

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

На правах рукописи

КОНТОРОВ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ



**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ
РАДИОФОТОННЫЙ ПРИЕМНЫЙ КАНАЛ НА ОСНОВЕ
ОПТИЧЕСКОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель:

Каргин Николай Иванович

Доктор технических наук, профессор,
проректор НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Борейшо Анатолий Сергеевич

Доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
заведующий кафедрой «Лазерная техника»
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова;
научный руководитель АО «Лазерные
системы», г. Санкт-Петербург

Устинов Алексей Борисович

Доктор физико-математических наук,
доцент кафедры «Физическая электроника
и технологии», СПбГЭТ «ЛЭТИ», г. Санкт-
Петербург

Ржанов Алексей Георгиевич

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика колебаний»
Физического факультета МГУ. Им. М. В.
Ломоносова, г. Москва

Защита состоится 20 января 2022 года в 16:30 на заседании диссертационного совета «МИФИ.05.03» при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., 31, 323-95-26. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/> НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Веселов Д. С.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке и исследованию универсального сверхширокополосного радиопотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования и спектрально-интервальной обработки сигналов с применением дискретной и интегральной компонентной базы фотоники.

Актуальность исследований

В конце 20-го века сформировалось новое научно-техническое направление - «радиопотоника», изучающее взаимодействие оптических и радиочастотных сигналов в задачах передачи, приема и обработки информации. Создаваемые радиопотонные технологии позволяют в новом качестве решать задачи радиоэлектроники, позволяя принципиально изменить схемотехнические решения и упростить функциональное построение аппаратуры, в разы сократить массогабаритные характеристики и потребляемую мощность.

Современная радиопотонная компонентная база уже на сегодняшний день позволяет создавать ряд электронно-фотонных устройств, обладающих значительным преимуществом по сравнению с классическими микросистемными устройствами [1], а их стремительное развитие в интегральную реализацию для значительного (на порядки) уменьшения массогабаритных характеристик, энергопотребления и стоимости, в конечном счете позволяет с большой долей уверенности заявлять, что радиопотонные технологии являются одним из ключевых и приоритетных направлений развития науки и техники в мире XXI века. Так, использование источников оптического излучения совместно с электрооптическими и оптоэлектронными преобразователями позволяет преобразовывать входной электрический сигнал в оптический диапазон, распространять и обрабатывать высокочастотные широкополосные сигналы без заметной потери качества.

Стоит отметить, что передовые принципы обработки радиосигналов имеют важное значение при разработке современных и при проектировании

перспективных систем [2-4]. Современные системы приема, обработки и передачи информации часто работают на любом участке диапазона частот 0...40 ГГц [5]. Широкополосная обработка сигналов имеет важное значение для более эффективного использования радиочастотного спектра и повышения качества современных и перспективных радиотехнических, телекоммуникационных и других систем. Методы и технологии, используемые для обработки таких сигналов, включают в себя применение как компонентной базы, выполненной на разных технологических платформах, так и различных схемотехнических способов построения приемных каналов с прямым детектированием или преобразованием частоты [6-8].

Классические радиочастотные методы и технологии обработки широкополосных сигналов имеют следующие недостатки: повышенное затухание, высокие дисперсионные потери, а также проблемы внеполосных излучений в области высоких частот. Такие устройства обычно имеют весьма высокие массогабаритные характеристики и часто не имеют достаточной оперативности, необходимой для выполнения обработки сигналов в быстро изменяющихся условиях. Существующая микроэлектронная компонентная база, хотя и имеет хорошую технологическую преемственность и гибкость, в настоящее время ограничивается формированием и обработкой сигналов с полосой в несколько гигагерц. С другой стороны, объединение и использование технологий фотоники и микроэлектроники (радиофотоники) позволяет создавать принципиально новый класс устройств, находящих применение в том числе для приема-обработки широкополосных высокочастотных сигналов.

При построении радиофотонных приемных каналов важным является преобразование входного СВЧ сигнала на промежуточную частоту [8], которой уже может быть оцифрован коммерческими электронными АЦП.

Другим подходом является использование фотонных АЦП для преобразования входного широкополосного СВЧ сигнала в цифровой вид уже в первых каскадах [9]. В этом случае для обработки оказывается доступной вся информация, имеющаяся во входном сигнале от нулевой частоты до

максимальной частоты полосы пропускания приемника. Однако, для многих практических приложений (5G/6G, спутниковая связь, радиолокация, сенсоры и пр.) необходимо решить более простую задачу – принять и обработать СВЧ сигналы, отстоящие от нулевой несущей частоты.

Поэтому настоящая работа, посвященная разработке и исследованию сверхширокополосных радиофотонных приемных каналов СВЧ сигналов на основе оптического гетеродинирования с использованием современной компонентной базы и технологий радиофотоники, позволяющих создавать новый класс устройств приема и обработки большого объема информации со значительным снижением массогабаритных характеристик, повышением надежности и стабильности параметров, интеграции технологий электроники и фотоники на единой подложке и пр. [10], является современной и актуальной.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка сверхширокополосных радиофотонных каналов для приема и обработки СВЧ сигналов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор и анализ радиофотонных технологий и приемных каналов;
- разработать схемотехнические решения и способы реализации сверхширокополосных радиофотонных приемных каналов СВЧ сигналов;
- провести теоретические (путем численного моделирования) и экспериментальные исследования разрабатываемых устройств;
- определить перспективные пути модернизации и доказать возможность их технической реализации.

Научная новизна исследования

- разработан радиофотонный приемный канал на основе оптического гетеродинирования и преобразования на промежуточную частоту с отношением сигнал/шум до 60 дБ, несущей частотой более 10 ГГц и в полосе приема до 1 ГГц. Численное моделирование и экспериментальные исследования показали, что положение рабочих точек амплитудных модуляторов Маха-Цандера в минимуме их передаточной характеристики значительно улучшают выходные характеристики (SFDR более $120 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$), а также позволяют избежать применения узкополосных оптических фильтров и компенсировать шумы лазера;
- впервые разработан сверхширокополосный радиофотонный приемный канал на основе спектрально-интервальной обработки СВЧ сигналов и оптическим гетеродинированием с преобразованием на промежуточную частоту 2 ГГц. Проведены исследования, подтверждающие возможность его технической реализации, достижения отношения Сигнал/Шум более 45 дБ, а также восстановления как амплитуды, так и фазы входного сигнала;
- впервые предложена многоканальная схема сверхширокополосного радиофотонного приемного канала со спектрально-интервальной обработкой сигналов и с использованием оптической гребенки СВЧ сигналов, которая может содержать общую полосу частот более 100 ГГц. Показано, что такой радиофотонный приемный канал позволяет параллельно или последовательно работать во всех или любом из указанных диапазонов, используя только один приемный высокочастотный модулятор, при этом остальные компоненты (фотодетекторы, электронные АЦП и пр.) могут быть однотипными и иметь ширину полосы менее 2 ГГц.

Практическая значимость

Практическая значимость исследования заключается в том, что оно может служить теоретической и экспериментальной базой для создания

высокочастотных и сверхширокополосных радиофотонных устройств для применения в существующих и перспективных системах приема, обработки и передачи информации, а также дальнейшей миниатюризации в виде фотонных интегральных схем. Приведенный в работе метод реализации радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинамирования и спектрально-интервальной обработки сигналов дает возможность создавать универсальные радиофотонные приемные устройства для мгновенной обработки сверхширокополосных СВЧ сигналов в системах обработки информации до 100 ГГц и более как в дискретном, так и в интегральном исполнениях (системы 5G/6G, спутниковые системы, радиотехнические системы, радары, системы радиоастрономия, беспилотный транспорт, высокоскоростные квантовые устройства, высокоскоростные сенсоры и т.д.).

Основные положения, выносимые на защиту

1. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований разработан радиофотонный приемный канал на основе оптического гетеродинамирования с SFDR более $120 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$ на частотах более 10 ГГц.
2. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований разработан сверхширокополосный радиофотонный приемный канал на основе спектрально-интервальной обработки СВЧ сигналов до 20 ГГц.
3. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований применение в сверхширокополосном радиофотонном приемном канале гребенки оптических опорных СВЧ частот на основе модулятора в режиме перемодуляции (уровень входной мощности $\sim 1 \text{ Вт}$) позволило увеличить ширину полосы обрабатываемого сигнала более 100 ГГц.
4. В результате проведенных исследований компонентной базы InP ФИС показана возможность создания радиофотонных приемных каналов в монолитном интегральном исполнении.

Апробация работы и публикации

Автором работы опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 работы в изданиях, включённых в перечень рекомендованных ВАК, и 7 работ в системе цитирования Web of Science / Scopus, а также 17 работ в сборниках трудов конференций и семинарах.

Стажировки и участия в проектах

Автор работы участвовал в 5 научных проектах по теме исследования, с отличием завершил профессиональную переподготовку в МИРЭА – Российском технологическом университете по программе «Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона», с отличием окончил онлайн курс профессионального образования в Университете Британской Колумбии по дизайну, фабрикации и исследованию кремниевой интегральной фотоники (Phot1x: Silicon Photonics Design, Fabrication and Data Analysis), а также с отличием закончил профессиональный тренинг по созданию фотонных интегральных схем в Техническом Университете Эйндховена (Deep-Dive PIC Design Course 2020) и курс “Automated Design of Photonic Integrated Circuits using VPIcomponentMaker Photonic Circuits”.

Участие в конференциях и семинарах

Материалы диссертации были представлены на международных и российских конференциях и семинарах: METANANO 2021, VI International Conference on Metamaterials and Nanophotonics; 19th International Conference Laser Optics ICLO 2020 a: St. Petersburg, Russia; Международная конференция КрыМиКо’2020, Севастополь, Крым, Россия, 6—12 сентября 2020 г.; Труды школы-семинара «Волны-2020. Радиофотоника»; Международная конференция КрыМиКо’2019, Севастополь, 8-14 сентября 2019 г.; Международная выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики», секция «Радиофотоника», 4-7 марта 2019 г.; XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени

А.П. Сухорукова («Волны-2019»), 2019 г.; Международный симпозиум «Progress in Electromagnetics Research Symposium», 2018; Конференция «48th European Microwave Conference», EuMC, 2018; 2-d Meeting of BRICS Working Group on Photonics, Skoltech, March 1-2, 2018 г.; Международная конференция «International Conference Laser Optics 2018», ICLO, 2018.; XVI Всероссийская школа-семинар «Волны в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова («Волны-2018»), 2018 г.; VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и инженеров «Минцевские чтения - 2018», 2018 г.; V Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения – 2017», 2017 г.; 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), Севастополь, 10-16 сентября 2017 г.; 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016), Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.; XV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016»), 2016 г.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор руководил и участвовал в постановке задач исследований, проведении, обработке и публикации экспериментальных и теоретических исследований, представленных в диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и четырех приложений со списками публикаций и тезисов с участием автора, а также экспериментальными и другими данными. Общий объем научно-квалификационной работы (диссертации) – 123 страницы,

включая 51 рисунок и 9 таблиц. Библиография включает 105 наименований на 9 страницах.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи работы, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1 посвящена обзору и сравнительному анализу технологий радиофотоники. Показаны преимущества радиофотонных технологий над микроэлектронными, дана классификация устройств радиофотоники (область применения – устройства – компоненты – технологии). Представлена и описана общая схема радиофотонного приемного канала для различных применений. Определены перспективные направления применения и развития радиофотонных технологий и приемных устройств, которые включают переход с дискретного в интегральное исполнение. Проанализированы ключевые достоинства и недостатки различных радиофотонных технологий в дискретном и интегральном исполнении (InP, Si, SiN и пр.), а также показана возможность реализации в виде ФИС.

В п.1.1 представлена общая функциональная схема радиофотонной система приема-передачи информации, а также приведены сравнительный анализ и преимущества технологий радиофотоники, а также их классификация, которая включает различные области применения, устройства, компоненты и технологические платформы.

В п.1.2 приведена общая схема радиофотонного приемного канала, показана целесообразность его применения и исследования, а также отражены основные способы обработка приемного СВЧ сигнала: прямая обработка, обработка с преобразованием (понижением) частоты и на основе обработки широкополосных сигналов.

В п.1.3 анализируются перспективные направления применения и развития радиофотонных технологий: переход от дискретного в интегральное исполнение. Представлены преимущества и недостатки каждого исполнения, а также показана возможность разработки устройств, на основе существующих Si и InP технологиях.

Глава 2 посвящена разработке сверхширокополосного радиофотонного приемного канала на основе современной компонентной базы фотоники и способов оптического гетеродинирования.

В п.2.1 проведены анализ и сравнение схемотехнических решений методов оптического гетеродинирования и их применения в радиофотонных приемных каналах. Рассмотрены прямые, последовательные и параллельные схемы обработки СВЧ сигналов (пример параллельной схемы представлен на рис. 1), определены их области применения.

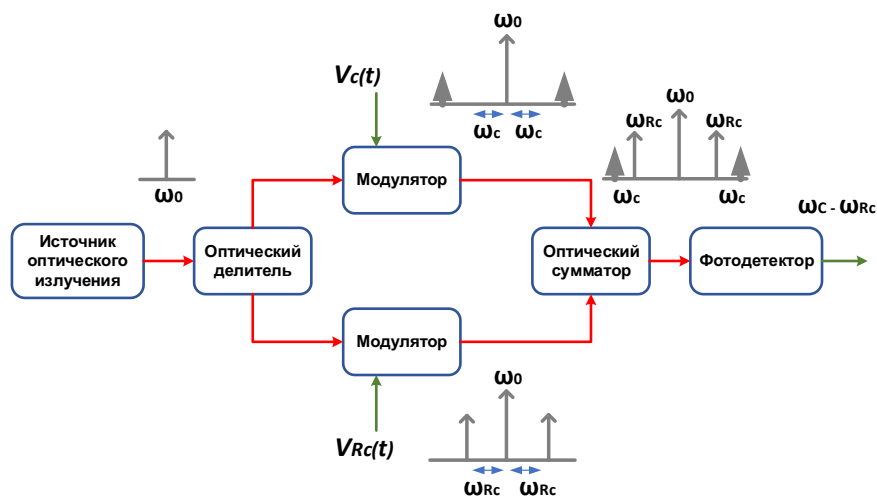


Рис. 1. Параллельная схема радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования. $V_c(t)$ – входной СВЧ сигнал с частотой несущей ω_c , $V_{Rc}(t)$ – опорное СВЧ колебание с частотой ω_{Rc}

В п.2.2 разработана и проанализирована схема сверхширокополосного приемного канала на основе спектрально-интервальной обработки сигналов и оптического гетеродинирования (рис. 2). Дано сравнение и показаны преимущества по сравнению с существующими электронными АЦП и фотонными АЦП во временной области, а также показана возможность реализации в виде ФИС на основе существующих технологий.

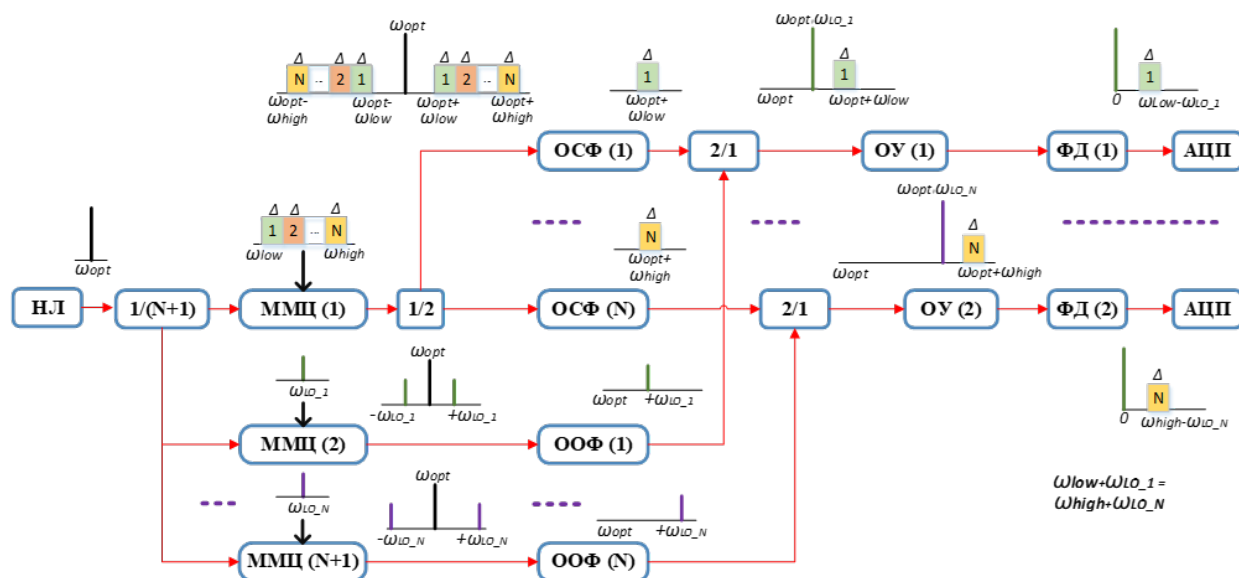


Рис. 2. Схема сверхширокополосного радиофотонного приемного канала на основе радиофотонного АЦП со спектрально-интервальным оценением. НЛ – непрерывный лазер, ОСФ - оптические сигнальные фильтры, ООФ - оптические опорные фильтры, ММЦ - модуляторы Маха - Цендера, ОУ - оптические усилители, ФД - фотодетекторы, АЦП - электронные аналого-цифровые преобразователи, ω_{low} – частота запуска широкополосного сигнала, ω_{high} – конечная частота широкополосного сигнала, ω_{opt} – оптический носитель, ω_{LO} – опорная частота, Δ – часть полосы входного сигнала

В п.2.3 проведены анализ и сравнение, а также определены требования к современной компонентной базе (лазеры, модуляторы, фотодетекторы, усилители, фильтры) сверхширокополосных радиофотонных приемных каналов. Показана универсальность применения выбранных компонентов в дискретном и интегральном исполнениях.

Глава 3 посвящена исследованию радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования.

В п.3.1 представлено теоретическое описание и принцип работы радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования, показано влияние шумов лазера и фотодетектора.

В п.3.2 определены основные параметры (коэффициент усиления, коэффициент шума, динамический диапазон, фазовые шумы) и проанализировано их влияние на радиофотонные приемные каналы.

В п.3.3 приводятся результаты исследования радиофотонного приемного канала на основе одного модулятора Маха-Цандера (прямой обработки входного

сигнала). Исследуется зависимость выходных характеристик от RIN лазера, а также демонстрируется хорошая сходимость результатов численного моделирования и экспериментальных исследований ($114 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$ и $112 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$ соответственно, на частотах около 10 ГГц, при $\text{RIN} = -145 \text{ дБ/Гц}$, рис. 3).

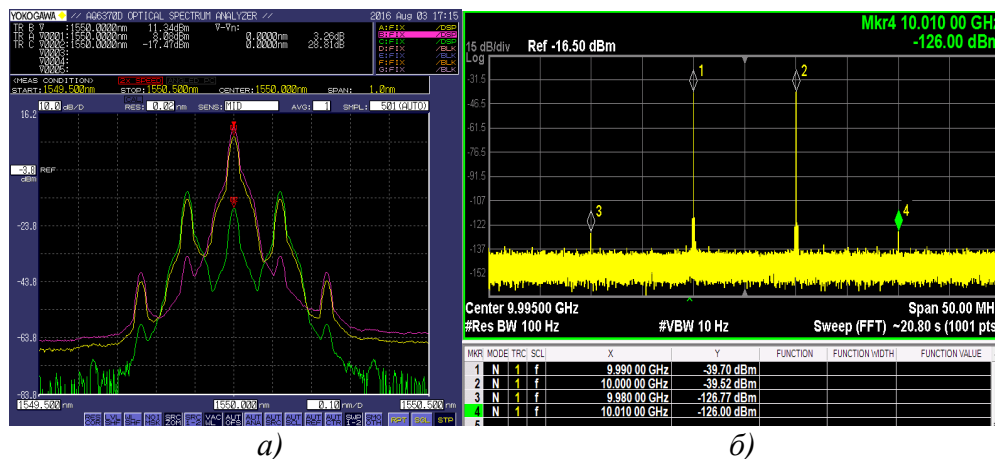


Рис. 3. а) спектр оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цандера при разных режимах его рабочей точки; б) интермодуляционные искажения 3-го порядка на частоте 10 ГГц

В п.3.4 приводятся результаты исследования радиопотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования. Представлены различные схемотехнические решения (с суммированием в СВЧ, оптические последовательные, оптические параллельные) для построения радиопотонного приемного канала. Проведен сравнительный анализ их достоинств и недостатков, а также возможности применения в различных направлениях (табл. 1). Приведены результаты экспериментальных исследований, в высокой степени совпадающие с проведенным численным моделированием. Параллельная схема и выбор рабочих точек модуляторов в минимуме их передаточной характеристики продемонстрировали возможность достижения SFDR более $120 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$ на частотах более 10 ГГц и RIN лазера -145 дБ/Гц , а также возможность избегания использования оптических фильтров для выделения нежелательных составляющих спектра (сохраняя при этом стабильность выходных характеристик).

Таблица 1. Достоинства и недостатки схем радиопотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования

Схема радиотонного приемного канала	Достоинства	Недостатки
Прямая обработка СВЧ сигнала	• достижение высоких характеристик • простота реализации и минимум используемых компонент	• невозможность прямой обработки СВЧ сигналов на высоких частотах • использование СВЧ фотодетектора • прямая зависимость от шумов радиотонных компонент
Оптическое гетеродинирование: Суммирование по СВЧ	• простота реализации и отсутствие дополнительных радиотонных компонент • высокий коэффициент передачи • высокий динамический диапазон • НЧ фотодетектор	• влияние шумовых характеристик и дополнительных гармоник • малая широкополосность из-за СВЧ сумматора • малая развязка приемного и опорного СВЧ сигналов
Оптическое гетеродинирование: Последовательные модуляторы	• высокая стабильность работы • полная развязка приемного и опорного СВЧ сигналов • возможность реализации в дискретном/волоконном исполнении • НЧ фотодетектор	• высокие шумы и меньший динамический диапазон • необходим второй модулятор • прямая зависимость от шумов радиотонных компонент
Оптическое гетеродинирование: Параллельный модулятор	• хорошие шумовые характеристики и динамический диапазон • полная развязка приемного и опорного СВЧ сигналов • высокая функциональная гибкость • НЧ фотодетектор	• необходимо интегральное исполнение для стабильной работы • необходимо использование дополнительных компонент
Оптическое гетеродинирование: Двойной параллельный модулятор	• хорошие шумовые характеристики и динамический диапазон • интегральной исполнение и высокая стабильность работы • отсутствие необходимости в других компонентах • НЧ фотодетектор	• малая функциональная гибкость (в многоканальных системах требует подстройки СВЧ опоры в каждый модулятор)

Глава 4 посвящена исследованию сверхширокополосного радиотонного приемного канала на основе спектрально-интервальной обработки сигналов и оптическим гетеродинированием.

В п.4.1. приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований радиотонного приемного канала на основе спектрально-интервальной обработки и оптического гетеродинирования (рис. 4).

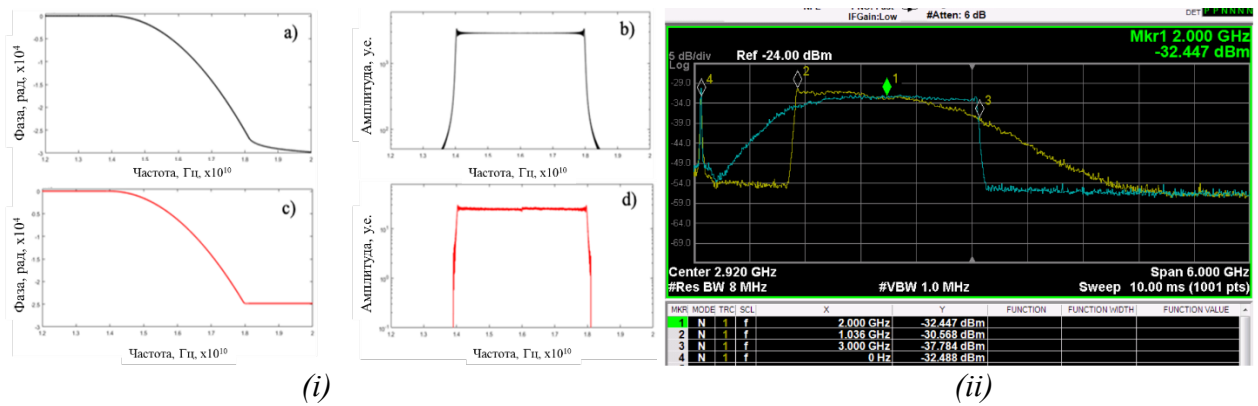


Рис. 4. (i) Спектры (фазы (a), (c) и амплитуды (b), (d)) входного широкополосного СВЧ сигнала (черные кривые (a) и (b)) и математически восстановленного сигнала (красные кривые (c) и (d)) после обработки; (ii) Спектральная плотность сигналов на промежуточной частоте на выходе фотодетекторов

В п.4.2 исследуется применение оптической гребенки опорных СВЧ частот. Проведены численное моделирование и экспериментальные исследования способов реализации генератора гребенки оптических СВЧ частот на основе двойного параллельного модулятора (5 гармоник) и модулятора с двумя СВЧ входами (более 40 гармоник) с неравномерностью амплитуды менее 1 дБ (рис. 5a). Также приведены результаты численного моделирования сверхширокополосного радиопотонного приемного канала на основе разработанной оптической гребенки, включающие обработку и восстановление АЧХ и ФЧХ исходного ЛЧМ сигнала (рис. 5б)

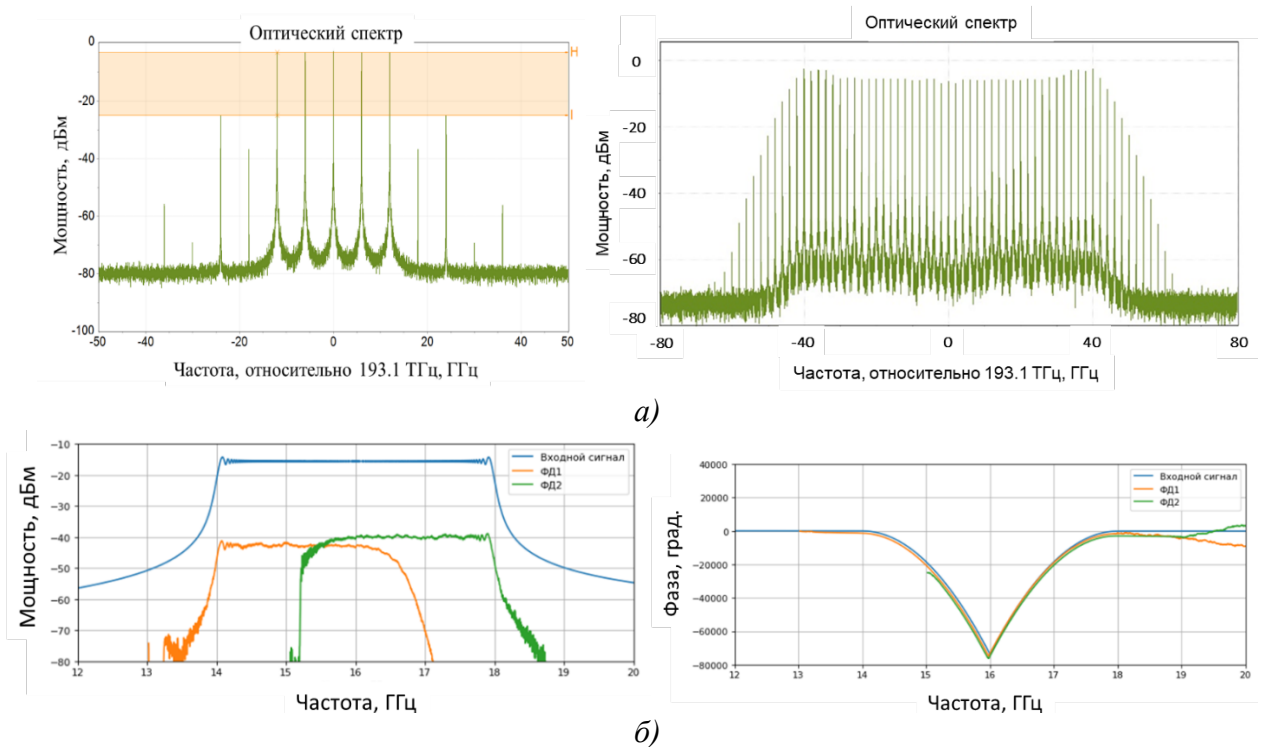


Рис. 5. Результаты исследования сверхширокополосного радиопотонного приемного канала с применением оптической гребенки опорных частот. а) результаты моделирования оптической гребенки опорных СВЧ частот на основе двойного параллельного модулятора Маха-Цандера (слева) и на основе модулятора с двумя СВЧ входами (справа); б) АЧХ (слева) и ФЧХ (справа) входного (синяя кривая) и восстановленного (оранжевая и зеленая кривые) СВЧ сигнала с выходов фотодетекторов.

В п.4.3 проведено исследование (проектирование, изготовление и измерение) ряда интегральных компонентов радиопотонного приемного канала (лазер, модулятор, демультиплексор) на основе InP ФИС (рис. 6). Показана возможность дальнейшего развития радиопотонного приемного с применением современных технологий ФИС.

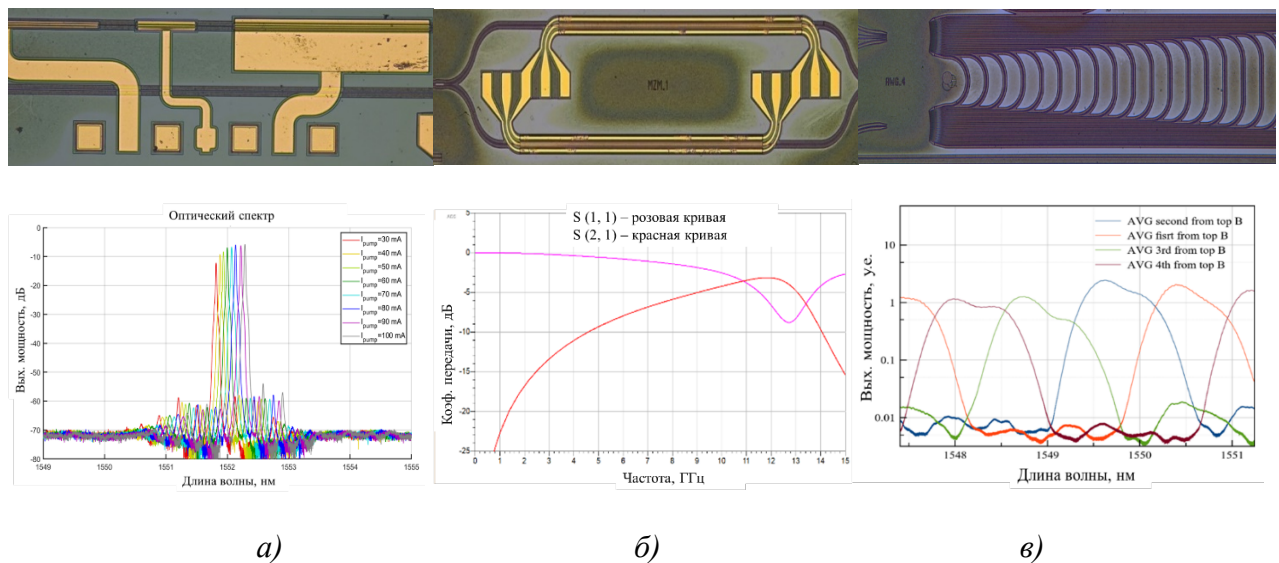


Рис. 6. Фотографии и результаты исследования интегральных компонентов радиопотонного приемного канала на основе InP ФИС: а) РБО лазер; б) амплитудный модулятор Маха-Цандера; в) оптический демультиплексор

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В ходе выполнения диссертационной работы были поставлены и решены задачи по разработке и исследованию универсальных сверхширокополосных радиопотонных приемных каналов СВЧ диапазона частот на основе оптического гетеродинирования и со спектрально-интервальной обработкой сигналов.

2. Выполнен сравнительный анализ последовательных и параллельных схем реализации радиопотонного приемного канала на основе оптического гетеродинирования. Показано, что параллельная схема демонстрирует лучшие

выходные характеристики и возможность эффективной реализации многоканальных устройств. Параллельная схема также позволяет полностью развязать приемный и опорный СВЧ сигналы, что в свою очередь показывает высокую функциональную и системную гибкость реализации. Полученный при моделировании SFDR составляет более $120 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$, подтвержденный экспериментально $\text{SFDR} = 110 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$ на частоте 10 ГГц.

3. Разработана оригинальная схема сверхширокополосного радиофотонного приемного канала на основе спектрально-интервальной обработки входного сигнала и оптическим гетеродинированием. Такая схема показала хорошую гибкость и частотное масштабирование: легко изменить как несущую частоту, так и пропускную способность каждого канала, изменив опорную частоту полосы частот генератора и оптических фильтров. Высокочастотная полоса пропускания такого радиофотонного приемного канала ограничена полосой пропускания одного приемного модулятора (на сегодняшний день более 100 ГГц), тогда как другие компоненты (фотодетекторы и электронные АЦП) могут иметь низкую полосу пропускания (менее 2 ГГц), даже при многоканальном исполнении. Продемонстрировано, что использование оптических генераторов СВЧ гребенки (десятки спектральных линий) позволяет значительно увеличить частотный диапазон обрабатываемого сигнала (более 100 ГГц), а также обрабатывать непосредственно «полезную» (информационную) составляющую спектра (амплитуду и фазу сигнала) вне зависимости от несущей частоты входного сигнала.

4. Рассмотрены перспективные пути модернизации радиофотонных приемных каналов в виде ФИС, а также продемонстрирована возможность монолитной реализации на InP как пассивных, так и активных/высокочастотных компонентов. Проведено проектирование, изготовление и исследование источников оптического излучения, модулятора и демультиплексора. Так, РБО-лазер имеет выходную мощность более 4 мВт, подавление соседних мод более 48 дБ, а пороговый ток 18 мА. AWG-демультиплексор имеет ширину каналов менее 0,8 нм, подавление соседних каналов 18 дБ, а перекрестные помехи на

уровне ~5 дБ. Амплитудный модулятор Маха-Цандера имеет ширину полосы до ~10 ГГц, коэффициент экстинкции ~20 дБ, а полуволновое напряжение ~7 В. Суммарные оптические потери на ввод/вывод излучения составляют менее 10 дБ.

ПУБЛИКАЦИИ И ТЕЗИСЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus/WoS

1. Kulagin V.V., Valuev V.V., Kontorov S.M., Prokhorov D.A., Cherepenin V.A., “Formation of Broadband Microwave Signals and Multichannel Frequency Conversion with a Microwave Photonics Reference Frequency Spectrum Generator”, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume 85, pages70–75, 2021
2. S. Kontorov, V. Cherepenin, F. Kueppers, V. Kulagin, D. Prokhorov, A. Shipulin and V.Valuev, “Optical Frequency Comb Generation for Broadband Microwave Photonics Receiver”, 19th International Conference Laser Optics ICLO 2020 At: St. Petersburg, Russia, Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICLO48556.2020.9285596
3. Kulagin, Victor; Cherepenin, Vladimir; Kontorov, Sergey; Prokhorov, Denis; Valuev, Victor, “Reference frequencies comb generation for microwave photonics ADC with signal spectral-interval estimation”, ITM Web Conf. Volume 30, 2019, 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019)
4. Kontorov, S.M., Cherepenin, V.A., Kulagin, V.V., *et al.* «Signal Spectral-Interval Estimation in Fast Photonic Analog-to-digital Converters», conference proceedings: Progress in Electromagnetics Research Symposium, Vol. 2018, article № 8598200, DOI: 10.23919/PIERS.2018.8598200, pp. 967-972, 2018.
5. Cherepenin, V.A., Kontorov, S.M., Kulagin, V.V., *et al.* «Photonic Analog-to-Digital Conversion of Microwave Signals Using Spectral-Interval Estimation», conference proceedings: 48th European Microwave Conference, EuMC, DOI: 10.23919/EuMC.2018.8541512, article № 8541512, pp. 796-799, 2018.
6. Valuev, V.V., Gulyaev, Y.V., Kontorov, S.M., *et al.* «A Universal Microwave Photonic Receiving Channel», Journal of Communications Technology

and Electronics, Vol. 63, Issue 9, DOI: 10.1134/S1064226918090218, pp. 1080-1088, 2018.

7. Valuev, V.V., Kontorov, S.M., Kulagin, V.V., *et al.* « Microwave photonics frequency conversion of microwave signals», conference proceedings: - International Conference Laser Optics 2018, ICLO, article № 8435452, DOI: 10.1109/LO.2018.8435452, p. 367, 2018.

Публикации, тезисы докладов и сообщений на научных конференциях и семинарах

1. Timur Abbasov, Ivan Kazakov, Ivan Sherstov, Sergey Kontorov, Arkadi Shipulin, Franko Kueppers and Kirill Lakhmanskiy, “Focusing grating couplers for radio-frequency surface ion traps”, METANANO 2021, VI International Conference on Metamaterials and Nanophotonics, 2021

2. Kulagin V.V., Valuev V.V., Kontorov S.M., Prokhorov D.A., Cherepenin V.A., “Formation of Broadband Microwave Signals and Multichannel Frequency Conversion with a Microwave Photonics Reference Frequency Spectrum Generator”, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume 85, pages70–75, 2021

3. S. Kontorov, V. Cherepenin, F. Kueppers, V. Kulagin, D. Prokhorov, A. Shipulin and V.Valuev, “Optical Frequency Comb Generation for Broadband Microwave Photonics Receiver”, 19th International Conference Laser Optics ICLO 2020 at: St. Petersburg, Russia, Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICLO48556.2020.9285596

4. Ivan Kazakov, Sergey Kontorov, A. Chipouline, Franko Kueppers, “Development of an Integrated Photonic Interrogator based on an Arrayed Waveguide Grating”, 3rd Conference On Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2020 At: Perm, Russia

5. В.В. Кулагин, В.В. Валуев, С.М. Конторов, Д.А. Прохоров, В.А. Черепенин, «Формирование гребенки частот в оптоэлектронном генераторе», Сборник трудов 30-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2020), Севастополь, Крым, Россия, 6—12 сентября 2020 г., вып. 2, с. 432-433

6. В.В. Кулагин, В.В. Валуев, С.М. Конторов, Д.А. Прохоров, В.А. Черепенин, «Высокочастотный радиофотонный АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах», Известия Российской

академии наук. Серия физическая, том 84, № 1, с. 67-72, 2020. «Выбор редакции: лучшая публикация месяца»

7. Конторов С.М., Шипулин А.В., Кюпперс Ф., и др. «Многоканальный радиофотонный приемный тракт», международная выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики», секция «Радиофотоника», 4-7 марта 2019 г.

8. Кулагин В. В., Валуев В. В., Конторов С. М и др. «Формирование гребенки опорных частот для радиофотонного АЦП со спектрально-интервальным оцениванием сигнала», 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019), Севастополь, 8-14 сентября 2019 г.

9. В.В. Кулагин, В.В. Валуев, С.М. Конторов и др. «Высокочастотный радиофотонный АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах», XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2019»), 2019 г.

10. Kontorov, S.M., Cherepenin, V.A., Kulagin, V.V., *et al.* «Signal Spectral-Interval Estimation in Fast Photonic Analog-to-digital Converters», conference proceedings: Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2018.

11. Cherepenin, V.A., Kontorov, S.M., Kulagin, V.V., *et al.* «Photonic Analog-to-Digital Conversion of Microwave Signals Using Spectral-Interval Estimation», conference proceedings: 48th European Microwave Conference, EuMC, 2018.

12. Valuev, V.V., Kontorov, S.M., Kulagin, V.V., *et al.* « Microwave photonics frequency conversion of microwave signals», conference proceedings: - International Conference Laser Optics 2018, ICLO, 2018.

13. Д.А. Чермошенцев, В.В. Валуев, С.М. Конторов и др. «Преобразование частоты СВЧ сигнала радиофотонными методами», XVI Всероссийская школа-семинар «Волны в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова («Волны-2018»), 2018 г.

14. Конторов С.М., «Применение фотонных технологий в высокочастотных и высокоскоростных системах», VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и инженеров «Минцевские чтения - 2018», 2018 г.

15. Kontorov S.M., “Microwave photonic devices”, 2-d Meeting of BRICS Working Group on Photonics, Skoltech, March 1-2, 2018 y.

16. Конторов С. М., Фофанов Д. А., "Фотонные интегральные схемы для систем связи и радиолокации", Интеллект и технологии, N4, 19, 2017
17. Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М. и др. «Оптимизация архитектуры гетеродинного радиофотонного приемного канала». 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), Севастополь, 10-16 сентября 2017 г.
18. Конторов С.М., Фофанов Д.А., Громович А.А. «Интегральная фотоника в радиотехнических системах. Перспективы применения и актуальные научно-технические проблемы», Пленарный доклад на V Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения – 2017», 2017 г.
19. Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М. и др. «Численное и экспериментальное исследование макета радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинамирования». 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016), Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.
20. В.В. Валуев, В.В. Кулагин, С.М. Конторов и др. «Экспериментальное исследование радиофотонного приемного канала на основе оптического гетеродинамирования в диапазоне частот порядка 10 ГГц», XV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016»), 2016 г.

Работы в журналах из списка ВАК

1. Kulagin V.V., Valuev V.V., Kontorov S.M., Prokhorov D.A., Cherepenin V.A., "Formation of Broadband Microwave Signals and Multichannel Frequency Conversion with a Microwave Photonics Reference Frequency Spectrum Generator", Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume 85, pages70–75, 2021
2. В.В. Кулагин, В.В. Валуев, С.М. Конторов, Д.А. Прохоров, В.А. Черепенин, «Высокочастотный радиофотонный АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах», Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 84, № 1, с. 67-72, 2020. «Выбор редакции: лучшая публикация месяца»

3. С.М. Конторов, А.В. Шипулин, Ф. Кюпперс, В.В. Валуев, «Многоканальный радиопотонный приемный тракт». *ФОТОНИКА*. 2019; 13(6): 584-593. doi: 10.22184/1933-7296/FRos.2019.13.6.2019.584.593.

4. Валуев В.В., Гуляев Ю.В., Конторов С.М. и др. «Универсальный радиопотонный приемный канал микроволнового диапазона». *Радиотехника и электроника*, том 63, №9, стр.1020-1028 (2018).

Список литературы

1. Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники, перевод д.т.н. М.Е. Белкина, Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 376 с., ISBN 978-5-94836-445-2.

2. Ping Yang, Yue Xiao, Ming Xiao, and Shaoqian Li, “6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques”, *IEEE Network*, Volume: 33, Issue: 4, July/August 2019

3. Chris Roeloffzen, et al., “Integrated microwave photonics for 5G”, 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE, ISBN:978-1-5386-5733-1

4. D'Addario, Larry R.; Shillue, William P., “Applications of microwave photonics in radio astronomy and space communication”, *IEEE International Microwave Symposium*, San Francisco, June 17, 2006.

5. Stavros Iezekiel, “Microwave Photonics: Devices and Applications”, ISBN: 978-0-470-84854-8, 2009 Wiley-IEEE Press 360 p.

6. F. Caspers and P. Kowina, “RF Measurement Concepts”, *CAS - CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics*, pp.101-156

7. T. Schilcher, “RF applications in digital signal processing”, DOI:10.5170/CERN-2008-003.249

8. Charles Middleton, “Photonic frequency conversion for wideband RF-to-IF down-conversion and digitization”, *IEEE Avionics, Fiber- Optics and Photonics Technology Conference*, 4-6 Oct. 2011, Electronic ISBN:978-1-4244-7345-8

9. Anatol Khilo, et. al, “Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter”, *Optics Express* Vol. 20, Issue 4, pp. 4454-4469 (2012) •<https://doi.org/10.1364/OE.20.004454>

10. David Marpaung, Jianping Yao and José Capmany, “Integrated microwave photonics”, Nature photonics | VOL 13 | FEBRUARY 2019 | 80–90