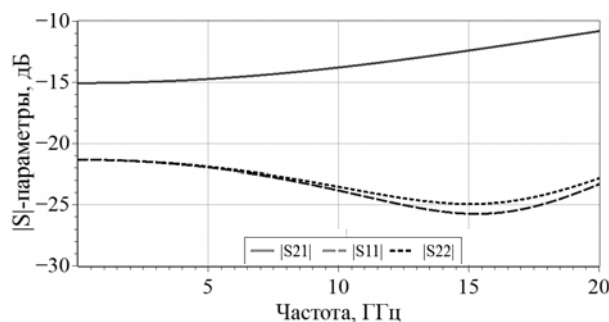


Рис. 4. Графики расчётных возвратных потерь и потерь на проход для ДКЦ

Из рис. 4 видно, что глубина коррекции составляет 4,5 дБ (20 ГГц). Также была проведена оптимизация по заданному уровню возвратных потерь. Для обеспечения хорошего согласования между каскадами топология была рассчитана для уровня возвратных потерь не более –20 дБ в рабочем диапазоне частот.

Технология изготовления и конструкция СВЧ-модуля

Представленный модуль сверхширокополосного СВЧ-усилителя изготовлен по технологии гибридных интегральных схем (ГИС), широко применяемой в АО «НПФ Микран». Корпус СВЧ-модуля изготовлен из алюминиевого сплава Д16-Т и покрыт сплавом Sn–Bi (олово–висмут). Микрополосковые платы изготовлены из поликора с относительной диэлектрической проницаемостью 9,9 и толщиной 0,254 мм. СВЧ-линии передачи выполнены методом вакуумного осаждения золота, топологические резисторы – методом вакуумного осаждения тантала. Все элементы смонтированы в корпус методом пай-

ки с использованием низкотемпературных припоев. В качестве СВЧ-разъёмов использованы коаксиально-микрополосковые переходы серии ПКМ2-20 (Микран), для фильтрации питания и обеспечения электромагнитной изоляции СВЧ-модуля использованы фильтры питания ЕМІ/RF 4300-009 (Tusonix) и прокладки из токопроводящего композитного материала на основе мелкодисперсных резиновых и серебряных гранул. Для исключения возможности автогенерации в канале СВЧ-тракта был использован листовой композитный материал (Ecosorb), обладающий свойствами широкополосного СВЧ-поглотителя. Питающие напряжения дополнительно стабилизированы с помощью линейных стабилизаторов с ультранизким собственным уровнем падения напряжения для исключения возможного перегрева СВЧ-модуля. Также для дополнительной температурной стабилизации в схеме формирующей напряжения смещения применены термисторы с обратной температурной зависимостью.

СВЧ-тракт усилителя

Используя файлы S-параметров от производителей комплектующих (МИС НМС460, конденсатор АТС550, разъём-переход ПКМ2-20), можно полностью смоделировать СВЧ-тракт усилителя. Также было проведено полное электромагнитное моделирование топологий подводящих микрополосковых плат с разрывами для разделительных конденсаторов.

Расчётные АЧХ усилителя с ДКЦ и без ДКЦ приведены на рис. 5 в сравнении с измеренной АЧХ собранного усилителя. Все измерения проведены с помощью векторного анализатора цепей P4226 (АО «НПФ Микран»).

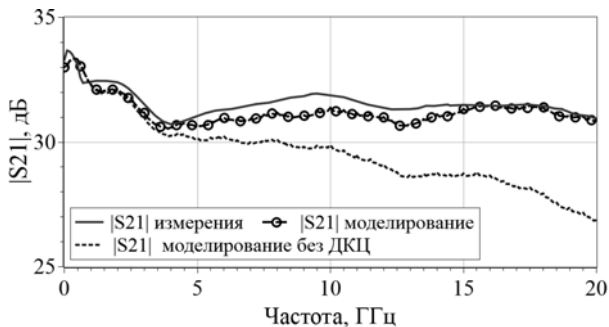


Рис. 5. Графики измеренных и расчётных АЧХ усилителя с ДКЦ и без ДКЦ

Как видно из рис. 5, расчётные значения АЧХ имеют очень хорошую сходимость с измеренными. Применение ДКЦ уменьшает неравномерность АЧХ с 8 до 3,5 дБ во всём рабочем диапазоне частот. Подъём АЧХ в области частот от 10 МГц до 3 ГГц обусловлен внутренней схематехникой УРУ и подробно описан в [10]. Коррекция указанного частотного диапазона не входила в задачи этой работы, но также возможна с применением других ДКЦ.

Возвратные потери по входу и выходу смоделированного СВЧ-тракта усилителя приведены на рис. 6 в сравнении с возвратными потерями по входу и выходу реального устройства.

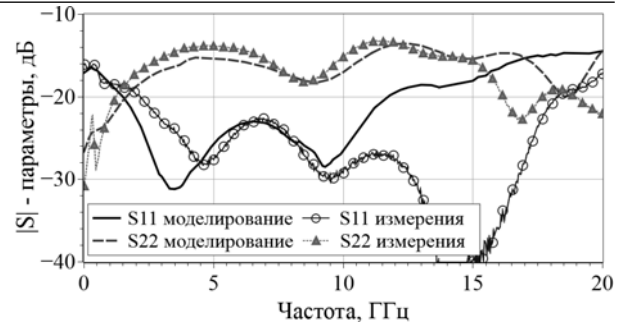


Рис. 6. Графики измеренных и расчётных возвратных потерь по входу и выходу усилителя

Как видно из рис. 6, значения возвратных потерь по входу и выходу усилителя укладываются в изначальные требования с большим запасом. Возвратные потери не менее -15 дБ по входу и не менее -15 дБ по выходу. Из представленных графиков видно, что выше 10 ГГц график расчётные возвратных потерь существенно отличается от измеренного. Это связано с методом измерений. S-параметры усилителя, используемые для расчёта, были сняты производителем микросхемы с использованием СВЧ-зондов, и после частоты 10 ГГц между используемыми СВЧ-зондами, как правило, уже возникает электромагнитная связь, что приводит к подобным результатам, ухудшает развязку (S12) и снижает точность измерения возвратных потерь на высоких частотах.

Измерение коэффициента шума и компрессии

Измерения коэффициента шума были проведены с помощью измерителя X5M-18 (АО «НПФ Микран») и генератора шума ГШМ2 (АО «НПФ Микран»). Измеренный график коэффициента шума представлен на рис. 7.

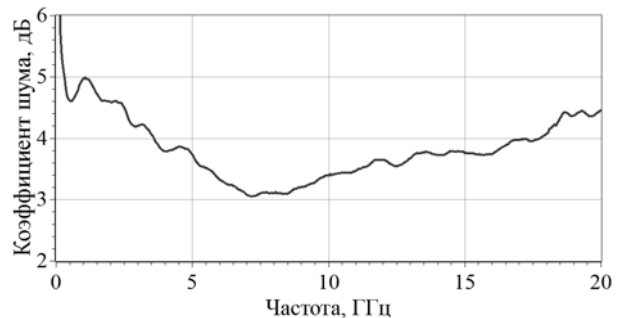


Рис. 7. Измеренный график коэффициента шума усилителя

Измерения компрессии были проведены с помощью опционального векторного анализатора цепей P4M-18 (АО «НПФ Микран»). Измеренный график компрессии по выходу усилителя представлен на рис. 8.

Измерения проводились с шагом 0,5 ГГц, для каждой частотной точки определялась мощность, на которой происходит сжатие на 1 дБ, затем в автоматизированном режиме был построен представленный график зависимости выходной мощности от частоты.

Как видно из графиков, представленных на рис. 7 и 8, разработанный усилитель полностью соответствует изначальным техническим требованиям.

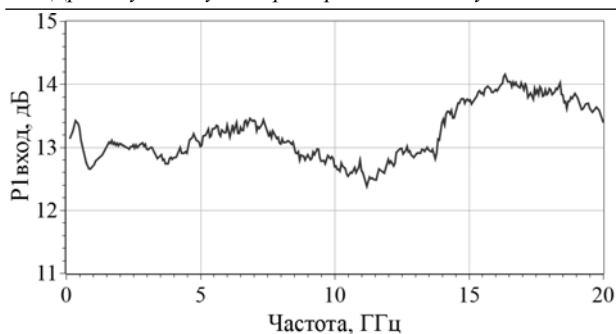


Рис. 8. Измеренный график выходной мощности усилителя при сжатии на 1 дБ

Внешний вид СВЧ-тракта разработанного усилителя представлен на рис. 9.

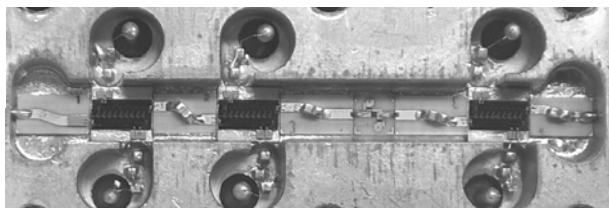


Рис. 9. Внешний вид СВЧ-тракта усилителя

Использование представленного усилителя в приборах Х5М-18 и СК4М-18 (Микран) позволяет получить равномерную характеристику коэффициента шума измерительного тракта во всём рабочем диапазоне частот, что повышает метрологические характеристики измерительных приборов.

На представленный модуль СВЧ-усилителя получены два патента на полезные модели [11, 12].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.577.21.0188 от 27.10.2015 г., идентификатор RFMEFI57715X0188.

Литература

1. Susan Shannon, Computer Networking and Networks; Nova Science Publisher, Inc., – 2006. – 247 p.
2. Кузьмин А.А. Маломощные усилители с распределенным усилением. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
3. CHA4220-98F A new broadband distributed driver amplifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ums-gaas.com/cha4220-98f-a-new-broadband-dist.php> (дата обращения: 10.06.2016).

4. 2-22 GHz GaN Low Noise Amplifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.triquint.com/products/p/TGA2227> (дата обращения: 22.06.2016).

5. Арыков В.С. и др. GaAs МИС усилителя распределенного усиления // Сборник докладов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 4–7 июня 2012. – С. 165–168.

6. Степаненко М.В. Полевой транзистор с субмикронным Т-образным затвором, полученным с использованием пристеночного диэлектрика / М.В. Степаненко и др. // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1 (31). – С. 106–108.

7. HMC460 – Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc460.pdf> (дата обращения: 15.06.2016).

8. Титов А.А. Расчет межкаскадной корректирующей цепи многооктавного усилителя мощности на полевых транзисторах // Радиотехника. – 1989. – №12. – С. 30–33.

9. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

10. Morkner H. et al. A Novel Small PHEMT LNA that Incorporates Active Matching for 1 to 20 GHz and 1.1 dB NF / European Microwave Conference. October, 2010.

11. Патент на полезную модель № 131256 «Сверхширокополосный малошумящий усилитель сверхвысоких частот».

12. Патент на полезную модель № 133666 «Малошумящий усилитель сверхвысоких частот с термокомпенсацией».

Дроботун Николай Борисович

Аспирант каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) ТУСУРа
Тел.: +7-960-975-73-44
Эл. почта: nikolay.drobotun@micran.ru

Drobotun N.B.

10 MHz – 20 GHz Microwave Amplifier Module with Dissipative Transmission Correction

This paper presents a 10 MHz – 20 GHz microwave amplifier module with dissipative transmission correction. The experimental research of the main parameters of the amplifier is shown in comparison to the data originated from EM simulations.

Keywords: transmission gain correction, MHMIC, MMIC, distributed amplifier, return loss, noise figure.