

УДК 621.3.049.7 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.36.41

## Малозумящий усилитель приемо-передающего модуля активной фазированной решетки *Ka*-диапазона частот

**А. В. Буянкин**, *buyankin.av@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**В. Э. Поймалин**, *poimalin.ve@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. А. Нелин**, *к. воен. н., innovation@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Л. Е. Рагулина**, *к. ф.-м. н., ragulina.le@mipt.ru*

*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация*

**М. В. Рыжаков**, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*

*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация*

**Аннотация.** В рамках разработки опытного образца приемо-передающего модуля (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) на основе комбинирования технологии многослойных печатных СВЧ-плат и управляющей системы на кристалле был разработан монолитный малозумящий усилитель (МШУ) для диапазона частот 30–36 ГГц, созданный по технологии рНЕМТ GaAs с топологической нормой 0,15 мкм. Разработка выполнена с помощью современных систем автоматического проектирования и моделирования. Проведены исследования по оптимизации топологии усилителя для ППМ АФАР. Результаты расчетов были использованы для проектирования схемы и топологии усилителя в средах Microwave Office и Advanced Design System.

В статье показано, что на частоте 33 ГГц коэффициент усиления МШУ достигает 15 дБ при коэффициенте шума не более 3 дБ.

**Ключевые слова:** монолитная интегральная схема, малозумящий усилитель, рНЕМТ, активная фазированная решетка

## Low-Noise Amplifier for the Transceiver Module of a *Ka*-band Active Phased Array

**A. V. Buyankin**, *buyankin.av@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**V. E. Poimalin**, *poimalin.ve@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**A. A. Nelin**, *Cand. Sci. (Mil.), innovation@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**L. E. Ragulina**, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), ragulina.le@mipt.ru*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation*

**M. V. Ryzhakov**, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation*

**Abstract.** A monolithic low-noise amplifier (LNA) for the 30–36 GHz frequency band with the implementation of pHEMT GaAs technology with a 0.15  $\mu\text{m}$  layout rule was created as part of the process of designing a prototype transceiver module (TM) for an active phased array antenna (APAA) based on the combination of multilayer microwave (MW) printed circuit boards and control system-on-chip technologies. The development was carried out with the help of present-day systems of automated design and simulation. Research on optimizing the amplifier layout for the APAA TM was carried out. Results of calculations were used to design the circuit and layout of the amplifier in the Microwave Office and Advanced Design System environments.

The article demonstrates that LNA gain reaches 15 dB with a noise figure of no more than 3 dB at a frequency of 33 GHz.

**Keywords:** monolithic integrated circuit, MIC, low-noise amplifier, LNA, pHEMT, active phased array antenna, APAA, AESA

## Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие космических систем радиолокации и связи, что влечет за собой существенное увеличение количества космических аппаратов (КА) и увеличение объемов передаваемой информации по каналам связи. При этом частотный ресурс в разрешенных диапазонах  $P$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $C$ ,  $X$  весьма ограничен и в большинстве случаев занят существующими системами. В связи с этим перед разработчиками перспективных космических систем связи стоит задача освоения миллиметровых диапазонов  $K$ - и  $Ka$ - для связи как между КА, так и между КА и наземными станциями [1]. При этом одной из современных тенденций является широкое применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) в космических радиоприемниках.

Актуальность работы подтверждается проводимыми в настоящее время комплексными проектами по созданию высокотехнологичных производств, в том числе и приемно-передающих модулей с активной фазированной антенной решеткой на основе современных технологий. Проект от 31.05.2018 № 074-11-2018-014, выполняемый в рамках соглашения с Минобрнауки России и кооперации с вузами (Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218), — тому подтверждение. Решаемая комплексная задача при этом является сложной как с научной, так и с производственной и технологической точек зрения.

Одна из главных задач при создании приемно-передающих модулей  $Ka$ -диапазона частот — увеличение чувствительности приемника [2]. Для решения данной задачи требуется создание монолитной интегральной схемы (МИС) МШУ с достаточно малым коэффициентом шума. Наиболее подходящей для создания МШУ  $Ka$ -диапазона частот является технология рНЕМТ GaAs с топологической нормой 0,15 мкм [3]. В связи с необходимостью интеграции МШУ непосредственно в антенну к блоку МШУ могут быть предъявлены более жесткие требования по внешним воздействующим факторам (ВВФ), в особенности по спецфакторам. Поэтому технология создания МИС должна быть в наименьшей степени подвержена воздействию космических излучений и др. [4].

Т а б л и ц а. Требуемые параметры МШУ

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение параметра	Норма параметра	
			не менее	не более
Параметры				
1	Диапазон рабочих частот, ГГц	$f$	30	36
2	Коэффициент усиления, дБ	$K_y$	15	–
3	Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	–	3,1
4	Максимальная выходная мощность, дБмВт	$P_{вых}$	10	
5	КСВН входа/выхода	$K_{сгУ}$		2,0
6	Ток потребления, мА	$I$		80

Требуемые параметры МШУ представлены в таблице.

На основе процесса рНЕМТ 0,15 мкм разработан 2-каскадный МШУ с напряжением питания 5 В и напряжением смещения 0,7 В (рис. 1).

Принципиальная схема МШУ при реализации на микрополосковых линиях представлена на рис. 2.

На основе принципиальной схемы сгенерирована топология усилителя (рис. 3). Размер МИС МШУ 2500 × 1000 мкм. Расчетный ток потребления — менее 80 мА.

В процессе разработки МШУ проведено моделирование выходной мощности. В результате достигнуто значение выходной мощности МШУ на уровне 15 дБм. На рис. 4 представлен гармонический сигнал усилителя при максимальной мощности на выходе.

Моделирование топологии было произведено методом косимуляции (рис. 5), смысл которого состоит в том, что электромагнитное моделирование производится без транзисторов. Модели транзисторов при получении характеристик МШУ подгружаются из схемотехнического редактора.

Результаты моделирования максимального коэффициента усиления МИС МШУ в схемотехническом и топологическом редакторах представлены на рис. 6.

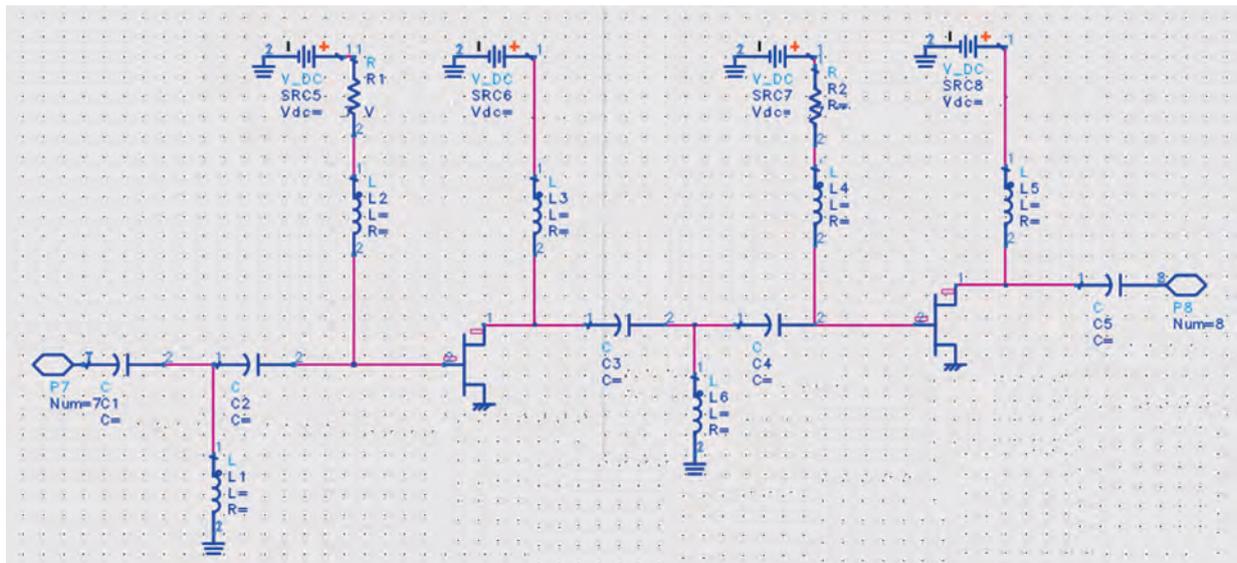


Рис. 1. Принципиальная схема МШУ

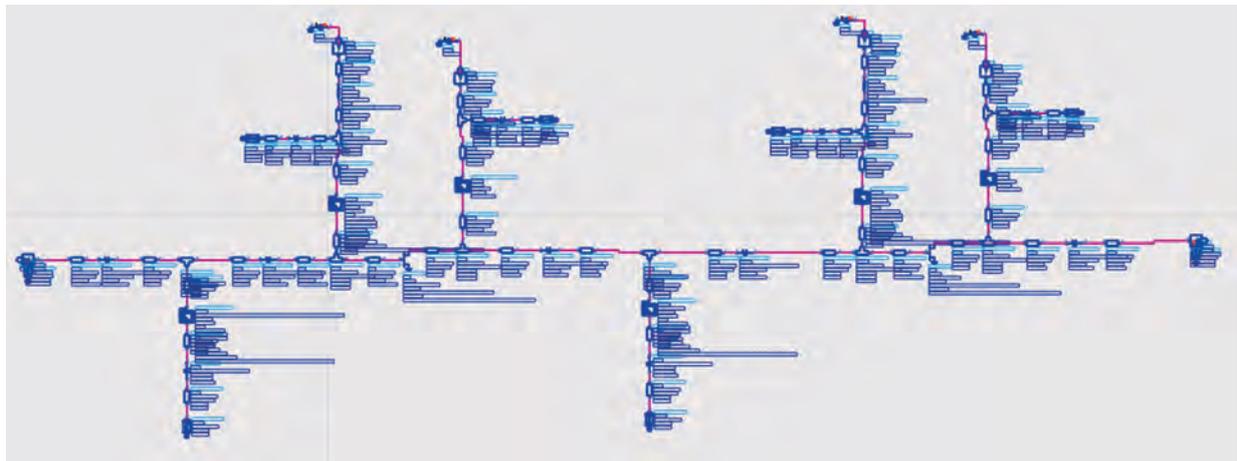


Рис. 2. Принципиальная схема МШУ при реализации на микрополосковых линиях

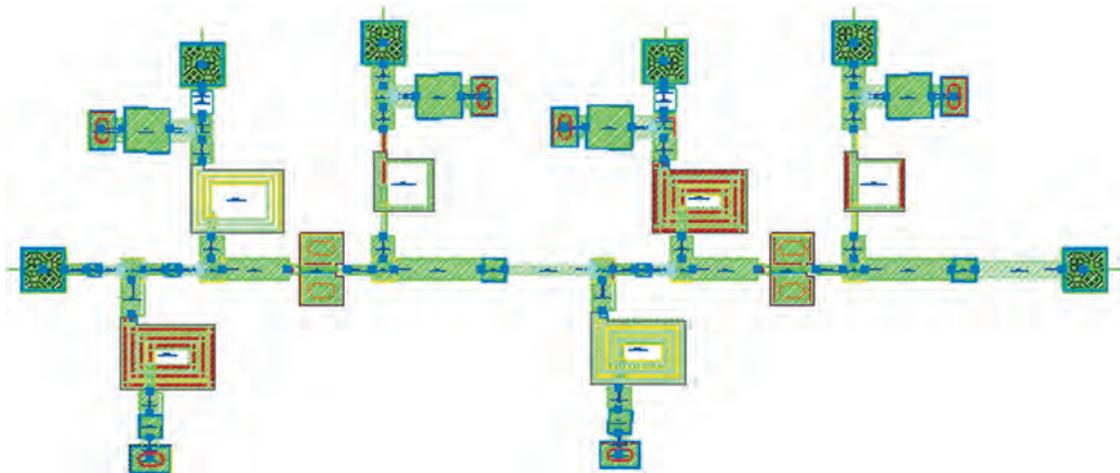
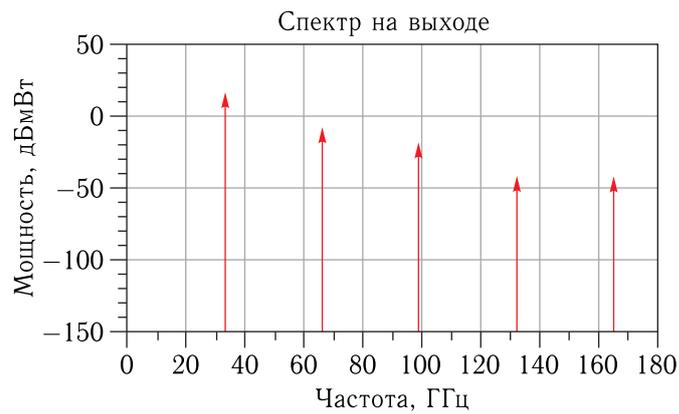


Рис. 3. Топология МИС МШУ



Частота несущей, ГГц	Мощность входного сигнала, дБм	Мощность несущей на выходе, дБм	Коэффициент преобразования
33,00	0,0000	15,296	15,296
Вторая гармоника, дБн	Третья гармоника, дБн	Четвертая гармоника, дБн	Пятая гармоника, дБн
-23,48	-35,52	-57,58	-59,34

Рис. 4. Значение максимальной выходной мощности МИС МШУ и ближайших гармоник

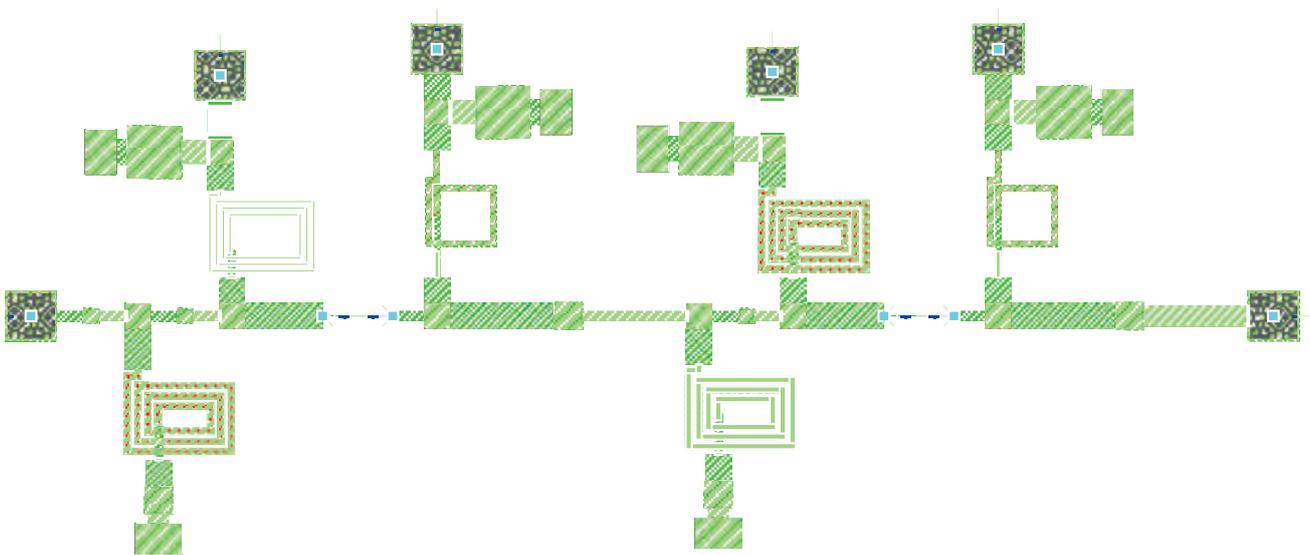


Рис. 5. Режим косимуляции МИС МШУ

Результаты топологического моделирования соответствуют предварительным оценкам. Усиление, полученное в топологии, в среднем на 2 дБ меньше, чем результаты схематехнического проектирования. На рис. 7 даны результаты моделирования

частотной зависимости коэффициентов отражения по входу и выходу.

Результаты топологического моделирования в части коэффициента отражения по входу оказались лучше, чем результаты схематехнического

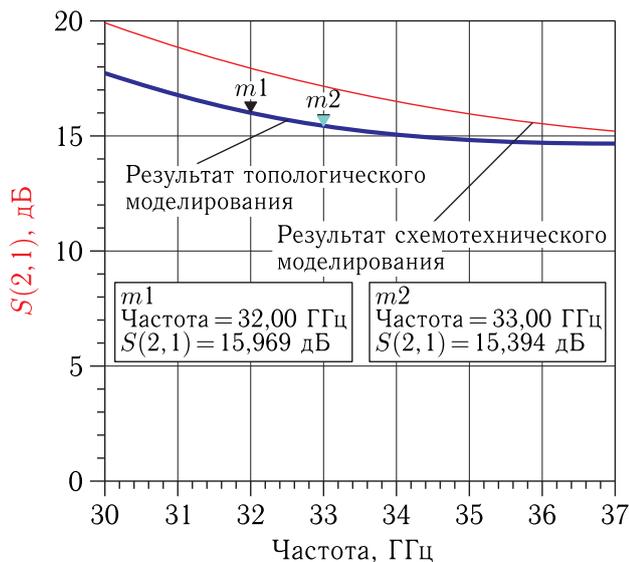


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования коэффициента усиления ( $S_{21}$ ) МИС МШУ

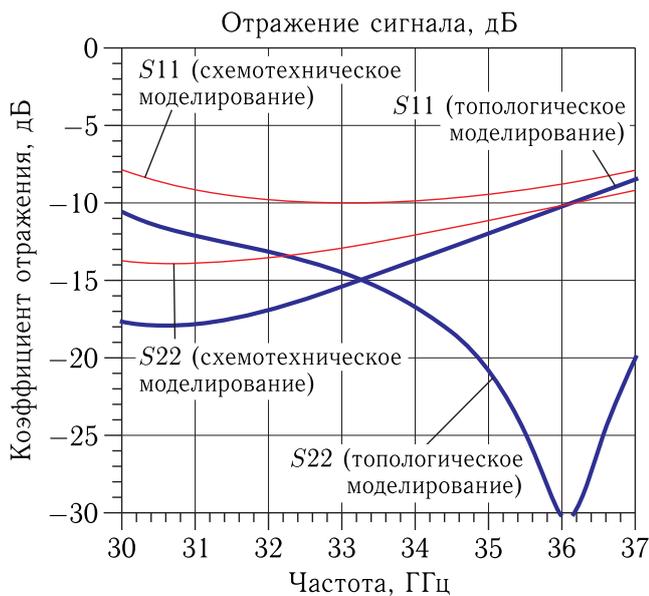


Рис. 7. дБ МШУ

моделирования. Результаты топологического моделирования в части коэффициента отражения по выходу частично не соответствуют результатам схемотехнического моделирования, однако не выходят за границы требований в частотном диапазоне 30–34 ГГц.

На рис. 8 приведены результаты моделирования коэффициентов шума МИС МШУ.

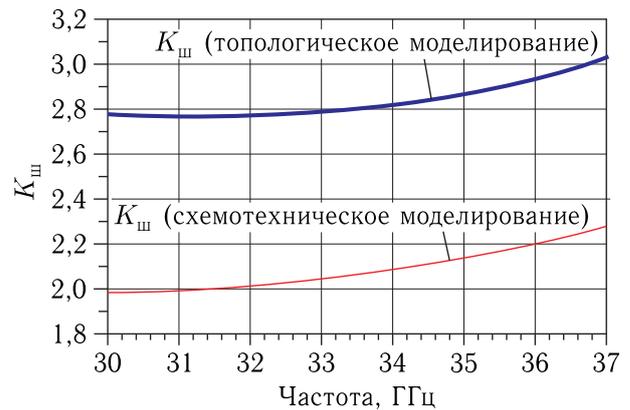


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования коэффициентов шума МИС МШУ

По результатам топологического моделирования значение коэффициента шума не превышает 3 дБ, а в диапазоне частот 30–33 ГГц коэффициент шума составляет 2,8 дБ.

## Выводы

Исходя из результатов проведенного моделирования можно прийти к выводу, что прогноз по наиболее оптимальному использованию технологии рНЕМТ 0,15 мкм для создания МШУ Ka-диапазона частот был подтвержден. Разработанная топология МИС МШУ может быть использована с необходимыми конструктивными изменениями для создания приемного тракта кор-чипа ППМ АФАР Ka-диапазона частот.

*Статья подготовлена в рамках соглашения АО «Российские космические системы» с Минобрнауки России от 31.05.2018 № 074-11-2018-014. Соглашение заключено на основании Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных учреждений и организаций» для реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства в рамках подпрограммы «Институциональное развитие научно-исследовательского сектора» государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы».*

## Список литературы

1. Гнатюк Д.Л., Федоров Ю.В., Галиев Г.Б., Галиев Р.Р., Щербакова М.Ю. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ-диапазона на GaAs pHEMT-гетероструктурах // Доклады ТУСУРа, 2010, № 2 (22), ч. 1. С. 49–55.
2. Yang Hou, Ruming Wen, lingyun Li et al. Analysis and optimum design of impedance matching for Ka-band cryogenic low noise amplifiers [C] // Asia Pacific Microwave Conference. Singapore, 2009. P. 1593–1596.
3. Wang Gang, Chen Wei, Liu Jiarui, Mo Jiongjiang, Chen Hua, Wang Zhiyu, Yu Faxin et al. Design of a broadband Ka-band MMIC LNA using deep negative feedback loop // IEICE Electronics Express, 2018, vol. 15, iss. 10.
4. Wei-Tsung Li, Jeng-Han Tsai, Hong-Yuan Yang, Wei-Hung Chou, Shyh-Buu Gea, Hsin-Chia Lu, Tian-Wei Huang et al. Parasitic-Insensitive Linearization Methods for 60-GHz 90-nm CMOS LNAs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Aug. 2012, vol. 60, no. 8. P. 2512–2523.