

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

УДК 621.396

Квачев Максим Александрович

**Повышение быстродействия обработки
сверхширокополосных сигналов главного тракта
приема в реализации системы на кристалле**

Специальность 2.2.13 —

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Завьялов Сергей Анатольевич

Оглавление

Стр.

Введение	5
Глава 1. Анализ современных трактов приема сверхширокополосных сигналов	9
1.1 Структуры современных сверхширокополосных приемных трактов	9
1.1.1 Супергетеродинные приемники	10
1.1.2 Приемники прямого преобразования	11
1.1.3 Приемник измерения мгновенной частоты (IFM)	11
1.1.4 Приемник прямого счета	14
1.1.5 Компрессионный приемник (Compressive sensing)	15
1.1.6 Прочие и гибридные виды приемников	15
1.1.7 Выводы по разделу	15
1.2 Особенности реализации систем оценки частоты в интегральном исполнении	16
1.2.1 Компенсация (эквализация) ослабления линии задержки	16
1.2.2 Применение искусственных линий задержки	16
1.3 Динамический диапазон сверхширокополосных интегральных систем	17
1.3.1 Динамический диапазон главного тракта приема (RF Frontend)	17
1.4 Принципы и методы оценки быстродействия сверхширокополосных систем	17
1.4.1 Понятие быстродействия, метрика и т.п.	17
1.5 Принципы действия и характеристики современных трактов приема сверхширокополосных импульсных сигналов	17
1.6 Главный тракт приема сверхширокополосных сигналов с точки зрения назначения и применения	17
1.6.1 Высокоскоростные сети обмена информацией	18
1.6.2 Низкоскоростные сети (Сети датчиков, сенсоров или вещей)	18

1.6.3	Устройства распознавания образов	18
1.6.4	Устройства определения параметров объектов (Радары)	18
1.7	Выводы по разделу	19
Глава 2. Компоненты приемников МИЧ, методы улучшения ключевых характеристик		20
2.1	Анализ современных методов построения сверхширокополосных малошумящих усилителей	20
2.1.1	Источники возникновения шумов в полупроводниковых устройствах	21
2.1.2	Принцип действия широкополосного малошумящего усилителя	21
2.1.3	Входное согласование по мощности	21
2.1.4	Первый каскад МШУ	22
2.1.5	МШУ с дифференциальным выходом	23
2.1.6	Возникновение и методы снижения влияния нелинейных эффектов	23
2.2	Усилитель-ограничитель	23
2.3	Усилитель с регулировкой коэффициента усиления	23
2.4	Широкополосный фазовращатель	23
2.5	Сверхширокополосные смесители	23
2.5.1	Сверхширокополосные смесители в интегральном исполнении	23
2.5.2	Шумы в полупроводниковых смесителях	23
2.6	Фильтры промежуточной частоты	23
2.7	Аналого-цифровые преобразователи для задач МИЧ	23
2.8	Выводы по разделу	23
Глава 3. Схемотехнический расчет СФ-блоков		24
3.1	Устройство выборки-хранения	24
3.2	Выводы по разделу	24
Заключение		33
Список сокращений и условных обозначений		34

Словарь терминов	35
Список литературы	36
Список рисунков	39
Список таблиц	41

Введение

Системы работающие с сверхширокополосными (СШП) сигналами в последние годы вызывают все больший интерес и получили большое распространение за пределами продукции военного и специального назначения. Это вызвано развитием интегральной электроники и постепенным освоением нелицензируемых диапазонов 22–27, 63–64 и 76–81 ГГц для реализации автомобильных радаров ближнего и дальнего действия. Помимо радаров помощи водителю (пилота) системы с СШП находят применение в системах контроля состояния водителя и пассажиров, за счет дополнительной обработки и выявления периодичности радиолокационной картины, определяют наличие и характер дыхания, а также частоту сердечных сокращений. Интерес к системам связи работающих на базе сверхширокополосных сигналов возрастает на фоне ограниченности частотных ресурсов сегодняшних беспроводных сетей. Системы с использованием сверхширокополосных сигналов позволяют обеспечивать высокую скорость передачи данных соседствуя с существующими системами связи, за счет расширенного спектра сигнала и малой излучаемой мощности.

Быстродействие обработки сигналов главного тракта приема сверхширокополосных сигналов является критичной характеристикой всего приемного устройства, так как от него зависит общая пригодность устройства к защите пассажиров, водителя, пилота или беспилотного аппарата и т.п. от внешних угроз. Также работа сверхширокополосного приемника сопровождается сложной электромагнитной обстановкой, например, большое разнообразие радаров и видов сигналов которые они используют, передатчики установленные на той же платформе что и сверхширокополосный приемник, которые могут полностью подавлять прием других сигналов.

Решением задач разработки сверхширокополосных приемных трактов и систем для задач радиолокации, радиопеленгации и распознавания образов, занимается ряд отечественных и зарубежных компаний, таких как «Northrop Grumman Corp.», «BAE Systems», «Lockheed Martin» и «АО ЦКБА», а также такие исследователи как James B. Tsui, Schmidt O. Ralph, Аткишкин С., Сапожников Д., Подстригаев А. С., Василенко В. Э. и др.

Важность исследований, связанных с разработкой интегрированных в системы-на-кристалле (СнК) сверхширокополосных приемных трактов мгновенного измерения частоты (МИЧ), подтверждается необходимостью большей микроминиатюризации существующих устройств с использованием преимуществ высокоинтегрированных систем, т. е. возможность выполнения сложной цифровой обработки сигналов (ЦОС) в непосредственной близости от радиоприемного тракта, что уменьшает количество высокоскоростных линий передачи данных в итоговом устройстве и общую сложность системы. Помимо вышеперечисленного, интеграция системы приема сверхширокополосных сигналов в СнК позволяет снизить энергопотребление, а также ускорить процесс разработки и облегчить процесс обеспечения электромагнитной совместимости внутри устройства между блоками.

Этот абзац появляется только в диссертации. Через проверку условия `\ifsynopsis`, задаваемого в основном файле документа (`dissertation.tex` для диссертации), можно сделать новую команду, обеспечивающую появление цитаты в диссертации, но не в автореферате.

Целью данной работы является исследование и разработка ряда приемных трактов сверхширокополосных сигналов в диапазоне 1–40 ГГц, для задач пассивной радиолокации, радиоэлектронной поддержки летательных и транспортных средств, в реализации системы на кристалле или системы в корпусе. Целью данной работы является формирование ряда методов проектирования многоканальных сверхширокополосных трактов приема сверхкоротких импульсов в интегральном исполнении, позволяющих снизить затраты на проектирование, отладку и производство.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать современные структуры приемных трактов, повышения быстродействия в реализации систем на кристалле или систем в корпусе;
2. Исследовать методы проектирования гибридных приемников измерения частоты в реализациях систем на кристалле с малой потребляемой мощностью и минимизацией по площади;

3. Разработать математическую модель тракта приема СШП сигналов с учетом паразитных эффектов оказывающих влияние в интегральном исполнении.

Научная новизна:

1. Впервые ...
2. Впервые ...
3. Было выполнено оригинальное исследование ...

Практическая значимость ...

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач применяются методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, математического анализа, вычислительной математики, применяются специализированные системы моделирования, автоматизированного проектирования, а также математические пакеты с функциями численных методов решения уравнений и оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Первое положение
2. Второе положение
3. Третье положение
4. Четвертое положение

В папке Documents можно ознакомиться с решением совета из Томского ГУ (в файле `Def_positions.pdf`), где обоснованно даются рекомендации по формулировкам защищаемых положений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием математического аппарата и современных пакетов компьютерного моделирования Cadence, ADS Systems, Empire с использованием адекватных моделей полупроводниковых элементов представляемых производителями, а также результатами измерений опытных образцов с использованием установки зондовых измерений MPI TS200. Экспериментальные исследования продемонстрировали соответствие разработанных моделей действительности. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами. Также достоверность подтверждается выступлениями на международных конференциях IEEE и наличием актов внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международной конференции Динамика механизмов и машин, все-

русской научно-практической конференции СВЧ-2022, перечисление основных конференций, симпозиумов и т. п.

Личный вклад. Все изложенные в диссертации исследования выполнены непосредственно ее автором. Из публикаций, написанных в соавторстве, в диссертацию включен лишь тот материал, который принадлежит непосредственно соискателю. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту и составляющие научную новизну работы, получены лично автором, в том числе выбор методик исследований, разработку алгоритмов программных решений, проведение измерений полученных образцов и обработку экспериментальных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 4 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 1 патент и 1 программа для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 0 приложений. Полный объем диссертации составляет 41 страницу, включая 21 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 23 наименования.

Глава 1. Анализ современных трактов приема сверхширокополосных сигналов

Современные тракты приемопередающих устройств сверхширокополосных сигналов широко распространены не только в сфере радиоэлектронной борьбы и разведки, но и в гражданском сегменте. Например, любой современный автомобиль снабжается системами мониторинга дорожной обстановки, помощи водителю и контроля состояния водителя, а также пассажиров. Во многих коммуникационных системах возникает необходимость в определении номера занятого канала (быстрого определения несущей частоты) и т. п.

Все перечисленные секторы применения электронных устройств, работающих с сверхширокополосными сигналами, объединяет важный аспект, область их применения практически всегда связана с безопасностью человека, поэтому критическим параметром для подобных систем всегда остается быстродействие и низкая вероятность пропуска или ложной тревоги.

Интерес к сверхширокополосным системам растет также благодаря надежде на достижение высоких скоростей обмена информацией по сверхширокополосным беспроводным каналам связи, которые к тому же расположены в нелицензируемых диапазонах частот.

В рамках данной главы будут рассмотрены структуры трактов приемников сверхширокополосных сигналов применяемые в радарах, пеленгаторах и пассивных локахторах.

Сверхширокополосные системы передачи данных находят все более широкое применение [1], [2], [3], [4] в области медицины [5-7], организации корпоративных и производственных сетей датчиков [8-10], а также [11,12] и [13]...

1.1 Структуры современных сверхширокополосных приемных трактов

Для начала следует дать определение сверхширокополосных сигналов как таковых, что принципиально отличает их от узкополосных сигналов.

Сверхширокополосным сигналом называется сигнал, обладающий шириной спектра больше 500 МГц (условно для диапазона частот от 3.1 ГГц до 10.6 ГГц) или же спектральные свойства которого удовлетворяет условию:

$$\frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L)/2} \geq 0.25,$$

где f_H и f_L – верхняя и нижняя границы спектра в пределах которых сконцентрировано не менее 90% энергии сигнала соответственно.

Если при рассмотрении сверхширокополосных сигналов не учитывать время накопления или обработки сигналов, то под понятие сверхширокополосных также попадают сигналы с линейной частотной модуляцией, которые по своей природе таковыми не являются и представляют собой узкополосные сигналы (Ширина спектра порядка нескольких десятков мегагерц) линейно перестраиваемые по частоте. Потому можно выделить две группы сверхширокополосных сигналов, методы приема и обработки которых кардинально различаются.

Проведен аналитический обзор существующих патентов и коммерческих продуктов с целью создания полноценной классификации существующих систем приема сверхширокополосных сигналов, а также методов повышения быстродействия и помехоустойчивости [5], [6–8], [9–21].

Предложена классификация способов оценки частоты применяемых в современных приемниках индексации частоты, приведенная на рисунке 1.1.

1.1.1 Супергетеродинные приемники

Приемники оценки частоты построенные согласно супергетеродинной схеме обладают высокой избирательностью и динамическим диапазоном, что позволяет с высокой точностью $[[,]]$ определять частоту сигнала и выполнять идентификацию источника излучения.

Структурная схема супергетеродинного приемника оценки частоты представлена на рисунке 1.2.

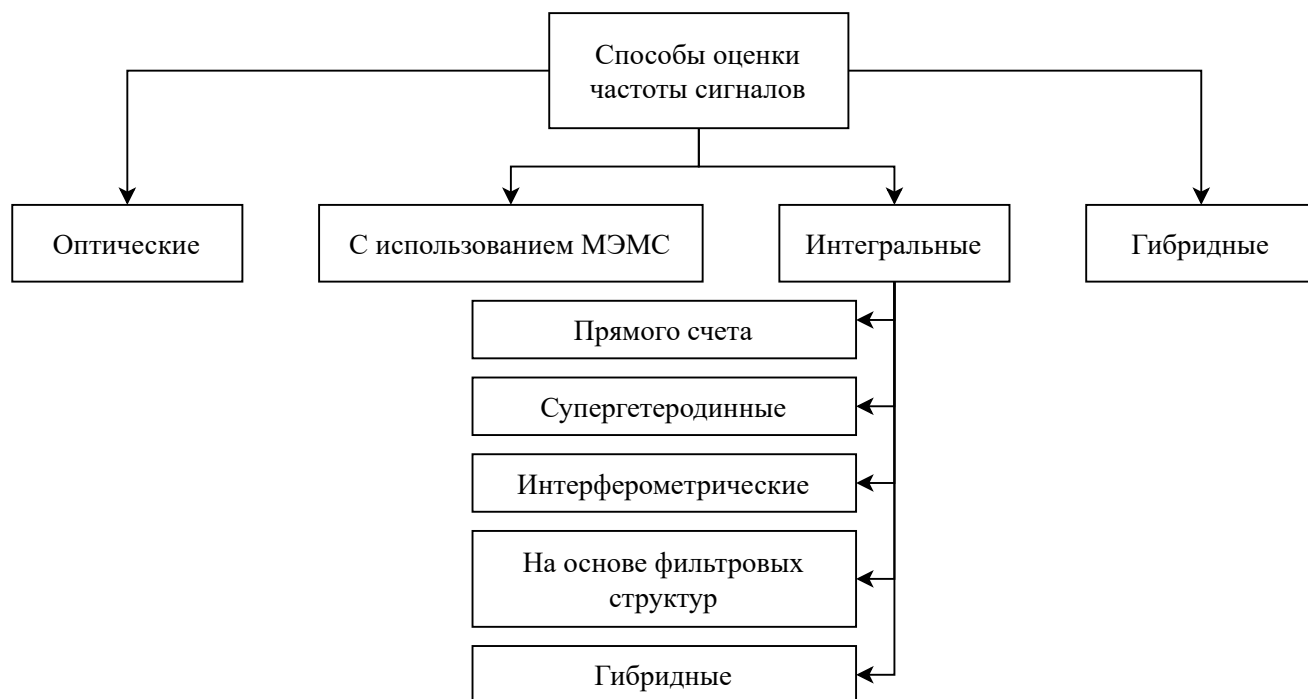


Рисунок 1.1 — Классификация способов оценки частоты сверхкоротких импульсов – pdf_tex

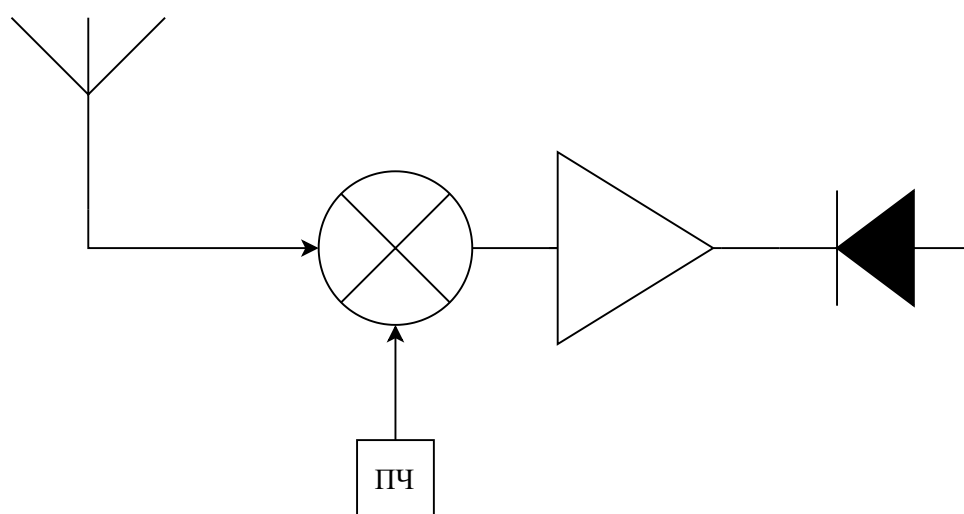


Рисунок 1.2 — Структурная схема супергетеродинного приемника

1.1.2 Приемники прямого преобразования

1.1.3 Приемник измерения мгновенной частоты (IFM)

Типичная структурная схема приемника измерения (оценки) частоты представлена на рисунке ???. Так как в настоящее время большинство устройств обработки данных принимают данные исключительно в цифро-

вом виде, в данном разделе не будут рассмотрены схемы с аналоговым видеовыходом.

Измерение частоты в приемнике измерения мгновенной частоты происходит на основе задерживания сигнала в линии задержки (аналоговых электрических, цифровых, оптических) и частотной зависимости разницы фаз задержанного и незадержанного сигналов. Разница фаз вызванная прохождением сигнала через линию задержки описывается выражением (1.1).

$$\theta = \omega\tau, \quad (1.1)$$

где ω и τ - частота сигнала и величина линии задержки соответственно.

Для оценки частоты сигнала согласно выражению (1.1) с известной величиной линии задержки, необходимо измерить разницу фаз сигналов. Для измерения разницы фаз сигналов удобно на выходе приемника представить сигнал в аналитической форме вида $s(t) = \cos \theta + j \sin \theta$. Таким образом, выходные сигналы приемника представляются как

$$\begin{aligned} Q &= A \sin \theta, \\ I &= A \cos \theta. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Зная величины квадратурных выходных сигналов приемника Q и I , используя (1.3) определяем значение аргумента обоих сигналов.

$$\theta = \arctan(Q/I) = \omega\tau \quad (1.3)$$

В соответствии с (1.3) находим оценку частоты сигнала как

$$\omega = \frac{\theta}{2\pi\tau}. \quad (1.4)$$

Зависимость оценки частоты сигнала от частоты входного сигнала представлена на рисунке 1.3. Как можно видеть функция имеет периодический характер и прямо пропорционально зависит от величины задержки τ (На рисунке 1.3 задержка τ имеет значение 400 пс, что соответствует максимальной индексируемой частоте $f_{max} = 2.5$ ГГц).

Основной проблемой возникающей при использовании приемников МИЧ, является работа при множестве сигналов на входе (два и более). Так как при воздействии на частотный дискриминатор более чем одного

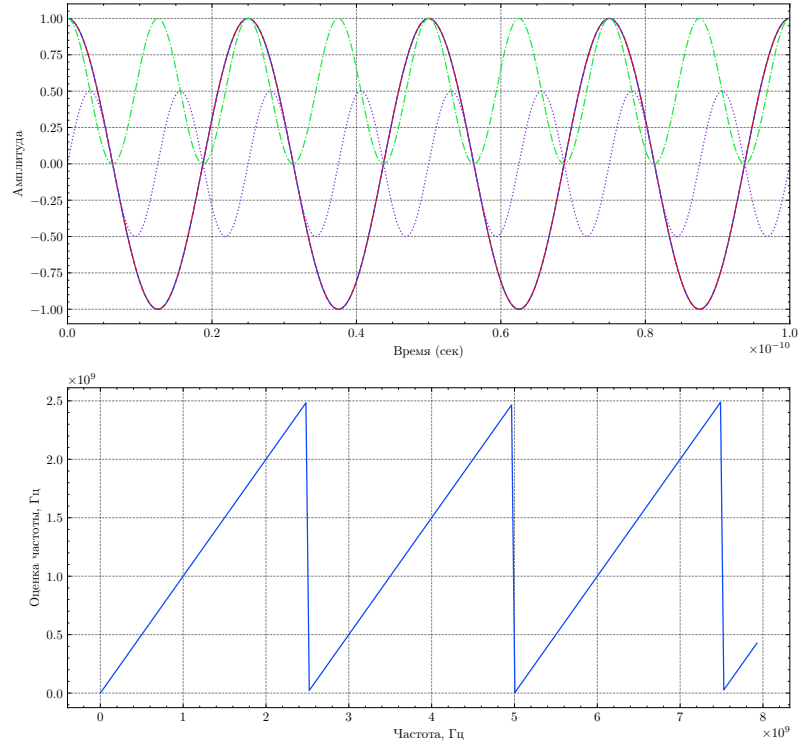


Рисунок 1.3 — Выходные сигналы частотного дискриминатора во временной и частотной областях

сигнала, фазовый сдвиг оцениваемый устройством перестает быть показательным и теряет связь со значением несущей частоты сигналов на входе.

Одним из решений проблемы множественного воздействия на вход приемника, в работе [22], [23], были представлены структуры многоканальных приемников МИЧ. Разделение на каналы позволяло работать с несколькими сигналами одновременно, однако при этом увеличивается сложность структуры, массо-габаритные характеристики, время проектирования, энергопотребление.

ФРАГМЕНТ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИСКРИМИНАТОРА С КОМПАРАТОРОМ

Выходное напряжение на выходе дискриминатора описывается выражением

$$V_q = \sin 2\pi f\tau_1,$$

$$V_i = \cos 2\pi f\tau_1.$$

Так как функция $\sin x$ периодична и переходит через ноль с периодом π в точках $2f\tau_1 \in \mathbb{Z}$, возможно путем выбора длины линии задержки устанавливать необходимую частоту перехода дискриминационной характеристики через ноль. Таким образом, установив на выходе частотного

дискриминатора компаратор, можно идентифицировать и исключать зоны неоднозначности при оценке частоты в широком диапазоне частот.

Для устранения неоднозначности оценки частоты в широком диапазоне частот необходим правильный выбор величины линии задержки, т.к. при задерживании сигнала больше необходимого, дискриминационная характеристика V_s будет изменять знак более одного раза в рабочем диапазоне частот. Величина линии задержки выбирается таким образом, что

$$BW < \frac{1}{2\tau_1}.$$

1.1.4 Приемник прямого счета

Патент **US5337051** описывает систему оценки частоты сигналов на основе прямого счета изменений знака входного сигнала (Zero Crossing) и линейной аппроксимации момента времени в который сигнал приблизительно равен нулю. Структурная схема представлена на рисунке 1.4.

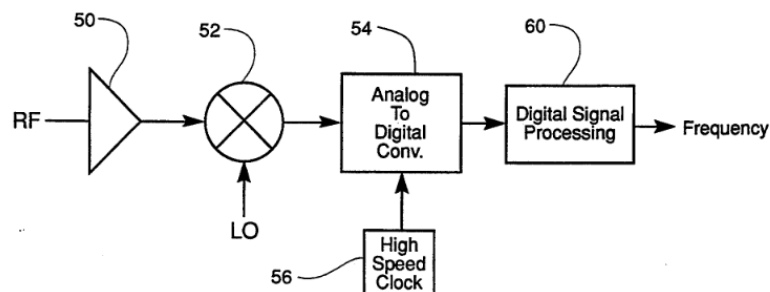


Рисунок 1.4 — Структурная схема частотного дискриминатора на основе счета пересечений нуля и линейной аппроксимации

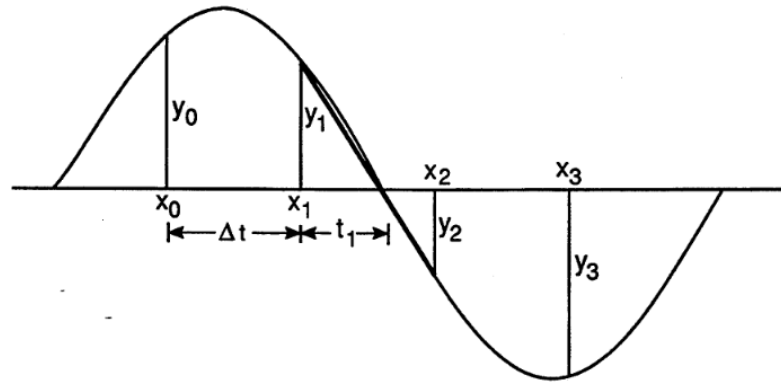


Рисунок 1.5 — Временная диаграмма, описывающая принцип работы частотного дискриминатора на основе счета пересечений нуля и линейной аппроксимации

Таблица 1 — Сравнение характеристик приемников измерения мгновенной частоты

	Супергетеродинный	Многоканальный	МИЧ	Компрессионный	Оптический	Детекторный
Ширина рабочей полосы	Хуже	Хорошо	Превосходно	Хорошо	Хорошо	Превосходно
Стойкость к множеству сигналов на входе	Хуже	Хорошо	Хуже	Хорошо	Хорошо	Хуже
Разрешение по частоте	Превосходно	Хорошо	Хорошо	Хорошо	Хорошо	Хуже
Чувствительность	Превосходно	Хорошо	Умеренно	Хорошо	Умеренно	—
Динамический диапазон	Превосходно	Хорошо	Умеренно	Умеренно	Хуже	Умеренно
Быстродействие	Умеренно	Умеренно	Превосходно	Хуже	Умеренно	Превосходно

1.1.5 Компрессионный приемник (Compressive sensing)

1.1.6 Прочие и гибридные виды приемников

1.1.7 Выводы по разделу

На основании проведенного анализа различных структур приемников измерения мгновенной частоты ... Результаты анализа сведены в таблицу 1, в которой отражены ключевые характеристики различных приемников.

1.2 Особенности реализации систем оценки частоты в интегральном исполнении

1.2.1 Компенсация (эквализация) ослабления линии задержки

Для компенсации ослабления вносимого пассивными компонентами применяются эквалайзеры, как пассивные так и активные. При реализации интегральной системы, компромисс между габаритами пассивного эквалайзера и потреблением активного, требует детального рассмотрения.

1.2.2 Применение искусственных линий задержки

Работ по применению искусственных линий задержек в сверхширокополосных системах на кристалле сравнительно немного. Исследованиями в данной области занимаются такие ученые как ...

Применение искусственных линий задержки обусловлено необходимостью уменьшения площади топологии микросхемы, избежание проблем с электромагнитной совместимостью, а также как будет показано в данном разделе для обеспечения необходимых частотных характеристик многоканальной системы.

Главным образом искусственной линией задержки называется такая структура из сосредоточенных или распределенных компонентов, которая в определенных условиях повторяет поведение физической линии передачи, например LC-звено на сосредоточенных элементах, в определенном диапазоне частот, соответствует с точки зрения вносимого сдвига фаз длиной коаксиальной или микрополосковой линии.

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z}$$

1.3 Динамический диапазон сверхширокополосных интегральных систем

1.3.1 Динамический диапазон главного тракта приема (RF Frontend)

1.4 Принципы и методы оценки быстродействия сверхширокополосных систем

1.4.1 Понятие быстродействия, метрика и т.п.

1.5 Принципы действия и характеристики современных трактов приема сверхширокополосных импульсных сигналов

1.6 Главный тракт приема сверхширокополосных сигналов с точки зрения назначения и применения

Главный тракт приема в радиочастотных системах выполняет функции преселекции и усиления сигналов в необходимой полосе частот. Из расположения главного тракта в структуре приемной аппаратуры и выполняемых функций становится очевидно его доминирующее влияние на производительность всей системы в целом.

Проблемы проектирования трактов приема сверхширокополосных сигналов в интегральном исполнении активно обсуждаются на протяжении последних X лет, такими авторами как ...

Наиболее широкое распространение получили приемопередатчики на основе сигналов с прямым расширением спектра, сигналов с псевдослучайной перестройкой по частоте, а также импульсное радио с скачками по времени. Из вышеперечисленных, большинство работ посвящено струк-

турам, работающим с импульсными сигналами, как схемам с наиболее выгодной практической реализацией. Импульсное радио позволяет получить приемлемую скорость передачи данных, возможность определения расстояния и местоположения объектов в пространстве, а также простую реализацию устройства с малым энергопотреблением [1], [2] и [3].

1.6.1 Высокоскоростные сети обмена информацией

1.6.2 Низкоскоростные сети (Сети датчиков, сенсоров или вещей)

1.6.3 Устройства распознавания образов

1.6.4 Устройства определения параметров объектов (Радары)

Приемники предназначенные для определения параметров принимаемых сигналов значительно отличаются от информационных приемников. Информационные приемники предназначены для восстановления информации передаваемой передатчиком. Приемники сигналов радаров не восстанавливают передаваемую информацию, а определяют такие характеристики сигнала, как ширина импульса, форма, частота, частота следования импульсов и угол прихода сигнала (Angle of Arrival).

Исходя из специфики выполняемых задач, подобные приемники должны удовлетворять следующим требованиям:

- Широкий частотный диапазон;
- Высокая чувствительность и динамический диапазон;
- Быстродействие обработки и идентификации характеристик принимаемых сигналов;
- Возможность обработки двух и более сигналов одновременно;

- Устойчивость к внешним воздействиям (Широкий температурный диапазон, высокая входная мощность, стойкость к ионизирующему излучению).

Следует также подчеркнуть причину по которой подходы к проектированию связанных сверхширокополосных приемников и приемников обнаружения сверхкоротких импульсов (а также оценки их характеристик) так сильно различаются. При проектировании связанного приемника и в целом приема-передающего тракта, параметры и характеристики передаваемых сигналов заранее определены, известны спектральные свойства сигналов несущих информацию. В то же время, проектирование приемника обнаружения сверхкоротких импульсов не может осуществляться по тем же методам, что и связанные, так как принимаемые сигналы заведомо неизвестны, отсутствует какая-либо синхронизация на приеме и передаче и самое важное, отсутствует цель как таковая прием информационных сообщений. Зондирующие импульсы радарных систем не несут в себе какой-либо информации, информацией для принимающей стороны является сам факт детектирования сигналов данного вида, определения их принадлежности, направления излучения.

1.7 Выводы по разделу

Глава 2. Компоненты приемников МИЧ, методы улучшения ключевых характеристик

2.1 Анализ современных методов построения сверхширокополосных малошумящих усилителей

Основными параметрами МШУ являются:

- Коэффициент шума;
- Коэффициент усиления;
- Точка одноцебельной компрессии;
- Точка интермодуляции (перехвата) третьего порядка;
- Потребляемая мощность.

Согласно формуле Фрииса (2.1) основной вклад в шумовую характеристику приемного тракта вносит первый усилительный каскад.

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_N - 1}{\prod_{N=1} G_N}, \quad (2.1)$$

где F_{total} – суммарный коэффициент шума приемного тракта, F_N – коэффициент шума N -го каскада, G_N – коэффициент усиления N -го каскада.

Из выражения (2.1) следует, что для удовлетворения требований к МШУ, перечисленных выше, необходимо снижать коэффициент шума каждого каскада при одновременном увеличении коэффициента усиления. Исходя из данного наблюдения возникает противоречие, т.к. для повышения коэффициента усиления необходимо увеличивать ток потребления усилителя. При увеличении коэффициента усиления, ухудшается линейность усилителя, следовательно, уменьшается динамический диапазон устройства. При попытке улучшить линейность усилителя, уменьшается коэффициент усиления каждого каскада, в следствии чего возрастает коэффициент шума.

Из-за подобной связности какого-либо параметра с любым другим практически не существует универсальных способов и схем, позволяющих разработать усилитель удовлетворяющий всем требуемым характеристикам технического задания.

2.1.1 Источники возникновения шумов в полупроводниковых устройствах

В данном разделе рассмотрим источники возникновения шума в полевых и биполярных транзисторах, а также методы снижения их вклада в общую шумовую картину.

Температурный шум (Thermal Noise)

Дробовый шум (Shot Noise)

$1/f$ Фликкер шум (Flicker Noise)

2.1.2 Принцип действия широкополосного малошумящего усилителя

2.1.3 Входное согласование по мощности

Качество входного согласования выражается в значении отраженной мощности или возвратных потерь, которые для входного сопротивления МШУ Z_{in} и сопротивления источника R_S определяются как (2.2)

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - R_S}{Z_{in} + R_S} \right|^2, \quad (2.2)$$

где Z_{in} – входное комплексное сопротивление МШУ.

С целью оптимизации входной цепи МШУ по наименьшему вкладу в общий коэффициент шума, Γ может не согласовываться с выходным сопротивлением источника. Таким образом, выбор рабочей точки Γ_{opt} должен

обеспечивать компромисс между вкладом в общую шумовую характеристику и согласованием по мощности.

2.1.4 Первый каскад МШУ

Так как основное влияние на шумовые характеристики оказывает первый каскад усиления, необходимо максимально снизить количество вносимых шумов цепями согласования, входным транзистором и т.п.

В качестве усилительного каскада могут применяться схемы включения транзистора:

- Общий эмиттер (общий исток);
- Общая база (общий затвор);
- Каскодная схема – общий эмиттер-общая база (общий исток-общий затвор).

При работе на частотах диапазона Ка (27 – 40 ГГц) и выше, каскодная схема и общая база используются реже из-за ухудшающихся шумовых характеристик и, в случае каскода, повышенной промежуточной емкостью в узле соединения двух транзисторов, что приводит к значительному ухудшению усилительных свойств каскада.

2.1.5 МШУ с дифференциальным выходом

2.1.6 Возникновение и методы снижения влияния нелинейных эффектов

2.2 Усилитель-ограничитель

2.3 Усилитель с регулировкой коэффициента усиления

2.4 Широкополосный фазовращатель

2.5 Сверхширокополосные смесители

2.5.1 Сверхширокополосные смесители в интегральном исполнении

2.5.2 Шумы в полупроводниковых смесителях

2.6 Фильтры промежуточной частоты

2.7 Аналого-цифровые преобразователи для задач МИЧ

2.8 Выводы по разделу

Глава 3. Схемотехнический расчет СФ-блоков

3.1 Устройство выборки-хранения

Определим мощность шумов квантования идеального АЦП с разрядностью N и размахом полной шкалы V_{FS}

$$P_q^2 = \frac{\Delta^2}{12}$$

если $\Delta = \frac{V_{FS}}{2^N}$, тогда $P_q^2 = 223.52 \text{ pW}$.

Технические требования к аналого-цифровому преобразователю

Характеристики приведены в Табл. 2.

Таблица 2 — Характеристики разрабатываемого АЦП

Параметр	Значение	Единица измерения
N	14	Бит
F_{clk}	250	МГц
V_{FS}	1.2	В
$V_{CM_{in}}$	600	мВ
$FPBW$ (Full Power Bandwidth)	750	МГц

УВХ построено на базе МОП ключа Q1 с цепью смещения напряжения затвора V_{gs1} , позволяющей снизить нелинейность ключа, возникающую из-за неполного «закрытия» или «открытия» канала.

3.2 Выводы по разделу

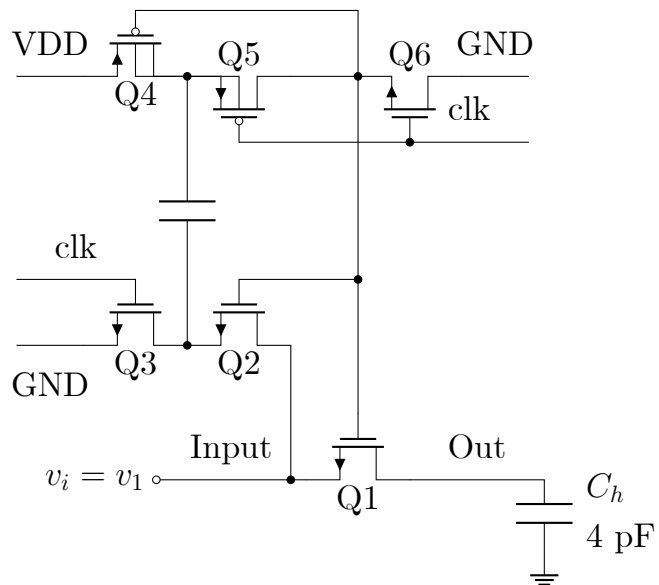


Рисунок 3.1 — Схема устройства выборки-хранения

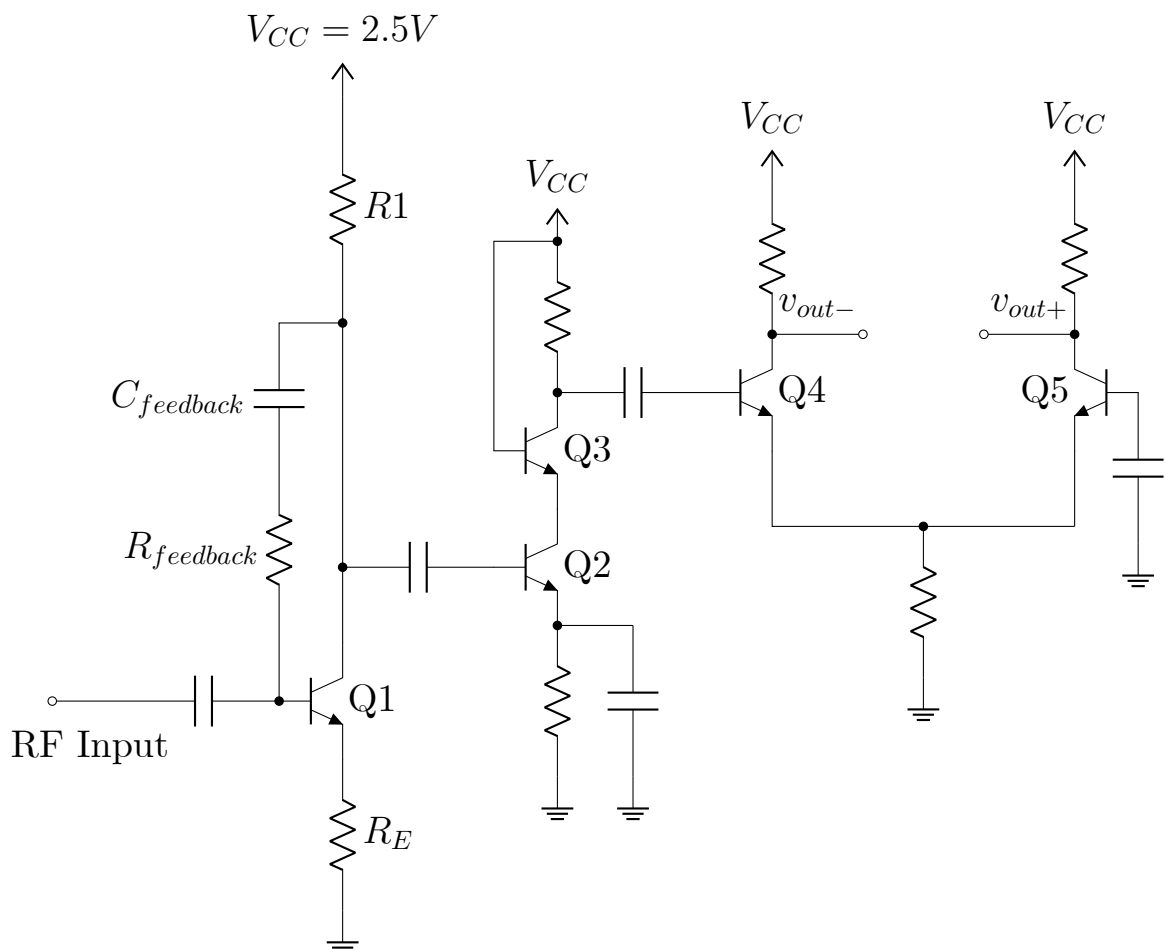


Рисунок 3.2 — Схема электрическая принципиальная рассматриваемого МШУ

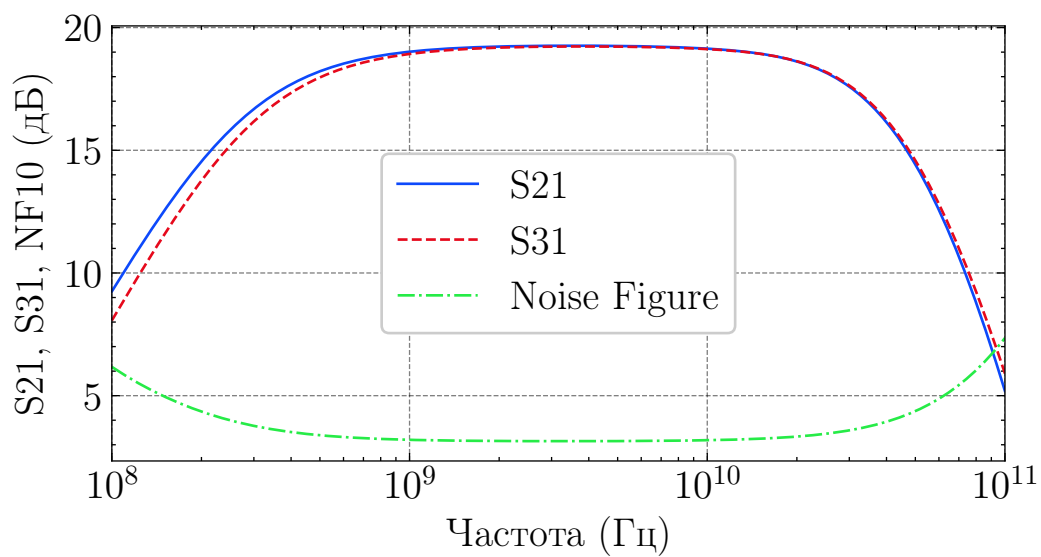


Рисунок 3.3 — Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования

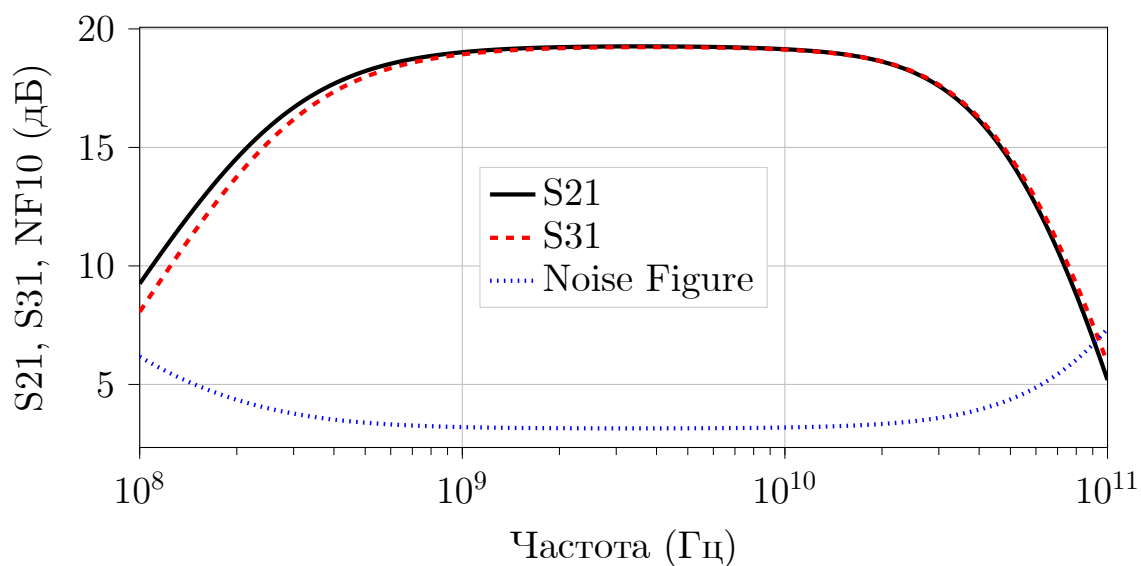


Рисунок 3.4 — Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования

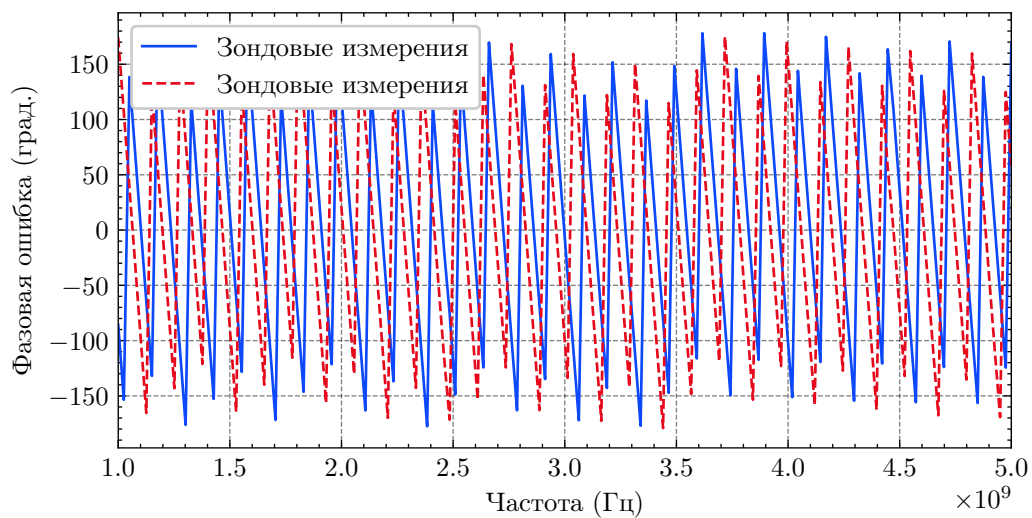


Рисунок 3.5 — Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ
согласно результатам моделирования

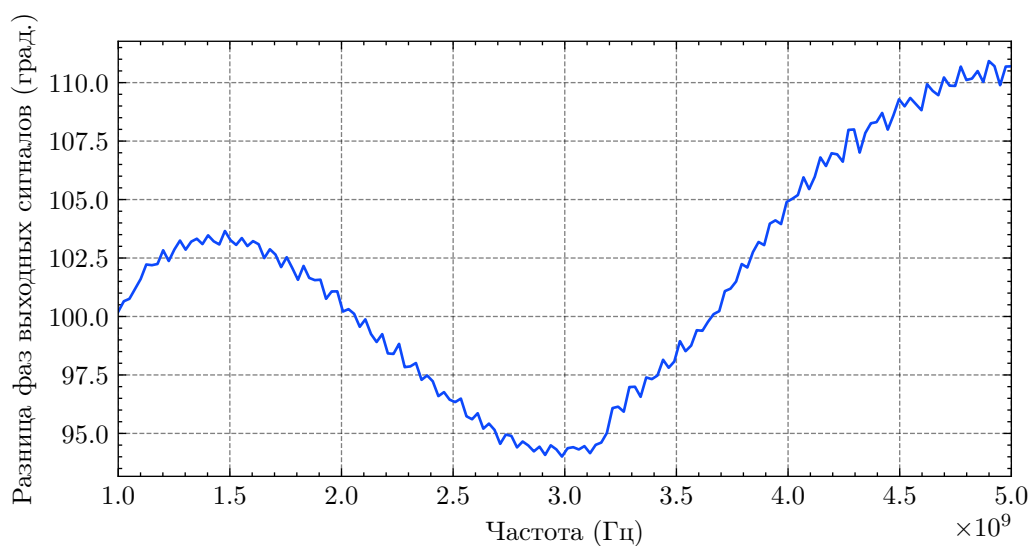


Рисунок 3.6 — Значение фазовой ошибки разработанного активного фазо-
вращателя 1 - 2 ГГц

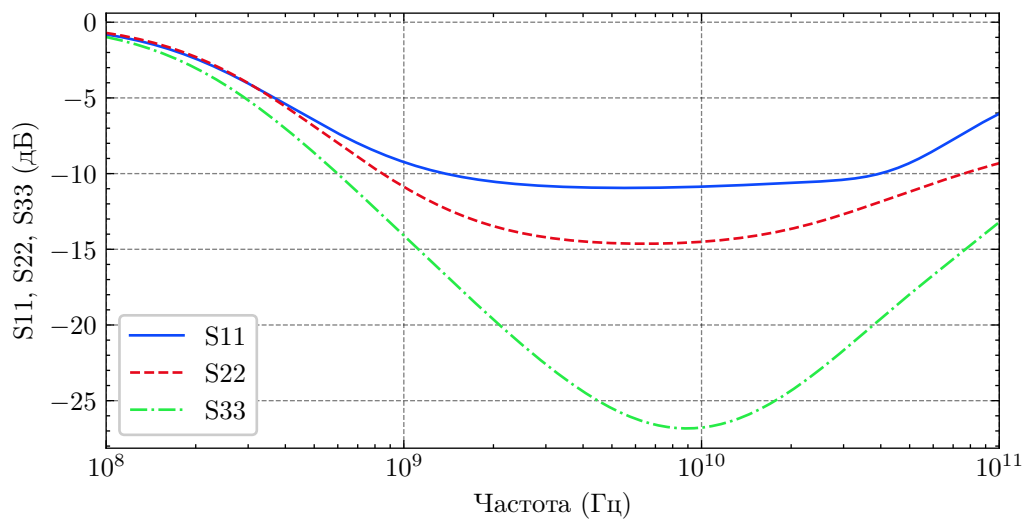


Рисунок 3.7 — Результаты моделирования возвратных потерь по входу и выходу рассматриваемого МШУ

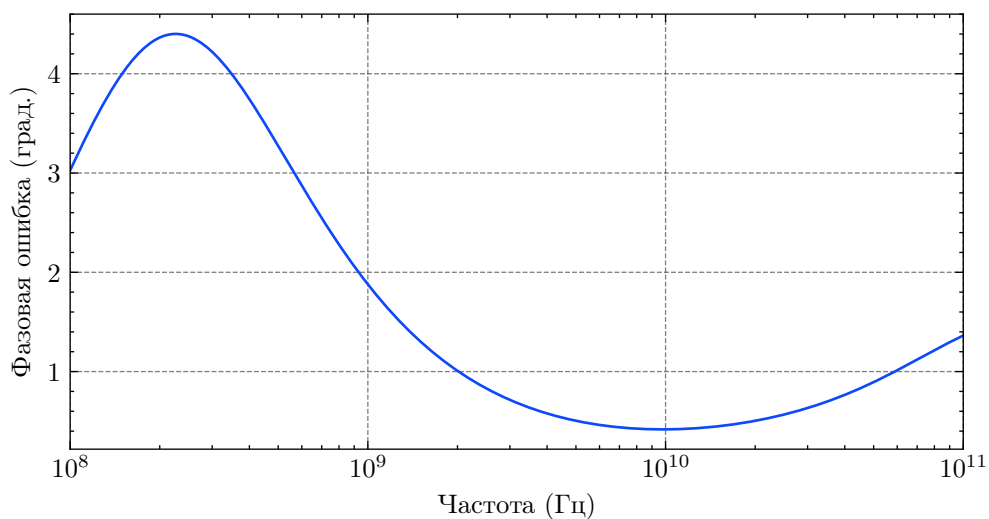


Рисунок 3.8 — Разница фаз между дифференциальными компонентами на выходе рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования

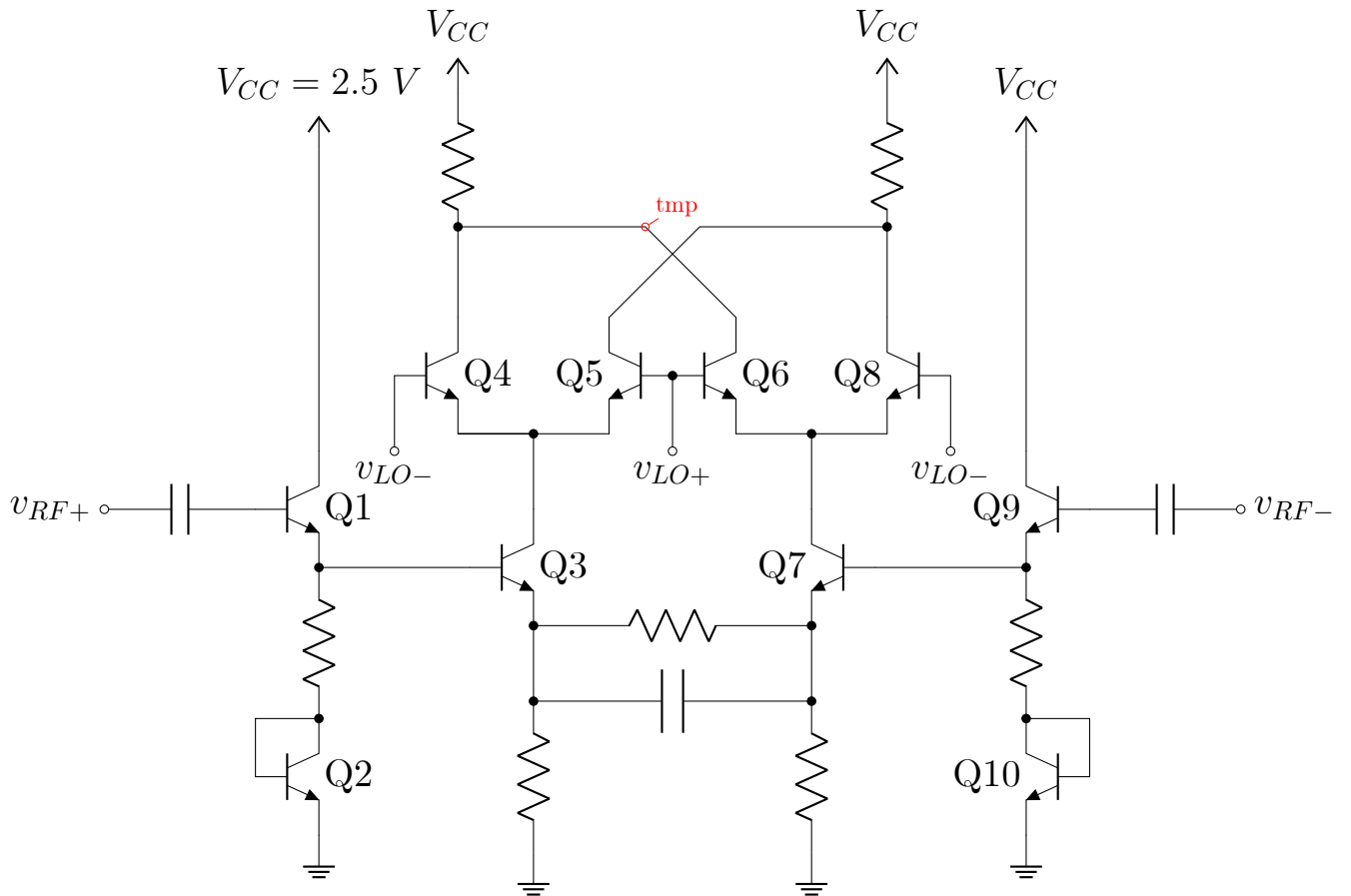


Рисунок 3.9 — Схема электрическая принципиальная сверхширокополосного смесителя

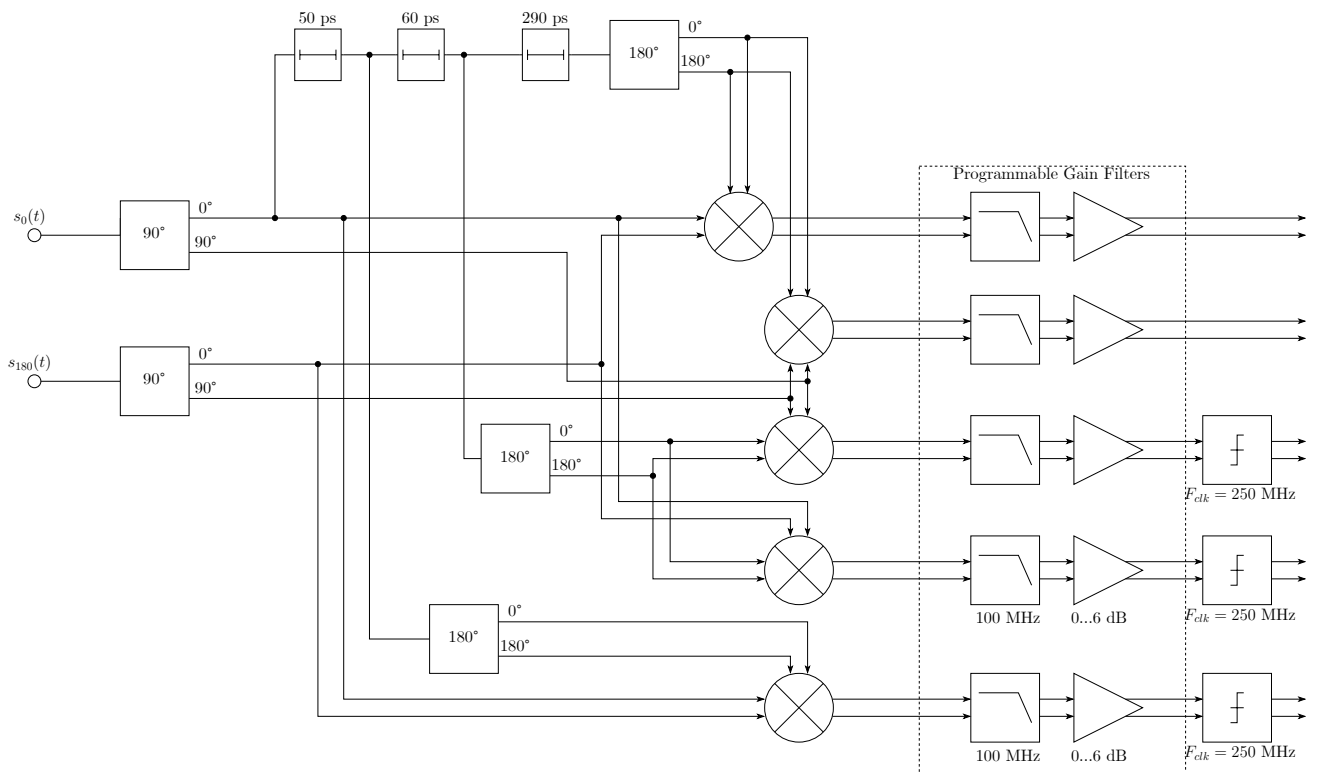


Рисунок 3.10 — Схема структурная - pdf_tex

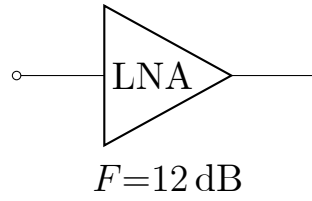


Рисунок 3.11 — Структурная схема тракта приемника МИЧ 1–1,8 ГГц и 1,8–3,3 ГГц

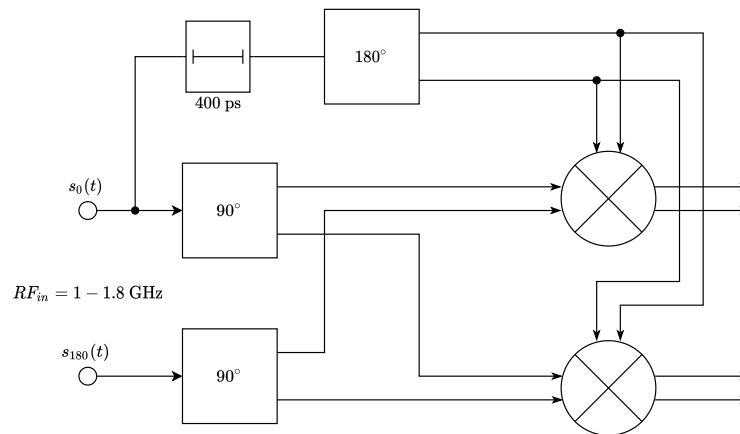


Рисунок 3.12 — Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 1–1,8 ГГц и 1,8–3,3

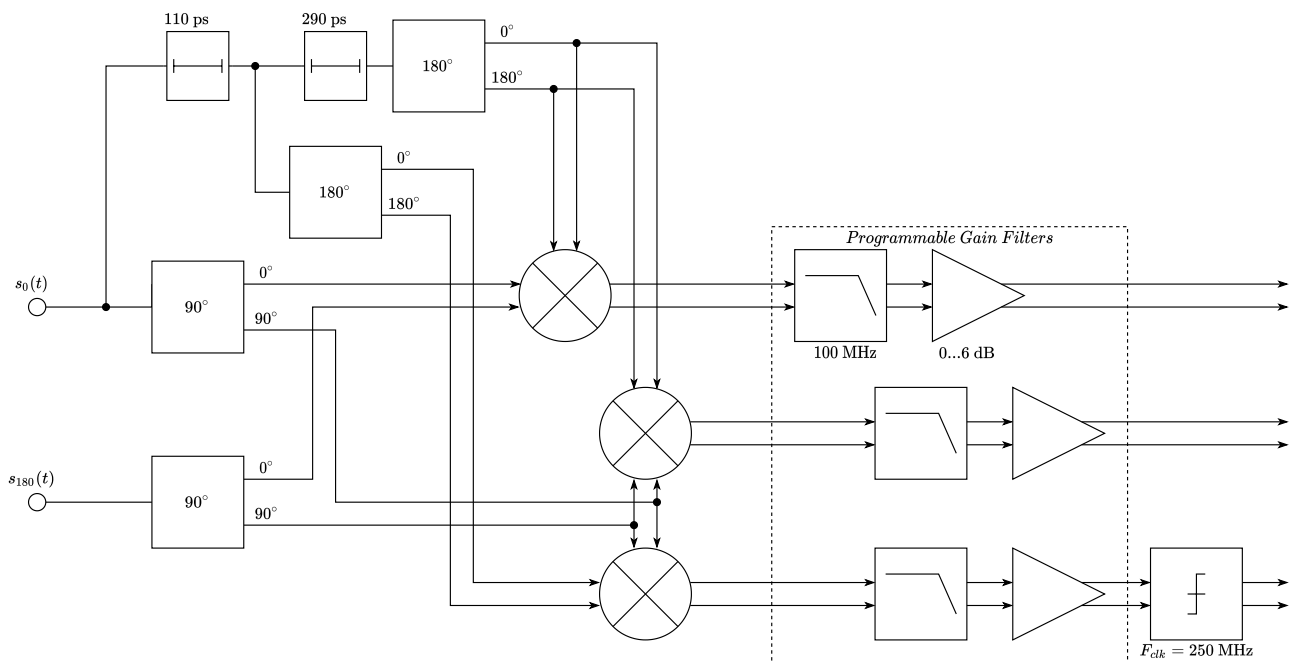


Рисунок 3.13 — Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 3,3–6,3 ГГц

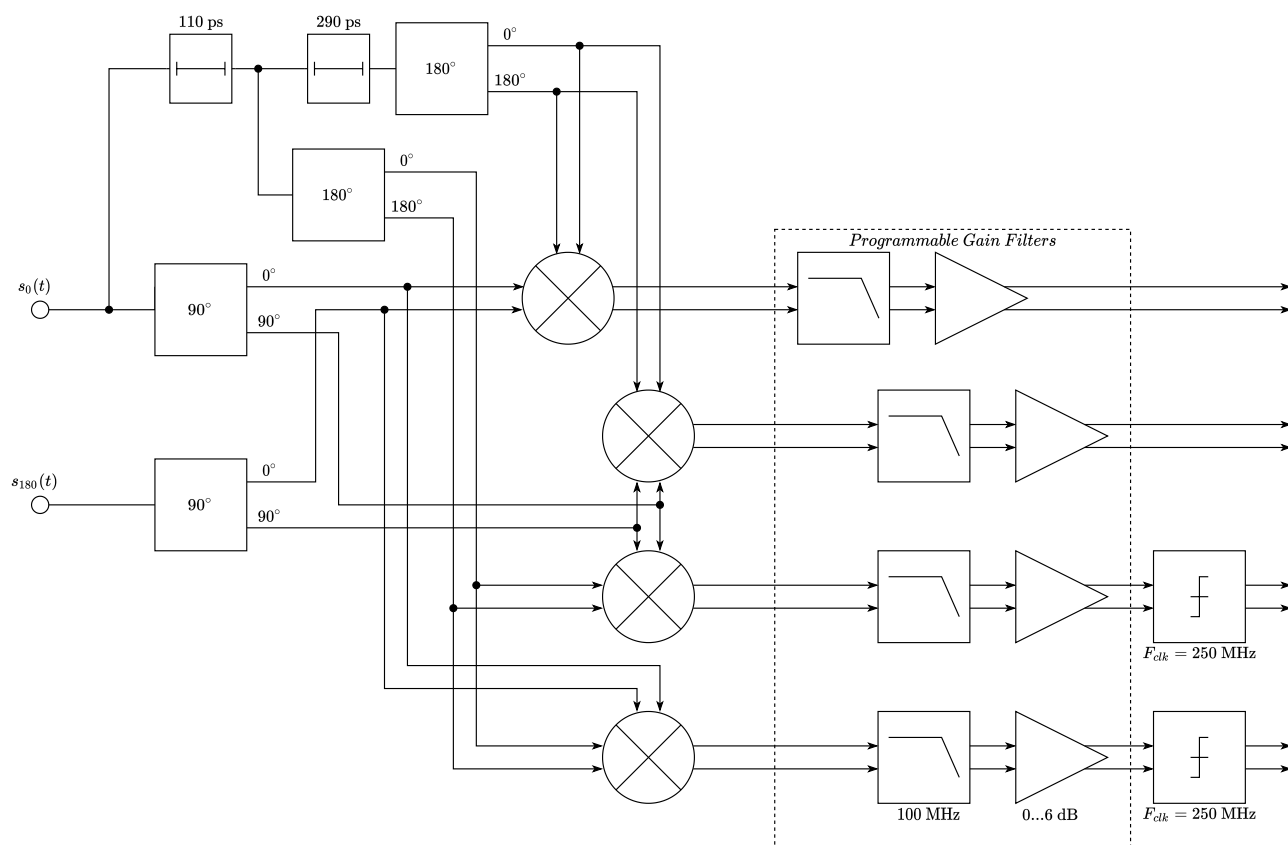


Рисунок 3.14 — Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 6,3–11,5 ГГц

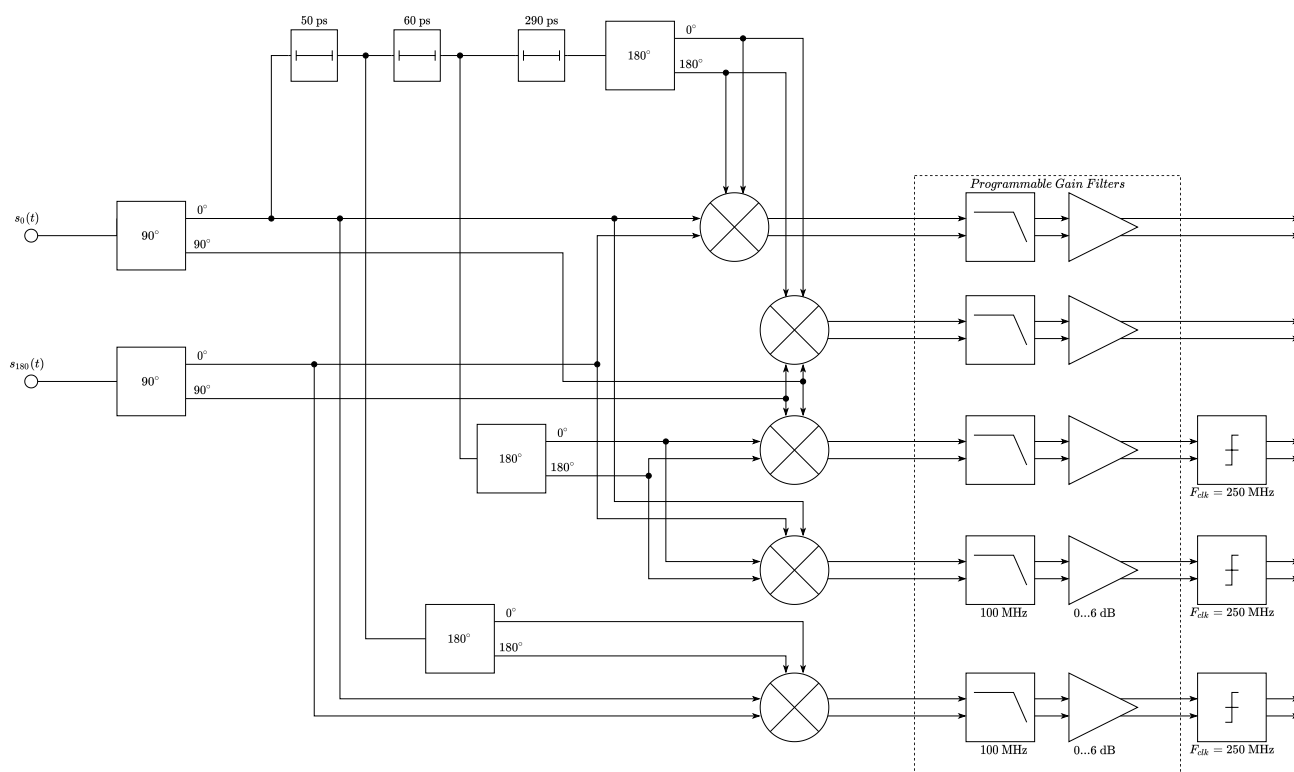
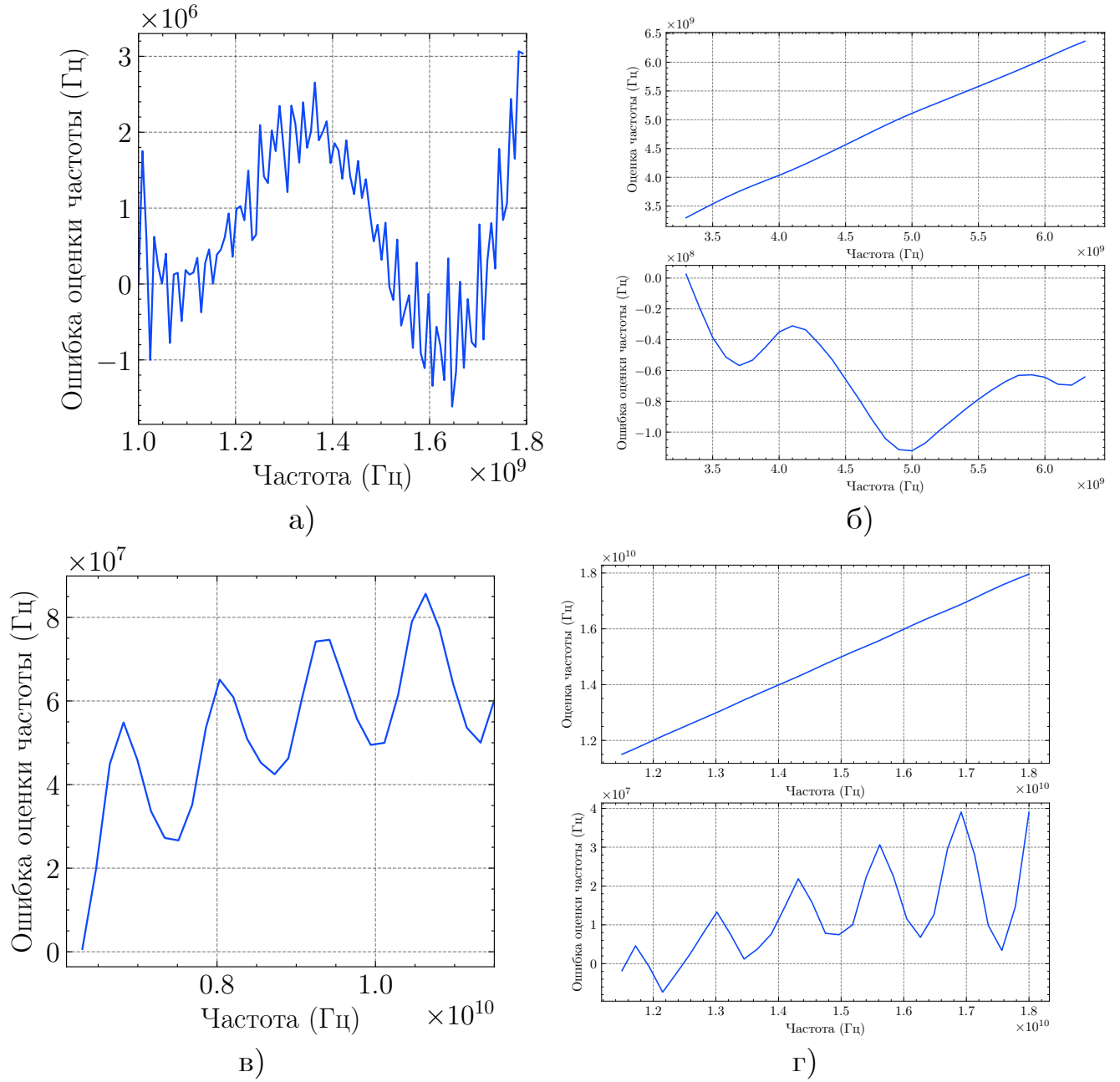


Рисунок 3.15 — Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 11,5–18 ГГц



а) 1–3,3 ГГц; б) 3,3–6,3 ГГц; в) 6,3–11,5 ГГц; г) 11,5–18 ГГц.

Рисунок 3.16 — Оценка частоты по результатам компьютерного моделирования каналов 1–18 ГГц

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Завьялову С. А. за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит авторов шаблона «Russian-Phd-Latex-Dissertation-Template» за помощь в оформлении диссертации.

Список сокращений и условных обозначений

Z_{in}	Входной импеданс
----------	------------------

Словарь терминов

TeX : Система компьютерной вёрстки, разработанная американским профессором информатики Дональдом Кнутом

панграмма : Короткий текст, использующий все или почти все буквы алфавита

Virtuoso : Система автоматизированного проектирования микроэлектронных устройств

Список литературы

1. *Фамилия, И. О.* Название статьи [Текст] / И. О. Фамилия, И. О. Фамилия2, И. О. Фамилия3 // Журнал. — 2011. — Т. 1, № 8. — С. 105—120.
2. *Фамилия, И. О.* Название статьи [Текст] / И. О. Фамилия, И. О. Фамилия2, И. О. Фамилия3 // Журнал. — 2013. — Т. 1, № 5. — С. 100—120.
3. Название статьи [Текст] / И. О. Фамилия [и др.] // Журнал. — 2014. — Т. 1, № 5. — С. 100—120.
4. *Фамилия, И. О.* Название статьи [Текст] / И. О. Фамилия, И. О. Фамилия2, И. О. Фамилия3 // Журнал. — 2018. — Т. 2, № 1. — С. 99—102.
5. A 4-bit 36 GS/s ADC with 18 GHz Analog Bandwidth in 40 nm CMOS Process [Текст] / Н. Jia [и др.] // Electronics. — 2020. — 20 окт. — Т. 9, № 10. — С. 1733. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/10/1733> (дата обр. 15.12.2020).
6. *Cheng, C.-H.* INTRODUCTION TO ELECTRONIC WARFARE : From the First Jamming to Machine Learning Techniques [Текст] / C.-H. Cheng, T. James. — RIVER PUBLISHERS, 2021.
7. A 60-GHz Digitally Controlled RF Beamforming Array in 65-nm CMOS with Off-Chip Antennas [Текст] / S. Lin [и др.]. —
8. ANALYSIS AND DESIGN OF ANALOG INTEGRATED CIRCUITS Fifth Edition [Текст] / P. R. Gray [и др.]. — 2009. — 1-896. — URL: <https://www.wiley.com/en-us/Analysis+and+Design+of+Analog+Integrated+Circuits%2C+5th+Edition-p-9780470245996>.
9. Ultra-Wideband Switched-Capacitor Delays and Circulators - Theory and Implementation [Текст] / A. Nagulu [и др.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2021. — Май. — Т. 56, № 5. — С. 1412—1424. — Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
10. *Du, X. Q.* A 25.6-GS/s 40-GHz 1-dB BW Current-Mode Track and Hold Circuit with more than 5-ENOB [Текст] / X. Q. Du, M. Grozing, M. Berroth // 2018 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium, BCICTS 2018. — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 11.2018. — С. 56—59. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8550855/>.

11. A wideband phase detector SiGe HBT MMIC for multi-gigabit synchronous receivers [Текст] / A. Dyskin [и др.] // GeMiC 2016 - 2016 German Microwave Conference. — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 04.2016. — С. 157—160. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7461579/>.
12. Photonic Implementation of an Instantaneous Frequency Measurement [Текст] : дис. ... канд.. — 140 с.
13. Microwave receivers with electronic warfare applications [Текст]. — Revised ed. — SciTech Publishing, Inc, 2005. — 460 с.
14. *Rahimpour, H.* Design and Implementation of a High-Sensitivity and Compact-Size IFM Receiver [Текст] / H. Rahimpour, N. Masoumi // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2019. — Июль. — Т. 68, № 7. — С. 2602—2609. — Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
15. A 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology featuring fT/fmax of 240/330 GHz and gate delays below 3 ps [Текст] / H. Rücker [и др.] // Proceedings of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. — 2009. — С. 166—169. — ISSN: 10889299.
16. *Pelgrom, M. J. M.* Matching Properties of MOS Transistors [Текст] / M. J. M. Pelgrom, A. C. J. Duinmaijer, A. P. G. Welbers // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 1989. — Т. 24, № 5. — С. 1433—1439.
17. A 112-GS/s 1-to-4 ADC front-end with more than 35-dBc SFDR and 28-dB SNDR up to 43-GHz in 130-nm SiGe BiCMOS [Текст] / X. Q. Du [и др.] // Digest of Papers - IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2019—June. — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 06.2019. — С. 215—218. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8701786/> ; ISSN: 15292517.
18. A low-power micromixer with high linearity for automotive radar at 77 GHz in silicon-germanium bipolar technology [Текст] / M. Hartmann [и др.] // 2007 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, SiRF07. — IEEE, 01.2007. — С. 237—240. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4117369/>.
19. A 6-20 GHz adaptive SiGe image reject mixer for a self-healing receiver [Текст] / P. K. Saha [и др.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. —

2012. — Сент. — Т. 47, № 9. — С. 1998—2006. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6276304/>.
20. *Johansen, T. K.* Analysis and design of wide-band SiGe HBT active mixers [Текст] / Т. К. Johansen, J. Vidkjær, V. Krozer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2005. — Июль. — Т. 53, № 7. — С. 2389—2396. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1463361/>.
 21. *Shahramian, S.* Millimeter-Wave Analog to Digital Converters: Technology Challenges and Architectures [Текст] : дис. ... канд. / Shahramian Shahriar. — University of Toronto, 2011. — URL: <https://search.proquest.com/docview/911419181/849D20821144D19PQ/1?accountid=35406%20https://search.proquest.com/docview/911419181/E701B606BC504EC5PQ/1?accountid=35406>.
 22. Digital frequency discriminator(DFD) error improvement by LO leakage compensation [Текст] / W. Choi [и др.] // European Microwave Week 2014: "Connecting the Future", EuMW 2014 - Conference Proceedings; EuRAD 2014: 11th European Radar Conference. — 2014. — С. 577—580.
 23. *Gruchalla, H.* The Instantaneous Frequency Measurement Receiver with Simultaneous Signal Capability [Текст] / H. Gruchalla, M. Czyzewski, A. Slowik // 2006 International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (2006 International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications). — Krakow, Poland : IEEE, 05.2006. — С. 554—557. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4345240/> (дата обр. 02.06.2020).

Список рисунков

1.1	Классификация способов оценки частоты сверхкоротких импульсов – pdf_tex	11
1.2	Структурная схема супергетеродинного приемника	11
1.3	Выходные сигналы частотного дискриминатора во временной и частотной областях	13
1.4	Структурная схема частотного дискриминатора на основе счета пересечений нуля и линейной аппроксимации	14
1.5	Временная диаграмма, описывающая принцип работы частотного дискриминатора на основе счета пересечений нуля и линейной аппроксимации	15
3.1	Схема устройства выборки-хранения	25
3.2	Схема электрическая принципиальная рассматриваемого МШУ .	25
3.3	Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования	26
3.4	Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования	26
3.5	Коэффициенты усиления и шума рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования	27
3.6	Значение фазовой ошибки разработанного активного фазовращателя 1 - 2 ГГц	27
3.7	Результаты моделирования возвратных потерь по входу и выходу рассматриваемого МШУ	28
3.8	Разница фаз между дифференциальными компонентами на выходе рассматриваемого МШУ согласно результатам моделирования	28
3.9	Схема электрическая принципиальная сверхширокополосного смесителя	29
3.10	Схема структурная - pdf_tex	29
3.11	Структурная схема тракта приемника МИЧ 1–1,8 ГГц и 1,8–3,3 ГГц	30

3.12 Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 1–1,8 ГГц и 1,8–3,3	30
3.13 Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 3,3–6,3 ГГц	30
3.14 Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 6,3–11,5 ГГц	31
3.15 Структурная схема частотного дискриминатора диапазона 11,5–18 ГГц	31
3.16 Результаты моделирования каналов МИЧ диапазона 1–18 ГГц .	32

Список таблиц

1	Сравнение характеристик приемников измерения мгновенной частоты	15
2	Характеристики разрабатываемого АЦП	24