

## ПОСТРОЕНИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ СВЧ-СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ

### CONSTRUCTION OF RECEIVING AND TRANSMITTING PATHS OF MICROWAVE SYSTEMS

С. Н. Замуруев<sup>1</sup>, Н. М. Легкий<sup>1</sup>, И. В. Унченко<sup>1</sup>,

Е. С. Тюренков<sup>1</sup>, В. И. Нерушев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

<sup>2</sup>АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», Москва

S. N. Zamuruev<sup>1</sup>, N. M. Legki<sup>1</sup>, I. V. Unchenko<sup>1</sup>,

E. S. Tyurenkov<sup>1</sup>, V. I. Nerushev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow

<sup>2</sup>JSC "Concern VKO "Almaz-Antey", Moscow

**Аннотация.** Улучшение эксплуатационных характеристик радиоэлектронных систем является одной из актуальных задач построения современных электронных и радиокомплексов различного назначения. Использование оптических элементов в радиотехнических системах позволяет формировать и обрабатывать радиосигналы частотой 10 ГГц и выше, до 100 ГГц. В статье рассмотрен подход построения приемо-передающих трактов радиоэлектронной аппаратуры с использованием фотонных элементов и технологий. В настоящее время появились не только новые аппаратные элементы, но и программные продукты, позволяющие с высокой степенью точности промоделировать новые радиофотонные устройства и системы. В статье в пакетах моделирования исследуются новые микросхемы, работающие в диапазоне 10 ГГц, проанализированы характеристики некоторых микросхем, работающих в данном диапазоне, а именно: коэффициент шума усилителя в зависимости от частоты, частотные зависимости, коэффициенты передачи, фазы коэффициента передачи микросхем. Рассмотрено построение приемного и передающего трактов систем передачи СВЧ-сигналов по оптическим каналам. При моделировании таких каналов показано, что при обработке оптических сигналов в радиотехнических трактах значительно уменьшается количество и уровень гармоник. Приведены спектры входного и выходного сигналов. В рамках моделирования оптоволоконных трактов, предназначенных для радиоприемных и радиопередающих систем, был проведен всесторонний анализ существующих методов построения высокочастотных трактов с применением фотонных технологий. В результате этого анализа были выявлены ключевые компоненты схем, которые демонстрируют наибольший потенциал для дальнейшего развития и интеграции в радиофотонные системы. Вывод был сделан на основе систематического обзора современных подходов и тенденций в области радиофотоники, а также глубокого изучения их технических и эксплуатационных характеристик. Данные наработки могут использоваться в радиотехнических системах различного назначения, в том числе в системах радионавигации, связи, радиолокационных станциях. Ключевые слова: фотоника, радиоэлектронные системы, радиофотоника, приемо-передающие модули, передача СВЧ-сигнала по оптоволокну.

Для цитирования: Построение приемо-передающих трактов СВЧ-систем с применением элементов фотоники / С. Н. Замуруев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 64–71.

**Annotation.** Improving the operational characteristics of radio electronic systems is one of the urgent tasks of building modern radio and electronic complexes for various purposes. The use of optical elements in radio engineering systems makes it possible to generate and process radio signals with a frequency of 10 GHz and higher, up to 100 GHz. The article considers an approach to the construction of radio-electronic equipment transceiver paths using photonic elements and technologies. Currently, not only new hardware elements have appeared, but also software products that make it possible to simulate new radiophotonic devices and systems with a high degree of accuracy. In the article, new microcircuits operating in the 10 GHz band are investigated in simulation packages, the characteristics of some microcircuits operating in this range are analyzed, namely: amplifier noise coefficient depending on frequency, frequency dependencies, transmission coefficients, phases of the transmission coefficient of the microcircuits. The construction of the receiving and transmitting paths of microwave signal transmission systems via optical channels is considered. When modeling such channels, it is shown that when processing optical signals in radio engineering paths, the number and level of harmonics are significantly reduced. The spectra of the input and output signals are given. As part of the modeling of fiber-optic paths intended for radio receiving and radio transmission systems, a comprehensive analysis of existing methods for constructing high-frequency paths using photonic technologies was carried out. As a result of this analysis, the key components of the circuits have been identified, which demonstrate the greatest potential for further development and integration into radiophotonic systems. This conclusion was made on the basis of a systematic review of modern approaches and trends in the field of radiophotonics, as well as an in-depth study of their technical and operational characteristics. These developments can be used in radio engineering systems for various purposes, including radio navigation, communications, and radar stations. Key words: photonics, radio electronic systems, radiophotonics, receiving and transmitting modules, microwave signal transmission via optical fiber.

For citation: Construction of receiving and transmitting paths of microwave systems / S. N. Zamuruev [et al.] // Electromechanical matters. VNIIEIEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 64–71.

#### Введение

На рубеже XX и XXI веков в результате интеграции достижений сверхвысокочастотной (СВЧ) радиоэлектроники и фотоники возникла новая междис-

циплинарная область знаний и технологий, известная как радиофотоника [1, 2]. Данная дисциплина исследует фундаментальные аспекты взаимодействия оптического излучения и радиочастотных сигналов

в контексте их применения для приема, передачи и обработки информации. Радиофотонные технологии, основанные на сочетании этих двух схемотехнических подходов, предоставляют уникальные возможности для радикального пересмотра схемотехнических решений и упрощения функциональной архитектуры радиоэлектронных систем. Их внедрение позволяет существенно сократить массогабаритные параметры устройств, а также снизить потребляемую мощность, что открывает новые перспективы в области миниатюризации и энергоэффективности радиоэлектронных компонентов [3].

Анализ современных тенденций развития радиоэлектронной аппаратуры демонстрирует, что при построении современных средств передачи информации различного назначения все больше внимания уделяется применению методов и подходов радиофотоники, помимо улучшения технических и экономических показателей, внедрение радиофотоники дополнительно повышает электромагнитную совместимость и стойкость к внешним воздействиям [4, 5].

Оптимизация эксплуатационных параметров радиоэлектронных систем представляет собой ключевую задачу в разработке современных радиотехнических и электронных комплексов различного назначения. Внедрение оптических элементов в радиотехнические системы открывает возможности для генерации и обработки радиосигналов в диапазоне частот от 10 ГГц и выше. Это позволяет значительно повысить эффективность и производительность радиоэлектронных комплексов, обеспечивая их соответствие современным требованиям и стандартам.

### Создание моделей радиофотонных устройств приемо-передающих трактов

Для обеспечения максимальной точности и релевантности моделирования необходимо использовать параметры, которые в полной мере отражают характеристики реально существующих интегральных микросхем. Такой подход позволяет минимизировать расхождения между результатами моделирования и реальными эксплуатационными показателями электронных систем, что, в свою очередь, способствует повышению качества проектирования и оптимизации производственных процессов.

Проанализировав исходные данные (рабочий диапазон частот, частоту обработки сигнала, максимальную входную мощность), подберем элементы приемных и передающих трактов и создадим их модели в системе автоматизированного проектирования (САПР) *AWR Design Environment*.

Входной ограничитель мощности – первый функциональный блок в приемном тракте, который

играет ключевую роль в обеспечении стабильной и безопасной работы последующих каскадов усиления. Основной задачей данного блока является снижение уровня входного сигнала до оптимального значения, предотвращая его превышение, которое могло бы привести к насыщению и искажению сигнала в малошумящем усилителе. В качестве ограничителя мощности целесообразно использовать специализированную микросхему TGL2208-SM фирмы *Qorvo* [6], обладающую необходимыми характеристиками для эффективного выполнения данной функции и представляющую собой двухкаскадный ограничитель, изготовленный по технологии изготовления диодов и переключателей на основе арсенида галлия GaAs. Работает в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц, обеспечивает защиту приемника от сигналов с мощностью до 5 Вт, имеет низкие вносимые потери (< 1 дБ) при работе со слабыми сигналами и низкий уровень просачивающейся мощности (< 18 дБм) при работе с высоким уровнем входного сигнала. Данная микросхема идеально подходит для различных систем, требующих защиты входа и чувствительных компонентов канала приема.

Чтобы достичь нужного коэффициента передачи, используется многоступенчатая структура приемного тракта. В этой структуре усилители соединяются друг с другом последовательно или покаскадно. Каждый каскад в данной системе выполняет функцию усиления входящего сигнала, и данная характеристика выражается через коэффициент усиления каскада. Следует подчеркнуть, что каждый каскад устройства, подобно любому активному радиоэлектронному компоненту, генерирует собственный уровень шума. Этот шум количественно определяется через коэффициент шума [7], который является ключевым параметром для оценки качества работы каскада:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}},$$

где  $F$  – общий коэффициент шума;  $F_1$  – коэффициент шума первого каскада;  $F_n$  – коэффициент шума  $n$ -го каскада;  $G_1$  – коэффициент усиления первого каскада;  $G_n$  – коэффициент усиления  $n$ -го каскада.

На основе анализа данной формулы можно сделать обоснованный вывод о доминирующем вкладе шума, генерируемого в первом каскаде усиления, в общий спектральный состав шума системы. Примечательно, что повышение коэффициента усиления данного каскада приводит к уменьшению суммарного уровня шума, что можно объяснить нега-

тивным воздействием нелинейных искажений и флюктуаций на этапе усиления.

Учитывая, что смесители, выполняющие функцию преобразования частоты, являются значительными источниками шума, оптимальным архитектурным решением представляется размещение первого каскада усиления перед этапом преобразования частоты, то есть в области несущей (высокой) частоты. Каскад, обладающий низким уровнем собственных шумов, классифицируется как малошумящий усилитель (МШУ), что делает его ключевым компонентом в минимизации шумовых характеристик системы. В качестве МШУ будем использовать микросхему QPA2609 фирмы *Qorvo* [8]. Эта микросхема – компактный высокопроизводительный МШУ, изготовленный по технологии псевдоморфных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов. Рабочий диапазон данного МШУ 7 – 14 ГГц, в котором он обеспечивает усиление малого сигнала 26 дБ при точке децибелльной компрессии в 18 дБм, поддерживая при этом коэффициент шума на уровне 1,1 дБ. Микросхема выполнена в небольшом пластиковом корпусе размером 4 × 4 мм, имеет волновое сопротивление входа и выхода 50 Ом и встроенную развязку по постоянному току по обоим портам для удобства и простоты системной интеграции.

Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) представляет собой ключевой элемент радиоприемных систем, обеспечивающий оптимальное усиление мощности принимаемого сигнала. Его основная функция заключается в доведении уровня сигнала до значений, необходимых для корректной работы последующих блоков обработки. Это позволяет значительно повысить чувствительность приемника и минимизировать влияние шумов и помех. УПЧ является неотъемлемой частью современных радиоприемников, так как его эффективность напрямую влияет на качество и надежность функционирования всей системы. В качестве УПЧ будем использовать микросхему PMA3-83LN+ фирмы *Mini-Circuits* [9], которая представляет собой широкополосную микроволновую монолитную интегральную схему (ММИС), сочетающую в себе уникальную комбинацию низкого коэффициента шума, высокого уровня точек пересечения интермодуляции третьего порядка и низкую неравномерность коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот. Данный усилитель идеально подходит для сверхширокополосных чувствительных приемников. Используемый УПЧ характеризуется коэффициентом усиления 22 дБ и коэффициентом шума в верхней части рабочего диапазона частот 1,5 дБ. Усилитель остается работоспособным при поступлении на вход сигнала мощностью до 200 мВт в импульсном и непрерывном режиме.

В процессе моделирования мы будем оперировать комплексными частотными характеристиками коэффициента передачи ( $S21$ ), коэффициента шума ( $F$ ), а также точек децибелльной компрессии и точек пересечения интермодуляции третьего порядка. Все эти параметры будут изменяться при стандартных климатических условиях, что позволит обеспечить сопоставимость и воспроизводимость результатов.

Для достижения высокой точности и надежности моделирования необходимо учитывать влияние внешних факторов на параметры устройства. Это особенно важно в условиях эксплуатации, где внешние параметры среды могут существенно варьироваться. Поэтому все измерения и расчеты будут проводиться в соответствии с установленными стандартами, что гарантирует достоверность полученных данных и их применимость в реальных условиях.

Раздел «Заголовки столбцов» файла данных будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Заполним столбцы в соответствии с технической документацией на микросхемы. Заполненный файл данных типа *Text* будет иметь вид, представленный на рис. 2.

FREQ (MHz)	NF (dB)	OIP3 (dBm)	OP1dB (dBm)	S21 (dB)	S21 (PHS, deg)
200	4.33	37.67	18.04	13.84	-73.9604600
300	2.40	33.86	17.25	18.80	-111.8602000
400	1.70	34.91	18.03	20.85	-143.1736000
500	1.51	34.65	18.90	21.61	-167.2454000
600	1.39	35.85	19.80	21.90	173.8184000
700	1.28	36.68	20.34	22.00	158.1241000
800	1.21	37.84	20.71	22.03	144.4236000
1000	1.19	37.89	21.19	22.04	120.4476000
1200	1.18	41.54	21.49	22.03	98.9727400
1400	1.25	39.67	21.70	22.01	78.8247800
1600	1.35	41.73	21.56	21.99	59.5082400
1800	1.33	41.15	21.59	21.96	40.7555200
2000	1.25	37.28	21.19	21.96	22.1846000
2200	1.33	36.02	20.87	21.93	3.8716190
2400	1.30	38.37	21.35	21.90	-14.2703100
2500	1.38	37.84	20.80	21.85	-23.2627000
2600	1.38	36.52	20.70	21.78	-32.2506500
2800	1.42	34.15	20.45	21.75	-49.9550900
3000	1.36	35.65	20.17	21.74	-67.4295200
3200	1.37	35.40	19.83	21.73	-84.9430900
3400	1.39	35.85	19.89	21.69	-102.6176000
3600	1.37	34.07	19.62	21.67	-120.2135000
3800	1.41	34.28	19.84	21.63	-137.7850000
4000	1.41	35.08	19.98	21.60	-155.4769000

FREQ (MHz)	NF (dB)	OIP3 (dBm)	OP1dB (dBm)	S21 (dB)	S21 (PHS, deg)
200	4.33	37.67	18.04	13.84	-73.9604600
300	2.40	33.86	17.25	18.80	-111.8602000
400	1.70	34.91	18.03	20.85	-143.1736000
500	1.51	34.65	18.90	21.61	-167.2454000
600	1.39	35.85	19.80	21.90	173.8184000
700	1.28	36.68	20.34	22.00	158.1241000
800	1.21	37.84	20.71	22.03	144.4236000
1000	1.19	37.89	21.19	22.04	120.4476000
1200	1.18	41.54	21.49	22.03	98.9727400
1400	1.25	39.67	21.70	22.01	78.8247800
1600	1.35	41.73	21.56	21.99	59.5082400
1800	1.33	41.15	21.59	21.96	40.7555200
2000	1.25	37.28	21.19	21.96	22.1846000
2200	1.33	36.02	20.87	21.93	3.8716190
2400	1.30	38.37	21.35	21.90	-14.2703100
2500	1.38	37.84	20.80	21.85	-23.2627000
2600	1.38	36.52	20.70	21.78	-32.2506500
2800	1.42	34.15	20.45	21.75	-49.9550900
3000	1.36	35.65	20.17	21.74	-67.4295200
3200	1.37	35.40	19.83	21.73	-84.9430900
3400	1.39	35.85	19.89	21.69	-102.6176000
3600	1.37	34.07	19.62	21.67	-120.2135000
3800	1.41	34.28	19.84	21.63	-137.7850000
4000	1.41	35.08	19.98	21.60	-155.4769000

Рис. 1. Формат раздела «Заголовки столбцов»

Рис. 2. Заполненный файл данных типа *Text* для микросхемы PMA3-83LN+

Проверим корректность созданного файла данных при помощи инструмента САПР *PlotCol*. Данный инструмент отображает столбцы реальных параметров микросхемы в виде графиков. По оси *X* отложим номера столбцов и значения этого столбца по оси *Y*. Все измерения имеют дополнительные параметры, которые позволяют указать конфигурацию графика и параметры развертки.

В качестве примера создадим график частотной зависимости коэффициента шума с названием PMA3-83test. Добавим измерение типа *Data*. В режиме инструмента САПР *PlotCol* выберем первый столбец, в который занесены частотные точки, осью *X*, а второй столбец, в который занесены значения коэффициента шума, осью *Y*. Запустим анализ, в результате которого на графике PMA3-83test отобразится график частотной зависимости коэффициента шума микросхемы усилителя PMA3-83LN+ (рис. 3).

Убедившись, что график частотной зависимости коэффициента шума совпадает с данными технической документации, аналогичным образом проверим корректность введенных данных точки децибелевой компрессии (рис. 4).

ской документации, аналогичным образом проверим корректность введенных данных точки децибелевой компрессии (рис. 4).

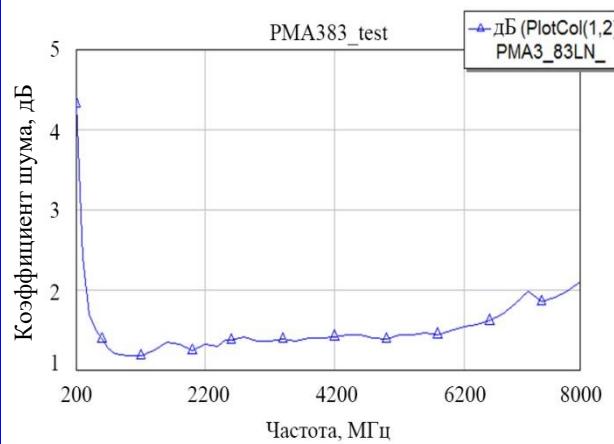
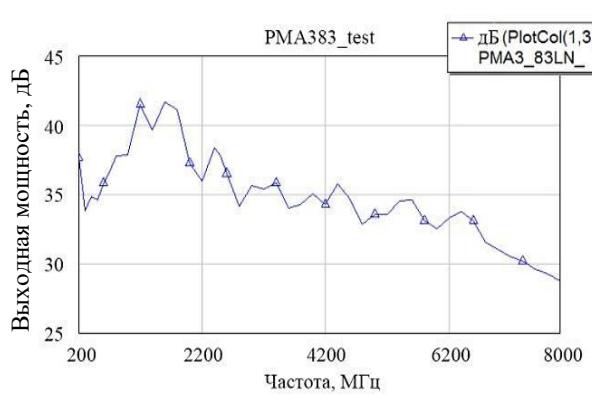
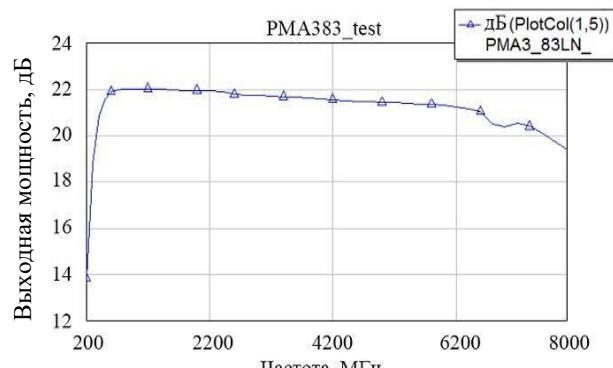


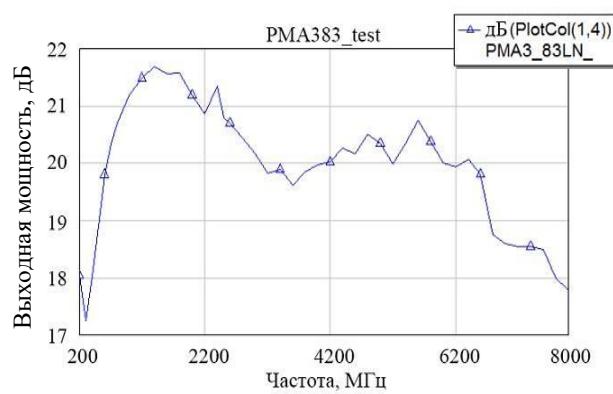
Рис. 3. График частотной зависимости коэффициента шума микросхемы усилителя PMA3-83LN+, построенный по файлу данных типа *Text*



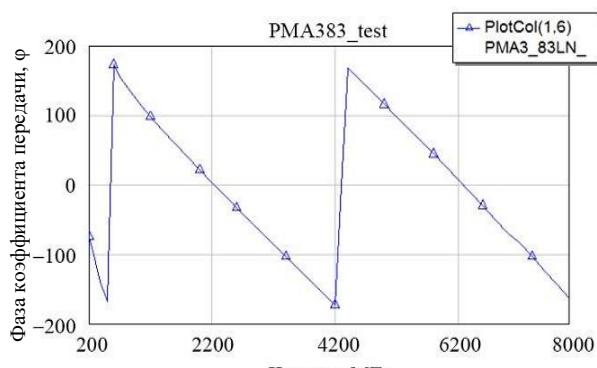
*а*



*б*



*б*



*в*

Рис. 4. Зависимость частоты от уровня выходной мощности устройства в точке пересечения третьего порядка (а), от границы линейности амплитудной характеристики устройства (б), от коэффициента передачи (в), от фазы коэффициента передачи микросхемы PMA3-83LN+ (г)

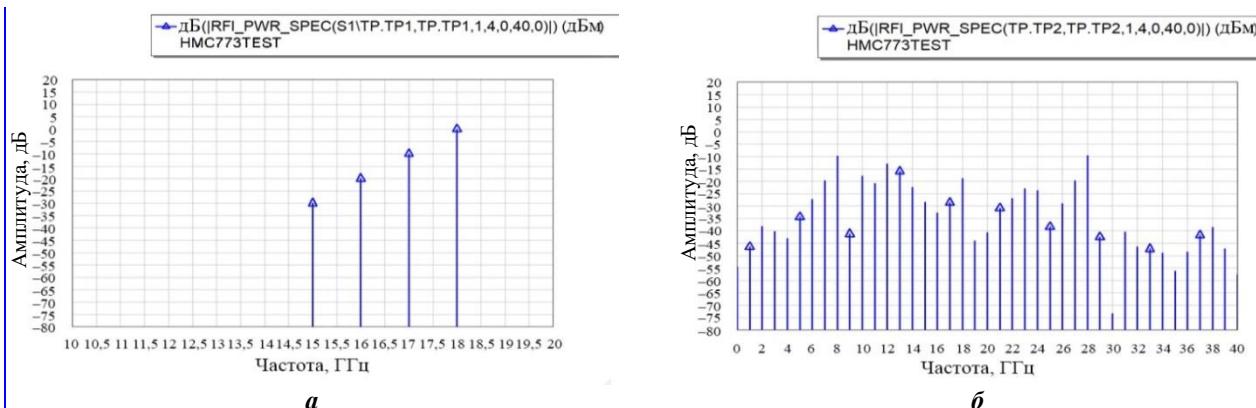


Рис. 5. Спектры входного (а) и выходного (б) сигналов, полученные при помощи инструмента системы автоматизированного проектирования *RF Inspector*

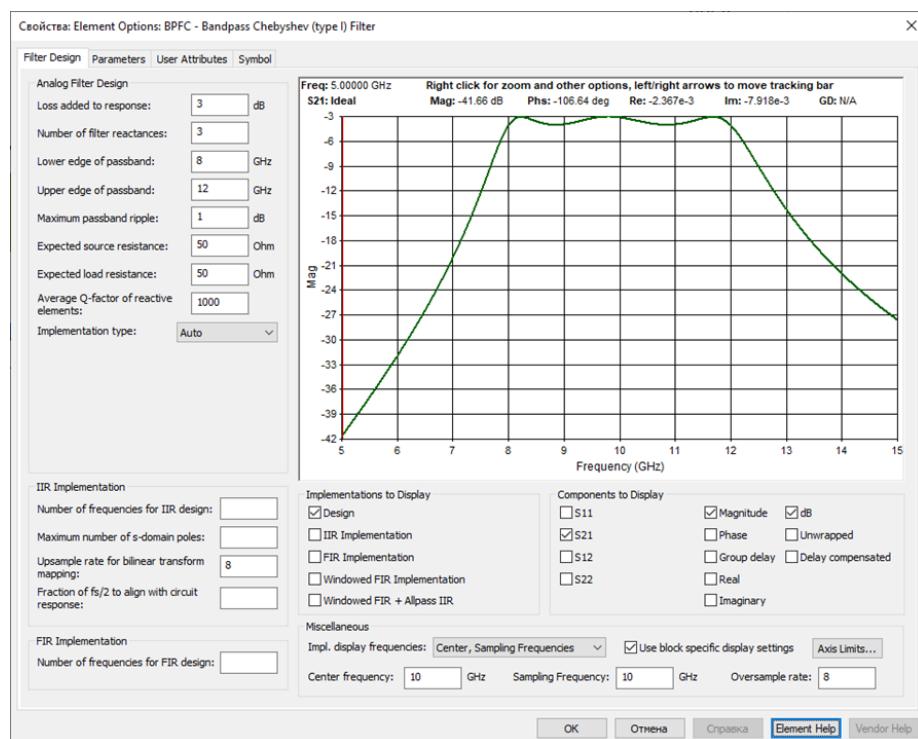


Рис. 6. Расчет характеристик диапазонного фильтра в окне *Filter Design* системы автоматизированного проектирования

При помощи инструмента САПР *RF Inspector* проверяем возможность переноса спектра сигнала (рис. 5).

### Моделирование приемного тракта радиофотонной радиолокационной системы с автоподстройкой частоты

Сигналы, соответствующие безопасному уровню, поступают на вход МШУ, который реализован на базе микросхемы QPA2609. Далее они направляются на вход диапазонного фильтра, предназначенного для селекции сигналов в рабочем диапазоне приемника.

Все модели фильтров являются библиотечным компонентом *Berkeley Packet Filter Compiler* (BPFC).

в САПР *AWR Design Environment*. Это линейный программный высокочастотный блок, поддерживающий функции моделирования фильтров в подпрограмме *Visual System Simulator* (VSS), предназначенный для системного проектирования и анализа систем связи и радиолокации.

Фильтры рассматриваются в нормальной прямой конфигурации: порт 1 действует как входной порт, а порт 2 действует как выходной порт.

Параметры фильтров рассчитаны при помощи подпрограммы САПР *Filter Design*. Эта подпрограмма используется для настройки фильтра. В его окне вводятся необходимые параметры и отображаются различные характеристики фильтра (рис. 6).

Сигналы, генерируемые диапазонным фильтром, поступают на смесители первого преобразования, где подвергаются нелинейному взаимодействию с сигналом гетеродина. В результате данного взаимодействия осуществляется перенос спектра исходного сигнала в область частот первой промежуточной частоты. Этот процесс, основанный на принципах супергетеродинного преобразования, является ключевым этапом в спектральной обработке радиосигналов и позволяет эффективно осуществлять фильтрацию и демодуляцию высокочастотных сигналов. Выделенная рабочая частота затем подвергается селекции посредством селектора первой промежуточной частоты, который функционирует на основе модели устройства. Селектор обладает свойством динамического изменения полосы пропускания, что достигается посредством сложных математических алгоритмов, адаптирующихся к рабочей частоте, обеспечивая тем самым высокую точность и гибкость в обработке сигнала.

Проверим работу модели приемного устройства при помощи инструмента *RF Inspector*. Установим частоту от цели сигнала. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

Анализ модели при помощи инструмента *RF Inspector* показал корректность переноса частоты, перестройки частотных селекторов и расчета комбинационных составляющих.

На рис. 7, *а* и *б*, приведены основные характеристики приемного и передающего трактов, полученные при помощи инструмента *RF Budget Analysis*.

Из представленных на рис. 7 результатов расчета можно заключить, что приемный тракт обладает коэффициентом передачи 30 дБ, при неравномерности 3 дБ, имеет коэффициент шума не более 5 дБ, динамический диапазон свободный от паразитных составляющих 40 дБ и обладает уровнем точки децибелевой компрессии выходного сигнала 15 дБм, а коэффициент передачи передающего тракта составляет не менее 38 дБ при неравномерности 3 дБ.

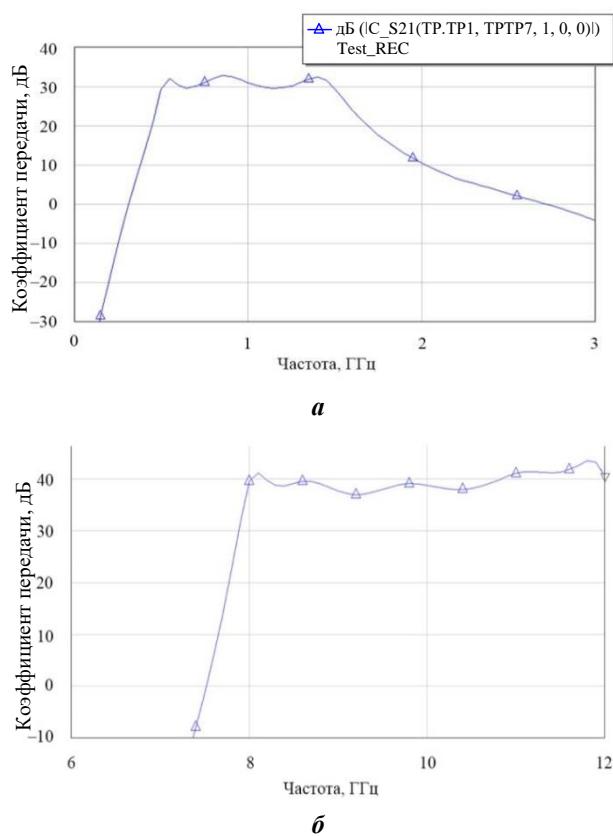


Рис. 7. Коэффициент передачи приемного (а) и передающего трактов (б)

### Заключение

В ходе моделирования оптоволоконных трактов радиоприемных и радиопередающих, основываясь на обзоре наиболее часто используемых способов построений высокочастотных трактов с использованием радиофотонных технологий и проведенном анализе выделены общие компоненты схем, реализация которых в радиофотонных технологиях имеет наиболее перспективное развитие.

Данные наработки могут использоваться в системах радионавигации и связи [10, 11], радиолокационных станциях [12, 13].

### Список источников

1. Белоусов А. А., Дубровская А. А. Применение методов и средств радиофотоники в системах связи, РЛС и системах РЭБ и РЭП // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 1. С. 181–184.
2. Фотонная технология как способ совершенствования ключевых технических показателей устройств задержки радиосигналов / Т. Н. Бахвалова [и др.] // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3 (17). С. 4–21.
3. Радиофотонный тракт сигналов промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы / И. Н. Ростокин [и др.] // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 2. С. 44–54.
4. Ridgway W. R., Dohrman C. L., Joshua A. C. Microwave photonics programs at DARPA // Journal of Lightwave Technology. 2014. Vol. 32. P. 3428–3439. DOI : 10.1109/JLT.2014.2326395.
5. Эволюция радиофотоники и перспективы ее применения в радиолокации / Н. А. Голов [и др.] // РТИ Системы ВКО – 2017 : Труды V Всероссийской научно-технической конференции. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 292–320.
6. Qorvo : [сайт]. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGL2208-SM> (дата обращения: 05.09.2025).

7. Джоэль П. Дансмор Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М. : Техносфера, 2019. 736 с.
8. Унченко И. В., Легкий Т. Н. Улучшение характеристик приемо-передающих устройств систем радиосвязи / Успехи современной радиоэлектроники. 2025. Т. 79. № 6. С. 57–65.
9. Mini-Circuits : [сайт]. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PMA3-83LN+> (дата обращения: 05.09.2025).
10. Белов Л. А., Щербинин А. Д. Радиофотоника в задачах спутниковой навигации и связи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 3. С. 28–42.
11. Быстров Р. П., Соколов С. А., Черепенин В. А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 2.
12. Патент на изобретение № 2827741C1 Российская Федерация. Радиофотонный фазовый пеленгатор : заявл. 28.02.2024 : опубл. 01.10.2024 / Н. М. Легкий, И. В. Унченко, А. А. Емельянов, С. С. Ким, А. В. Смыцкий. Бюл. № 28. 10 с.
13. Легкий Н. М., Унченко И. В. Математическое моделирование сверхвысокочастотных каналов полуактивной радиолокационной головки самонаведения // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 2. С. 48–56.

### References

1. Belousov A. A., Dubrovskaya A. A. Application of methods and means of radiophotonics in communication systems, radars and electronic warfare and RAP systems // Young Russia: advanced technologies are being introduced into industry. 2013. № 1. P. 181–184.
2. Photonic technology as a way to improve key technical indicators of radio signal delay devices / T. N. Bakhvalova [et al.] // Russian Journal of Technology. 2017. Vol. 5. № 3 (17). P. 4–21.
3. Radiophoton path of intermediate frequency signals of a multi-frequency microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere / I. N. Rostokin [et al.] // Electronics, photonics and cyberphysical systems. 2023. Vol. 3. № 2. P. 44–54.
4. Ridgway W. R., Dohrman C. L., Joshua A. C. Microwave photonics programs at DARPA // Journal of Lightwave Technology. 2014. Т. 32. P. 3428–3439. DOI : 10.1109/JLT.2014.2326395.
5. Evolution of radiophotonics and prospects for its application in radar / N. A. Golov [et al.] // RTI Systems of East Kazakhstan Region – 2017 : Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference. М. : Bauman Moscow State Technical University, 2018. P. 292–320.
6. Qorvo : [website]. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGL2208-SM> (date of access: 05.09.2025).
7. Joel P. Dunsmore Engineer's Handbook. Measurements of parameters of microwave devices using advanced vector circuit analysis techniques. М. : Technosphere, 2019. 736 p.
8. Unchenko I. V., Ligki N. M. Improving the characteristics of receiving and transmitting devices of radio communication systems / Successes of modern radio electronics. 2025. Vol. 79. № 6. P. 57–65.
9. Mini-Circuits : [website]. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PMA3-83LN+> (date of access: 05.09.2025).
10. Belov L. A., Shcherbinin A. D. Radiophotonics in satellite navigation and communications problems // Synchronization, signal generation and processing systems. 2018. Vol. 9. № 3. P. 28–42.
11. Bystrov R. P., Sokolov S. A., Cherepenin V. A. Systems and devices based on radiophotonics in relation to radar // Journal of Radio Electronics. 2017. № 6. P. 2.
12. Patent for invention No. 2827741C1 Russian Federation. Radiophoton phase direction finder : application. 02/28/2024 : published. 10/01/2024 / N. M. Light, I. V. Unchenko, A. A. Yemelyanov, S. S. Kim, A. V. Smyatsky. Byul. № 28. 10 p.
13. Ligki N. M., Unchenko I. V. Mathematical modeling of ultra-high-frequency channels of a semi-active radar homing head // Russian Technological Journal. 2024. Vol. 12. № 2. P. 48–56.

Поступила в редакцию 10.09.2025

The article was submitted 10.09.2025

### Информация об авторах

**Сергей Николаевич Замуруев** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем и комплексов РТУ МИРЭА;

**Николай Михайлович Легкий** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов РТУ МИРЭА, ORCID: 0000-0003-1242-5113, e-mail: [legki@mirea.ru](mailto:legki@mirea.ru);

**Иван Владимирович Унченко** – начальник отдела по разработке аппаратных средств НТЦ «Наука» РТУ МИРЭА, ORCID: 0000-0002-6048-3476, e-mail: [Unchenko@mirea.ru](mailto:Unchenko@mirea.ru);

**Евгений Сергеевич Тюренков** – аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов РТУ МИРЭА, e-mail: [5162436@rambler.ru](mailto:5162436@rambler.ru);

**Василий Игоревич Нерушев** – аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов РТУ МИРЭА, инженер АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», т. 8 (991) 607-53-14, e-mail: [genbilenko@mail.ru](mailto:genbilenko@mail.ru).

### Information about the authors

- Sergey Nikolaevich Zamuruev** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA;
- Nikolai Mikhailovich Legki** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA, ORCID: 0000-0003-1242-5113, e-mail: legki@mirea.ru;
- Ivan Vladimirovich Unchenko** – Head of the Hardware Development Department of the Scientific and Technical Center «Nauka» RTU MIREA, ORCID: 0000-0002-6048-3476, e-mail: Unchenko@mirea.ru;
- Evgeny Sergeevich Tyurenkov** – Postgraduate Student at the Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA, e-mail: 5162436@rambler.ru;
- Vasily Igorevich Nerushev** – Postgraduate Student at the Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA, Engineer of JSC “Concern VKO “Almaz-Antey”, t. 8 (991) 607-53-14, e-mail: genbilenko@mail.ru.