

КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА РАДИОФОТОНИКИ

Герасимов Михаил Викторович

доцент кафедры радиотехники

Цель дисциплины:

изучение принципов работы фотонных устройств, работающих с широкополосными сигналами СВЧ-диапазона, и их применение в СВЧ- и оптических системах.

Задачи

дисциплины:

- формирование знаний в области фотонных технологий;
- освоение фотонных методов передачи ВЧ- и СВЧ-сигналов на большие расстояния;
- формирование знаний и умений в области использования компонентов и устройств радиофотоники для создания устройств генерации, приема и обработки сигналов радиодиапазона произвольной формы.

Лекция 1

Введение

ПЛАН ЛЕКЦИИ

- Новости из мира науки и техники.
- Что такое фотоника и радиофотоника?
- Зачем необходимо объединять радиоэлектронику и фотонику?
- Современные требования к линии передачи и оптическое волокно.
- Основные исторические события в фотонике.
- Технологии и компонентная база радиофотоники.
- Современная лаборатория радиофотоники.
- Области применения радиофотоники.
- Радиофотонные устройства.
- Учебный курс «Компоненты и устройства радиофотоники»
- Современные средства вычислительной фотоники
- Виртуальные лабораторные работы (модельные эксперименты)
- Источники информации по радиофотонике.

НОВОСТИ ИЗ МИРА НАУКИ И ТЕХНИКИ

ТЕХНОЛОГИИ

Медведев отметил необходимость развития фотоники в РФ

17:38 09.07.2014 (обновлено: 18:07 09.07.2014) 1502 12 4

Фотоника как отрасль промышленности включает в себя области науки и техники, в которых для передачи энергии и информации используется поток фотонов - аналогично тому, как в электронике для этих же целей используется поток электронов.

- ✓ «**Радиофотоника** и новые оптические квантовые материалы в электронных устройствах нового поколения являются перспективными направлениями ...»
- ✓ «К **2018 году** в России должны выйти на уровень производства гражданской продукции фотоники в **50 миллиардов рублей**. И эта отрасль должна создать порядка **60 тысяч высокотехнологичных рабочих мест** ...»

НОВОСТИ ИЗ МИРА НАУКИ И ТЕХНИКИ



- ✓ «В последние годы **электронные системы** все чаще заменяются на **фотонные**. Связано это в первую очередь с иной **физической природой** фотона ...»
- ✓ «Фотоника является аналогом электроники, использующим вместо электронов кванты электромагнитного поля – фотоны ...»
- ✓ «Фотонные системы не подвержены внешним электромагнитным полям ...»

НОВОСТИ ИЗ МИРА НАУКИ И ТЕХНИКИ

В России завершается создание «радаров будущего» на основе технологий радиофотоники

30 декабря 2015, 13:00 • 398 • Россия



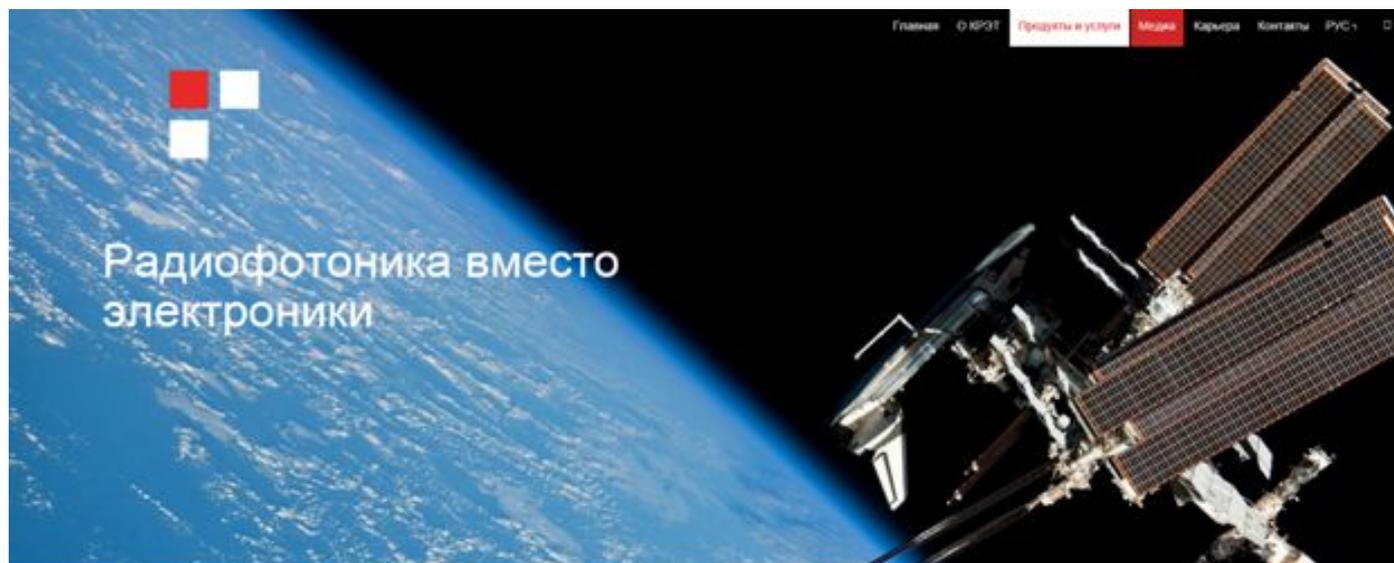
- ✓ «Российский истребитель пятого поколения **ПАК ФА (Т-50)** может быть оснащен разрабатываемым в России радаром, основанным на использовании радиооптических фазированных антенных решеток (**РОФАР**) ...»
- ✓ «Радиооптические фазированные антенные решетки (РОФАР) значительно расширят возможности современных средств связи и радаров – их масса снизится **более чем вдвое**, а разрешающая способность увеличится **в десятки раз** ...»
- ✓ «Сверхширокополосность сигнала РОФАР позволяет получить практически **телевизионное изображение в радиолокационном диапазоне**. Технология радиофотоники, в частности, должна открыть новые возможности для улучшения «**умной обшивки**» на российских вертолетах и самолетах последнего поколения ...»

КОНЦЕРН «РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

- крупнейший российский центр приборостроения мирового уровня
- объединяет 97 предприятий радиоэлектронной промышленности
- входит в состав Государственной корпорации «Ростех»
- общая численность сотрудников около 50 тыс. человек
- один из мировых лидеров в области создания средств и комплексов РЭБ, систем государственного опознавания



КОНЦЕРН «РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»



23 APR 2015
НОВОСТИ



Радиофотоника вместо электроники

Концерн создает лабораторию для исследований в области фотоники

12 NOV 2015
НОВОСТИ



Радиофотоника и технологии будущего

Первый замглавы КРЭТ – о последних разработках в сфере РЭБ, исследованиях в области радиофотоники и планах на 2016 год

КОНЦЕРН «РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Проект «Разработка активной фазированной решетки на основе радиофотоники» включает в себя **создание специальной лаборатории** на базе предприятий Концерна и разработку универсальной технологии, которая будет положена в основу радаров и систем РЭБ нового поколения.

По словам гендиректора КРЭТ Николая Колесова, новейшие технологии позволят уже в 2020 годах создавать эффективные и продвинутое приемно-передающие **устройства**, радиолокационные станции, системы радиотехнической разведки и радиоэлектронного противодействия **нового поколения**.

Одним из главных направлений работы станет создание активной фазированной антенной решетки (АФАР) нового поколения, в которой основные элементы созданы с использованием принципов радиофотоники – **радиооптической фазированной антенной решетки (РОФАР)**. Они позволят снизить массу аппаратуры в 1,5-3 раза, увеличить в 2-3 раза ее надежность и КПД, а также в десятки раз повысить скорость сканирования и разрешающую способность, то есть получить принципиально новые ТТХ для РЛС, то есть возможность радиолокационного «зрения».

Кроме того, на основе новых материалов и элементной базы, созданных на базе принципов фотоники, КРЭТ освоит перспективные технологии изготовления **мощных фотодетекторов**, а также **полупроводниковых лазерных модулей**.

Работа, рассчитанная на 4,5 года, ведется в строгом соответствии с тем графиком, который нами был согласован с Фондом перспективных исследований. Лабораторные исследования отдельных элементов сейчас уже идут. Из этих элементов будет строиться РОФАР. **До 2018 года КРЭТ уже покажет натурный образец РЛС.**

КОНЦЕРН «РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ПАК ФА (СУ-57)

Перспективный авиационный комплекс фронтовой

«Умная обшивка»

Использование поверхности самолета в качестве универсальных антенных систем для комплексного использования всего ресурса самолета.



В случае успеха технология откроет новые возможности для улучшения характеристик «умной обшивки», которая будет на российских самолетах последнего поколения.

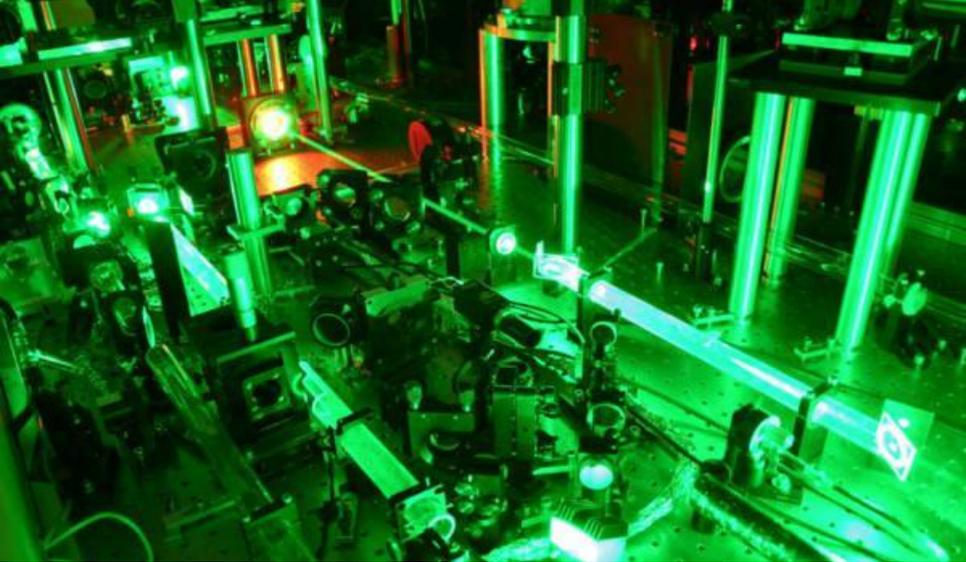
Такая **система встроенных элементов по всей площади фюзеляжа** позволит экипажу получать в любой момент времени цельную **радиолокационную картину в радиусе 360 градусов**, обеспечит работу антенных систем в режиме активной и пассивной радиолокации, постановку всех видов помех, скрытную и помехоустойчивую передачу данных, связь с землей и другими воздушными судами, госопознавание и другое.

Вопрос:

***ЧТО такое фотоника и
радиофотоника?***

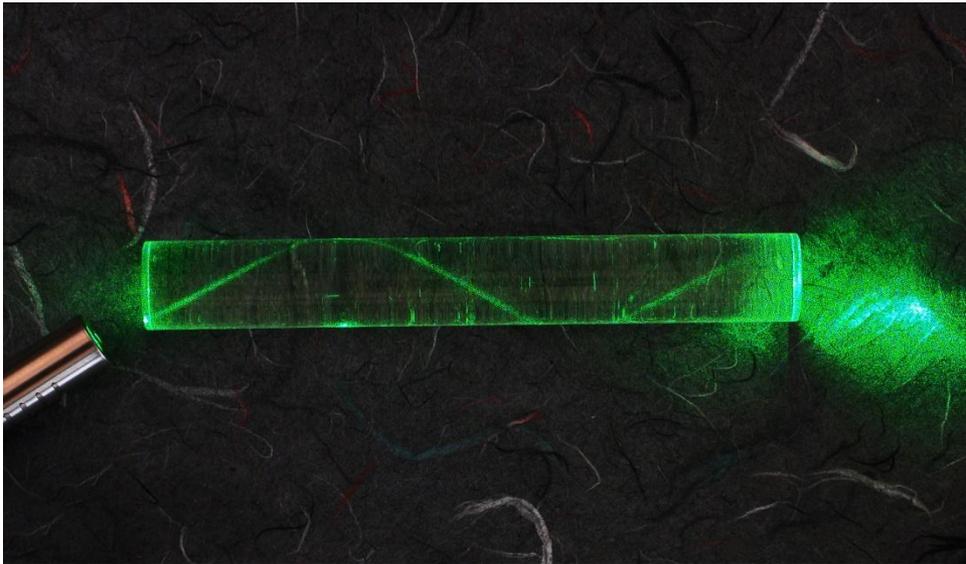
ФОТÓНИКА (англ. *PHOTONICS*)

- ✓ *(По определению Европейской Ассоциации Фотоники)*
Фотоника занимается теми же самыми задачами, что и классическая электроника, но в качестве инструмента использует не поток электронов (электрический ток), а поток **фотонов** (кванты электромагнитного поля), который используется для преобразования, хранения, обработки и воспроизведения информации.
- ✓ Научное направление, занимающееся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами и изучающее способы построения устройств и систем хранения, обработки и передачи данных с помощью модулируемых потоков **фотонов**.
- ✓ Изучает генерацию, управление и детектирование **фотонов** в видимом и ближнем к нему спектре. В том числе, на ультрафиолетовой (длина волны 10...380 нм), длинноволновой инфракрасной (длина волны 15...150 мкм), где сегодня активно развиваются квантовые каскадные лазеры.
- ✓ Охватывает широкий спектр оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств и их разнообразных применений. Области исследований **фотоники** включают волоконную и интегральную оптику, в том числе нелинейную оптику, физику и технологию полупроводниковых соединений, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные устройства, высокоскоростные электронные устройства.
- ✓ Термины «оптика» и «электроника» постепенно заменяются обобщенным названием – «**фотоника**».



Первым важным техническим устройством, использующим фотоны, был **лазер**, изобретенный в 1960 году.

В 1980-х, после того как в мире начали широко использовать **ВОЛОКОННО-оптические линии передачи**, получил распространение и термин «фотоника».



До самого конца XX века фотоника в значительной степени была сконцентрирована на **телекоммуникациях**. В частности, она стала основой для развития Интернета.

РАДИОФОТОНИКА (англ. *MICROWAVE PHOTONICS*)

- ✓ Сегодня на смену «телекоммуникационной» фотонике приходит **радиофотоника**.
- ✓ Это новое **междисциплинарное** направление возникло на стыке:
 - *радиоэлектроники,*
 - *волновой оптики,*
 - *СВЧ-оптоэлектроники,*
 - *ряда других отраслей науки и промышленного производства.*
- ✓ Научное направление, занимающееся передачей информации с помощью электромагнитных волн СВЧ-диапазона и фотонных приборов и систем, что позволяет создавать радиочастотные устройства с параметрами, недостижимыми для традиционной электроники.
- ✓ **Радиофотоника** (микроволновая фотоника, **Microwave Photonics**) – изучает взаимодействие между оптическим сигналом и высокочастотным (больше 1 ГГц) электрическим сигналом.
- ✓ Фотоны, в отличие от электронов, не имеют массы и заряда. Фотонные системы не подвержены влиянию внешних электромагнитных полей и обладают гораздо большей **дальностью передачи** и **шириной полосы пропускания сигнала**.
- ✓ **Радиофотоника** объединяет обширный комплекс областей науки и техники, связанных с проблемами **передачи, приёма и преобразования информации** с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем.

Вопрос:

**ЗАЧЕМ необходимо объединять
радиоэлектронику и фотонику?**

Среда передачи информации

Основные определения:

- ✓ Среда передачи данных – физическая среда, по которой происходит передача сигналов, использующихся для представления информации.
- ✓ Радиоволны – электромагнитные волны с частотой меньше 6000 ГГц (с длиной волны больше 100 мкм).

Среда передачи данных	
Естественная	Искусственная
существующая в природе среда: <ul style="list-style-type: none">• атмосфера,• безвоздушное пространство,• вода,• грунт,• и т.д.	специально изготовленная для использования в качестве среды передачи данных: <ul style="list-style-type: none">• электрический кабель,• волновод,• волоконно-оптический кабель.

Особенности сред передачи информации

Атмосфера

Наибольшее распространение в качестве носителей данных в атмосфере получили электромагнитные волны. Спектр электромагнитного излучения делится на радиоизлучение, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение. В настоящее время в связи с техническими трудностями ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение не используются.

- ✓ **Необходимость лицензирования** передающей радиостанции, превышающей ограничение на выходную мощность.
- ✓ От длины волны зависит **характер распространения электромагнитных волн** в атмосфере. При использовании радиоволн с миллиметровыми длинами волны и менее, придется столкнуться с тем, что **качество радиосвязи** будет зависеть **от состояния атмосферы** (туман, дым и т.д.).

Электрический кабель

При выборе кабеля, особенно электрического, возникает противоречие между достижением высокой скорости передачи и покрытием большого расстояния.

Волоконно-оптический кабель

К недостаткам следует отнести высокую стоимость и меньшее число возможных перекоммутаций по сравнению с электрическими кабелями (появление микротрещин в месте коммутации, что ведет к ухудшению качества оптоволоконной линии).

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ КАБЕЛЕЙ

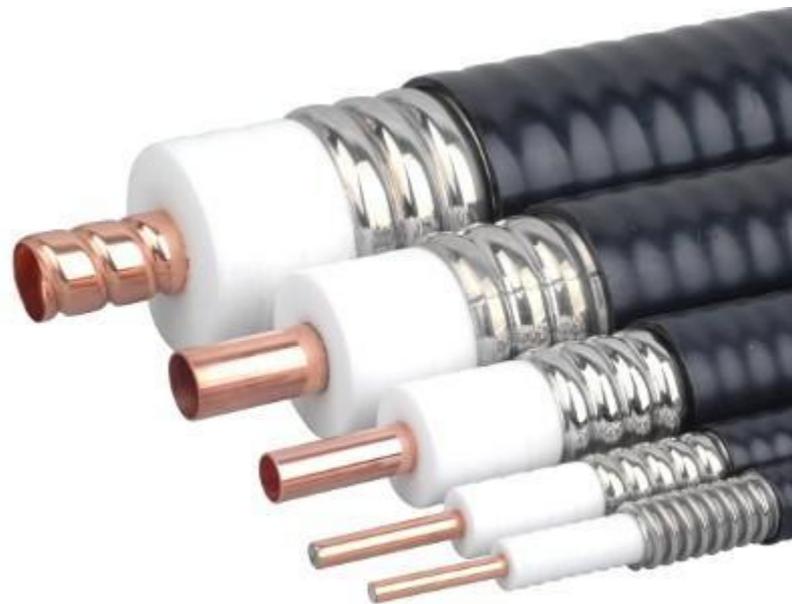
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ: для передачи сигналов используется *металлический проводник*.

Коаксиальный (coaxial),

Важное достоинство – способность передавать в один и тот же момент множество сигналов. Каждый такой сигнал называется каналом. Все каналы организуются на разных частотах, поэтому они не мешают друг другу.

Коаксиальный кабель обладает **широкой полосой пропускания (до 10^2 ГГц)**; это означает, что в ней можно организовать **передачу трафика на высоких скоростях**. Он также устойчив к электромагнитным помехам (по сравнению с витой парой) и **способен передавать сигналы на большое расстояние** (но с ограничением полосы пропускания).

Представляет собой два соосных гибких металлических проводника, разделенных диэлектриком. Внутри кабеля размещена **центральная жила** (проводник), окруженная **изоляционным материалом** (диэлектриком). Указанный слой изоляции охвачен тонким **металлическим экраном**. Ось металлического экрана совпадает с осью внутреннего проводника - отсюда и следует название "коаксиал". Внешней частью кабеля является пластиковая оболочка.



ОСНОВНЫЕ ВИДЫ КАБЕЛЕЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ: для передачи сигналов используется *металлический проводник*.

Витая пара (twisted pair)

Кабель, в котором изолированная пара проводников скручена с небольшим числом витков на единицу длины для уменьшения наводок от внешних источников и перекрестных наводок от одного проводника другому проводнику из одной и той же пары.

Современные достижения сделали возможной передачу данных по кабелю на витой паре со скоростью **1 Гбит/с** (по 250 Мбит/с в каждой из 4 пар). При этом полоса пропускания ограничена частотой **0,2 ГГц**.

Такой кабель тонкий и гибкий. Витая пара является идеальным средством передачи данных для офисов, где нет электромагнитных помех..

Однако, витая пара обладает следующими недостатками: наличие электромагнитных наводок, возможность утечки информации. Кроме того, проводники витой пары подвержены поперечному току, электрический ток вытесняется из центра поперечной площадью проводника и дополнительному ослаблению сигнала.



ОСНОВНЫЕ ВИДЫ КАБЕЛЕЙ

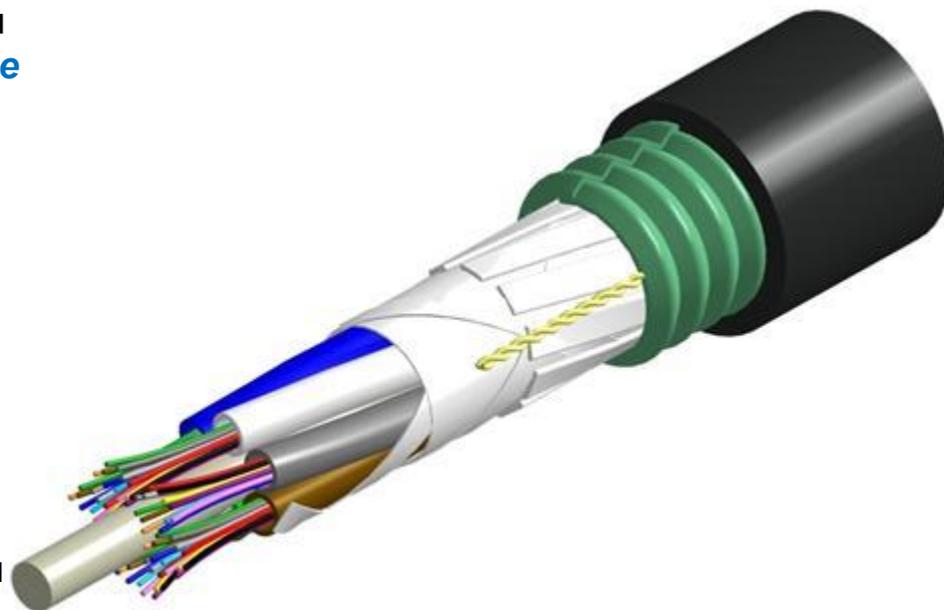
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ: для передачи сигналов используют **оптическое волокно** – световод.

Волоконно-оптический кабель

(fiber-optic cable)

Такой кабель имеет **огромную ширину полосы пропускания** и может пересылать сигналы данных **на очень большие расстояния**. Для передачи данных использует световые импульсы, а не электричество, и оказывается **невосприимчивым к электромагнитным помехам**. Обеспечивает скорость передачи информации до **20 Тбит/с** на одно волокно. Обеспечивает более высокую безопасность информации, чем медный кабель – контроль несанкционированного подключения.

По своей структуре волоконно-оптический кабель подобен коаксиальному кабелю. Однако вместо центральной жилы в его центре располагается стержень, или **сердцевина**, которая окружена не просто диэлектриком, а **оптической оболочкой**, которая, в свою очередь, окружена буферным слоем (слоем лака), элементом усиления и внешним покрытием.



ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ линии передачи

Теорема **Шеннона-Хартли в теории информации** утверждает, что пропускная способность канала C , означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных, которые можно передать с данной средней мощностью сигнала S через аналоговый канал связи, подверженный аддитивному белому гауссовскому шуму мощности N равна

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где C – пропускная способность канала (**бит/с**), B – **полоса пропускания** канала (**Гц**),
 S – полная мощность сигнала над полосой пропускания (**Вт**), N – полная шумовая мощность сигнала над полосой пропускания (**Вт**), S/N – отношение мощности сигнала к шуму (SNR)

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

1. **Большая пропускная способность**, обеспечивающая требуемую скорость передачи информации, что приводит к необходимости повышения частоты несущей.

Для выполнения первого требования необходима широкая полоса пропускания B (по теореме Шеннона-Хартли). Современный уровень техники позволяет использовать СВЧ-диапазон: **до 100 ГГц**.

2. **Передача информации на большое расстояние**, что приводит к ослаблению полезного сигнала.

Для выполнения второго требования необходимо малое затухание сигнала. Для волоконно-оптического кабеля: до 0,15 дБ/км в третьем окне прозрачности.

3. **Использование аналогового сигнала**, что связано с отсутствием быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей в СВЧ-диапазоне.

Скорость преобразования в параллельных АЦП достигает 500 миллионов отсчетов в секунду (500 MSPS). По теореме Котельникова максимальная частота входного сигнала при этом может достигать 250 МГц.

4. **Малые габариты и масса**

Сравнение веса и ослабления сигнала для волоконно-оптических и коаксиальных кабелей является особенно убедительным: как правило, **1,7 кг/км и 0,5 дБ/км** для оптического волокна; **567 кг/км и 360 дБ/км** (на частоте **2 ГГц**) для коаксиального кабеля.

ОСЛАБЛЕНИЕ СИГНАЛА В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Сравнение ослабления сигнала для коаксиальной и волоконно-оптической линий передачи

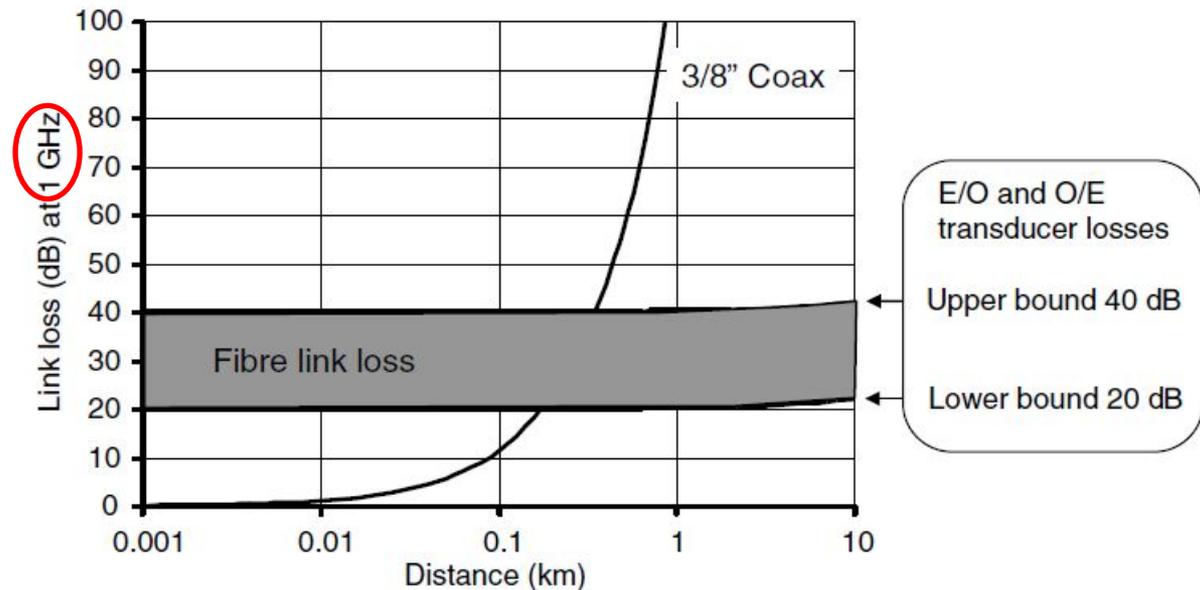


Figure 1.6 Comparison of typical coaxial cable loss compared to standard single-mode fibre; between 20 dB and 40 dB of E/O and O/E transducer losses are included for the fibre

Проблема: Значительная потеря мощности сигнала при его распространении по коаксиальному кабелю (для частоты **100 ГГц** не менее **2000 дБ/км**). Это приводит к ограничению длины линии передачи несколькими метрами (при желании сохранения широкой полосы пропускания).

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО – среда передачи с низкими потерями



Окна прозрачности:

$\lambda = 0,85$ мкм,
 $\lambda = 1,3$ мкм,
 $\lambda = 1,55$ мкм.

Окна прозрачности оптических волокон

Решение: Использование СВЧ-сигнала для модуляции электромагнитной волны значительно большей частоты f_0 – частоты оптической несущей. В качестве несущей используется волна с частотой в оптическом диапазоне шкалы электромагнитных волн ($f_0 \approx 10^{14}$ Гц).

ОСНОВНЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В ФОТОНИКЕ

**1970-е
годы:**

1. появление первых **полупроводниковых лазеров** и **электрооптических модуляторов**, пригодных для модуляции в СВЧ-диапазоне частот;
2. создание многомодовых и одномодовых **оптических световодов** (кварцевых волокон) **с низкими потерями**;
3. разработка **быстрых p-i-n** и **лавинных фотодетекторов**, имеющих полосу пропускания до десятков гигагерц (субнаносекундное временное разрешение).

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ

ВОЛП – волоконно-оптическая система, состоящая из активных и пассивных элементов, предназначенная для передачи информации в оптическом (как правило — ближнем инфракрасном) диапазоне.

Активные компоненты

- ✓ Лазер — источник монохромного когерентного оптического излучения (генератор оптической несущей).
- ✓ Модулятор — устройство, модулирующее оптическую волну, несущую информацию по закону электрического сигнала, и осуществляющее электрооптическое преобразование сигнала.
- ✓ Усилитель (оптический) — устройство, усиливающее мощность сигнала.
- ✓ Фотоприёмник — устройство, осуществляющее оптоэлектронное преобразование сигнала.

Пассивные компоненты

- ✓ оптический кабель
- ✓ разветвители
- ✓ циркуляторы
- ✓ фильтры и др.



Простая блок-схема линии передачи

- *передающий блок (трансммиттер)*
- *волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛП)*
- *приемный блок (ресивер).*

ГЛАВНЫЙ ВОПРОС (ЗАЧЕМ?) ИЛИ ГЛАВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА РАДИОФОТОНИКИ

- **повышение рабочей частоты** до терагерцевого диапазона,
- **расширение полосы обработки** до нескольких гигагерц,
- **улучшении электромагнитной совместимости,**
- **улучшение массогабаритных характеристик.**

ВТОРОЙ ВОПРОС (КАК?)

ИЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

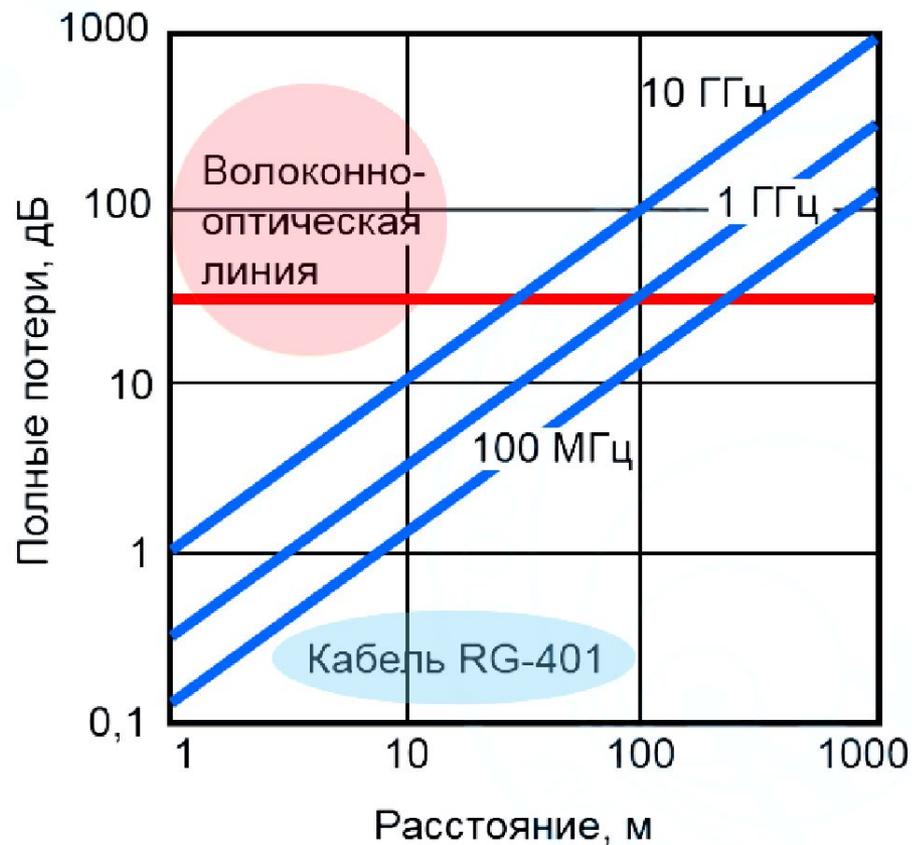
носитель информации: *фотон*

среда распространения: *кварцевое оптическое волокно*

- преломление,
- поглощение,
- рассеяние,
- оптическая анизотропия
- поляризация
- дисперсия
- ...

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЙ НЕДОСТАТОК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

- необходимость операций **прямого и обратного преобразований** в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала.
- однако, их влияние компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне



КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОФОТОННЫХ КОМПОНЕНТ

Фотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОФОТОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

5 типов компонентов (преобразователей) радиофотоники:

оптико-электрический преобразователь

(1), *полупроводниковый фотодиод*;

электрооптический преобразователь (2),

полупроводниковый лазер;

преобразователь оптического сигнала (3),

оптический модулятор, лазерный

усилитель, электрооптический

смеситель;

преобразователь СВЧ-сигнала (4), СВЧ-

усилитель, коэффициент усиления

которого регулируется оптическим

сигналом, *оптоэлектронная схема*

задержки, оптоэлектронный

смеситель

преобразователь оптического сигнала с оптической

накачкой (5), *эрбиевый, рамановский и*

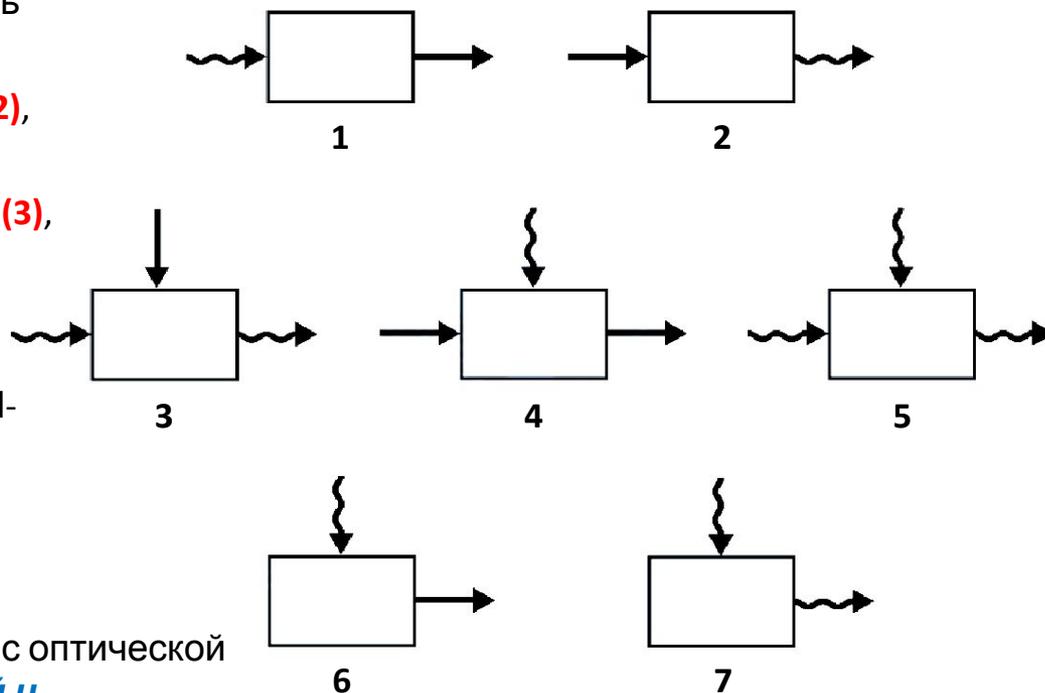
бриллюэновский волоконные усилители;

генератор СВЧ-сигнала с оптическим управлением (6),

оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов;

генератор оптического сигнала с оптической накачкой

(7), *эрбиевый волоконный генератор*.



→ СВЧ-сигнал

~ оптический сигнал

Радиофотонные технологии позволяют:

- ✓ **улучшить производительность** фотонных коммуникационных сетей и систем,
- ✓ **создавать сложные СВЧ-системы**, которые в ряде случаев **невозможно реализовать в радиочастотной области непосредственно радиотехническими методами.**

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ

- ✓ улучшить производительность фотонных коммуникационных сетей и систем,

РЕЗУЛЬТАТЫ использования фотонной линии для передачи *аналоговых электрических сигналов* в СВЧ-диапазоне:

- ✓ Большая пропускная способность – до 20 Тбит/с (полоса пропускания более 4 ТГц);
- ✓ Передача информации на большое расстояние – более 100 км без регенерации;
- ✓ Низкое и постоянное затухание (до 0,15 дБ/км) по всему СВЧ-диапазону частот модуляции – слабая зависимость потерь от частоты во всей рабочей полосе (полосе пропускания).

КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА РАДИОФОТОНИКИ

	Компоненты	Предназначение
1	Оптическое волокно	Среда передачи информации
2	Лазер	Генератор оптической несущей
3	Невзаимный элемент	Элемент согласования
4	Электрооптический модулятор	Модуляция оптической несущей СВЧ-сигналом
5	Брэгговская решетка	Оптический фильтр и дисперсионный элемент
6	Оптический ретранслятор	Усиление оптического сигнала
7	Фотодетектор	Приемник оптического сигнала и демодулятор

ООО "Специальные Системы"

<http://sphotonics.ru>



+7 (812) 385-72-97

[Заказать звонок](#)

+7 (812) 385-76-48

Факс

[Моя корзина](#)

[Каталог](#) | [Производители](#) | [Решения](#) | [Статьи](#) | [О Компании](#) | [Контакты](#) |

О компании

ООО "Специальные Системы" является специализированным дистрибьютором:

лазерно-оптических изделий,

волоконной оптики,

лабораторного оборудования

Миссия

Внедрение передовых лазерно-оптических технологий и продукции в производственные процессы, текущие и перспективные разработки российских научных и производственных центров.

Активное участие в развитии **фотоники** в России, как наиболее перспективного направления науки и технологий.



ЛАЗЕРЫ, ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

[Твердотельные лазеры](#)
[Лазеры с волоконным выводом](#)
[Лазерные диоды](#)
[Матрицы и сборки лазерных диодов](#)



ОПТОМЕХАНИКА, ТРАНСЛЯТОРЫ, ОПТИЧЕСКИЕ СТОЛЫ

[Оптические столы и плиты](#)
[Оптомеханика, оправы, держатели](#)
[Позиционеры, трансляторы, подвижки](#)
[Моторизированные позиционеры](#)



ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА, КОМПОНЕНТЫ И ПРИБОРЫ

[Специальные оптические волокна](#)
[Волоконно-оптические компоненты](#)
[Оптические усилители](#)
[Приборы для волоконной оптики](#)



РАДИОФОТОНИКА, ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

[Компоненты и модули радиофотоники](#)
[Передача РЧ/СВЧ по волокну](#)
[Волоконно-оптические модуляторы](#)
[Оптические линии задержки](#)



ФОТОДИОДЫ, ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ

[Фотодиоды и фотоприемники \(PIN, APD\)](#)
[Фотоприемные модули и приборы](#)
[Анализ параметров лазерного излучения](#)
[Спектральные приборы и системы](#)



ЭЛЕМЕНТЫ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

[Акустооптика, модуляторы, затворы](#)
[Электрооптика, ячейки Погкельса](#)
[Оптика, оптические компоненты](#)
[Лазерные кристаллы, нелинейная оптика](#)

СОВРЕМЕННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ РАДИОФОТОНИКИ

Fiber Bragg grating fabrication facility (Innova 300C frequency-doubled ion laser) (1 unit)
Agilent E8364A 50 GHz **vector network analyzer** (1)
Ando AQ6317B **optical spectrum analyzers** (2 units)
Agilent E4448A 50 GHz **microwave spectrum analyzer** (1 unit)
Agilent E8254A 40 GHz **microwave signal generator** (1 unit)
Tektronix AWG710210 GS/S 8/10 BIT, 32M POINT, 2 CHANNEL **arbitrary waveform generator**
Agilent 33250A 80 MHz **function generator** (1 unit)
IMRA femtolite780 **Femtosecond laser source** (1 unit)
HP/Agilent 8509C **Polarization Analyzer** (1 unit)

Tunable laser sources

- Anritsu MG9638A
- Santec TSL-200
- Yokogawa AQ2201
- Photonetics PRI Tunable Laser SWS15101

Photodetectors

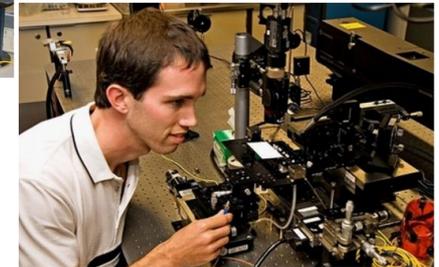
- New Focus High-speed photodetectors (25 GHz x 2, Model:1414, 45 GHz x 2, Model:1014)
- Nortel 10 GHz photodetector (5 units)
- U2T photonics 100 GHz photodetector (XPDV4120R)
- Optilab 40 GHz photodetector (PD-40-M)
- Discovery Semiconductors Ultra-fast InGaAs Pin Diodes to 60 GHz (DSC10ER-39-FC/UPC-V-2)
- Discovery Semiconductors DSC740 40 GHz Balanced Photo-Detector (DSC740)

Modulators

- JDSU High-speed electro-optic intensity modulators (10 GHz x 3, Model:10021840, 20 GHz x 1, Model:10026465)
- JDSU 20 GHz High-speed electro-optic phase modulators (2 units, Model:10023874)
- Thorlabs 40 GHz High-speed electro-optic phase modulators (2 units, Model:LN27S-FC and LN66S-FC)
- Optilab 40 GHz Analog Modulator (2 units, Intensity Modulator, Model: IM-1550-40-PM)
- JGKB 40-GHz polarization modulator (3 units, 1 unit of half-wave voltage 5 V, 2 units of half-wave voltage 3 V, Model:PL-40G-3-1550)
- Lucent 10 GHz Intensity Modulator (5 units, Model:2623CSA)

Dispersion compensating fibers

- Cisco DCU-W-N-0600-R (-609ps/nm)
- Fujitsu FC9686DCL3 (-1020ps/nm)
- BTI BP1A10CC-LC (-680ps/nm)
- Lucent DK-340 (-339ps/nm)



ГЛАВНЫЙ ВОПРОС – ЗАЧЕМ? ИЛИ ГЛАВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА РАДИОФОТОНИКИ

✓ **Радиофотоника** изучает взаимодействие между **оптическим** сигналом и высокочастотным **электрическим** сигналом (больше 1 ГГц) .



- **повышение рабочей частоты** до терагерцевого диапазона
- **расширение полосы обработки** до нескольких гигагерц
- **улучшении электромагнитной совместимости**
- **улучшение массогабаритных характеристик**



✓ **Радиофотоника** позволяет создавать радиочастотные устройства с параметрами, недостижимыми для традиционной **электроники**.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОФОТОНИКИ

Р. П. Быстров и др. Журнал радиоэлектроники. №6, ISSN 1684-1719 (20 17)



РАДИОФОТОННЫЕ УСТРОЙСТВА

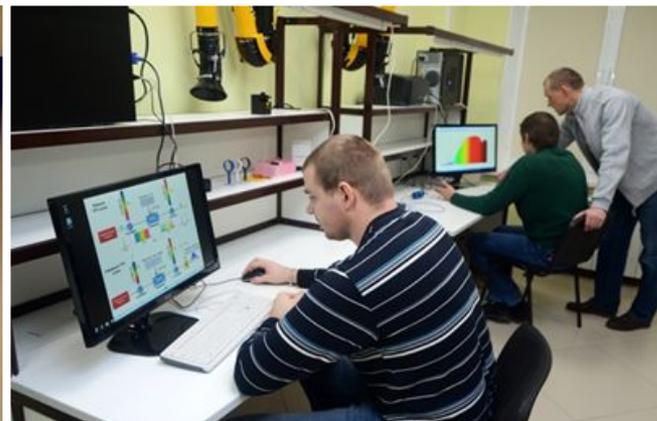
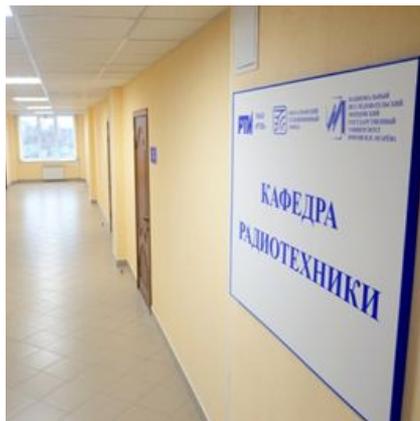
✓ создавать сложные СВЧ-системы, которые в ряде случаев невозможно реализовать в радиочастотной области непосредственно радиотехническими методами.

- **СВЧ-генератор с высокой чистотой спектра** на основе оптических резонаторов.
- **Генератор терагерцевого излучения** на основе смешивания сигналов двух лазеров при использовании генератора сетки оптических частот и фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ).
- **СВЧ-генератор произвольной формы** на основе волоконной брэгговской решетки.
- **Радиофотонный фильтр с конечной импульсной характеристикой** на линиях задержки.
- **Перестраиваемый узкополосный СВЧ-фильтр** на основе волоконной брэгговской решетки.
- **Волоконный временной дифференциатор оптических сигналов** на основе волоконной брэгговской решетки.
- **Активная фазированная антенная решетка** на основе одномерной ВБР-призмы

Учебный курс

**«Компоненты и
устройства
радиофотоники»**

УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ ФОНД КАФЕДРЫ РАДИОТЕХНИКИ НА ОАО «СТЗ»



В 2015 году по инициативе и при финансировании ОАО «СТЗ» подготовлен учебно-лабораторный фонд кафедры радиотехники на предприятии.

Цель создания: обеспечение условий для проведения учебных занятий со студентами специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» на территории предприятия с участием специалистов предприятия в течение полного учебного дня.



СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

№ п/п	Раздел (тема) учебной дисциплины (модуля)
1.	Введение
2.	Физические основы компонентной базы радиофотоники
3.	Оптическое волокно – среда передачи информации
4.	Лазер – генератор оптической несущей
5.	Невзаимный элемент – элемент согласования
6.	Электрооптический модулятор – модуляция оптической несущей СВЧ-сигналом
7.	Брэгговская решетка – оптический фильтр и дисперсионный элемент
8.	Оптический ретранслятор – усиление оптического сигнала
9.	Фотодетекторы – приемник оптического сигнала и демодулятор
10.	Радиофотонные устройств
11.	Заключение

№ п/п	Тема лабораторных работ
1.	Изучение возможностей программного комплекса OptiPerformer
2.	Моделирование волоконно-оптической линии передачи.
3.	Исследование спектральных характеристик полосно-пропускающего фильтра, построенного с использованием волоконной брэгговской решетки.
4.	Исследование дисперсионных свойств чирпированной волоконной брэгговской решетки.
5.	Исследование режимов работы электрооптического модулятора Маха-Цандера и моделирование радиофотонного аналогового процессора.
6.	Исследование оптоэлектронного СВЧ-генератора

Основное внимание уделяется физическим принципам работы и техническим характеристикам радиофотонных компонентов

Ключевой вопрос:

**ВОЗМОЖНО ЛИ заменить
числовым моделированием
необходимые лабораторные
эксперименты?**

ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Существующие инструменты моделирования обеспечивают **широкий диапазон возможностей**:

- ✓ различные виды модуляции оптической несущей,
- ✓ реалистические источники шумов,
- ✓ нелинейные и дисперсионные эффекты,
- ✓ поляризационные эффекты,
- ✓ другое.

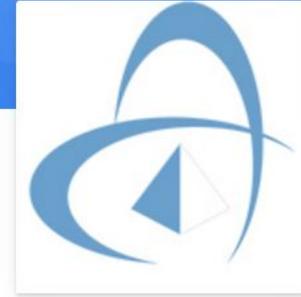
Часто, когда физические испытания и лабораторные эксперименты слишком дороги, численное моделирование играет ключевую роль при проектировании интегральных волноводных систем.

ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Достижения в области интегрально-оптических элементов фотоники, особенно монокристаллических, **увеличили потребность в их точном автоматизированном проектировании**. В отличие от интегральных электрических схем на относительно низких частотах, **расчет фотонных структур чрезвычайно труден**, и по существу **невозможно корректировать характеристики монокристаллических устройств**, если они уже изготовлены. Следовательно, **точные методы расчета и программы автоматизированного проектирования необходимы** для создания этих устройств.

Исходной точкой развития **вычислительной фотоники** является анализ геометрии или топологии структуры интегрального фотонного элемента. Анализ структуры интегральных элементов связан с нахождением **функции оптического поля**, удовлетворяющей **уравнениям Максвелла** или производным от них; удовлетворяющей **граничным и начальным условиям**, а так же учитывающей **свойства среды** и условия возбуждения поля **в волноводной структуре**.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ



Optiwave Systems Inc.

С момента своего создания в 1994 году программное обеспечение **Optiwave** было лицензировано для более чем **1000** ведущих в отрасли корпораций и университетов в более чем **75** странах мира. Сегодня **Optiwave** предлагает своим клиентам самое современное программное обеспечение для автоматизации фотонного проектирования, значительно сокращая время выхода на рынок, значительно улучшая качество, производительность и экономичность.

Since its inception in 1994, Optiwave's software has been licensed to more than 1000 industry-leading corporations and universities in over 75 countries worldwide. Today, Optiwave's cutting-edge photonic design automation software and customized engineering design services offer its customers a distinct competitive advantage, by vastly shortening their time to market while dramatically improving quality, productivity and cost-effectiveness.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ



OptiSystem

Программа системного и имитационного анализа интегрально-оптических устройств:

Моделирование одномодовых и многомодовых систем связи. Системы со спектральным уплотнением.

Системный и имитационный анализ включает оценку выходных характеристик отдельных компонент и устройств в целом.

OptiGrating

Одна из программ модального анализа, позволяющая разрабатывать модели отдельных компонентов интегрально-оптических устройств:

Мультиплексоры/демультиплексоры, волоконные брэгговские рефлекторы, оптические усилители, компенсаторы дисперсии, волоконные и волноводные датчики.

Модели отдельных компонентов интегрально-оптических устройств необходимы при системном и имитационном анализе.

САПР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМ

- Необходимость в **точном автоматизированном проектировании** элементов фотоники.
- Возможность **совмещения фотонных, радиофотонных и радиоэлектронных компонентов** в одном проекте.
- Системный и имитационный анализ включает **оценку выходных характеристик отдельных компонент и устройств** в целом.
- Моделирование на различных уровнях: от «черного ящика» до детализации физических процессов.
- Обширная библиотека активных и пассивных фотонных, радиофотонных и радиоэлектронных компонент.



Программный комплекс **OptiSystem** для выполнения системного и имитационного анализа интегрально-оптических устройств.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Для практического знакомства с радиофотонными системами разработаны виртуальные лабораторные работы, позволяющие исследовать:

- ✓ спектральные и дисперсионные характеристики полосно-пропускающего фильтра, построенного с использованием волоконной брэгговской решетки;
- ✓ режимы работы электрооптического модулятора Маха-Цандера;

Подготовлено учебное пособие по моделированию ВБР



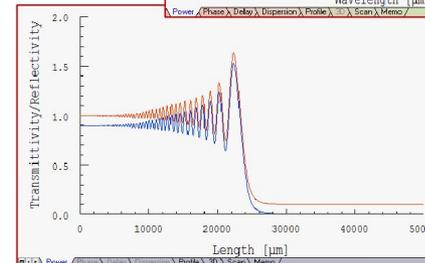
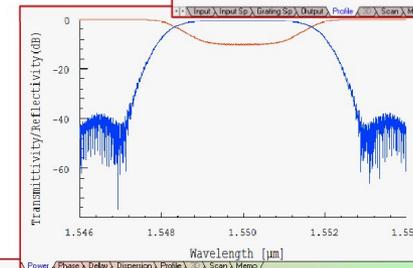
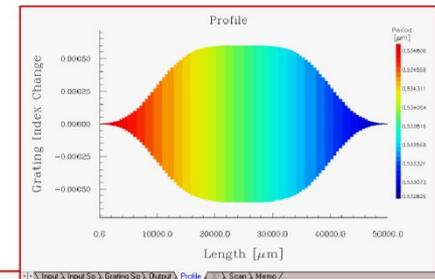
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. П. ОГАРЁВА

Учебное пособие

по работе с программным комплексом *OptiGrating*
от *Optiwave System Inc.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ

Герасимов М. В.



РАСЧЕТНЫЕ РАБОТЫ

Одним из главных параметров волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) является **оптический бюджет**. При расчете оптического бюджета на практике необходимо определять следующие параметры линии:

- выходную мощность источника света;
- потери в оптическом волокне;
- потери, связанные с несоответствием как диаметра выходного светового пучка источника излучения и диаметра сердцевины оптического волокна, так и числовых апертур источника излучения и оптического волокна;
- потери от оптических разъемов и сростков (неразъемных сварных соединений);
- потери в электрооптическом модуляторе;
- потери фильтров и других спектральных устройств;
- потери разветвителей;
- потери в оптических изоляторах;
- дисперсию оптического волокна;
- коэффициент усиления оптических усилителей
- эквивалентную мощность шума детектора;
- полосу пропускания радиофотонной линии передач.

Проектируемая ВОЛП может быть ограничена как по **потерям**, так и по **дисперсии**, что определяет бюджет ВОЛП по **оптической мощности** и по **времени нарастания** (по полосе пропускания), соответственно.

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева»

Институт физики и химии

Кафедра радиотехники

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА РАДИОФОТОННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Методические указания
к выполнению курсовой работы
по дисциплине
КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА РАДИОФОТОНИКИ

Составитель:
М. В. Герасимов,
доцент кафедры радиотехники

Саранск
2018

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМ

OptiSystem

OptiSystem - [LiNb_Modulator_Settings__2016-01-11]

File Edit View Layout Tools Report Script Add-Ins Window Help

Layout 1 Sweep Iteration 1

Component Library

- Default
- Custom
- Favorites
- Recently used
- Subsystems

Layout: Layout 1

Bit rate (bits/sec): 1e+010 Sequence length (bits): 8

Author: Samples per

Peak operating point

Bias ($V_{dc} = 0$); $V1-V2 = 0$
 $V_{pi} = 4$; $V_{rf} = 4$
Maximum voltage delta is 4 (V_{pi})

Sine Generator
Frequency = 5 GHz
Amplitude = 2 a.u.
Bias = 0 a.u.
Phase = 0 deg

CW Laser
Frequency = 193.1 THz
Power = 0 dBm

Fork 1x2

LiNb Mach-Zehnder Modulator
Switching bias voltage = 4 V
Switching RF voltage = 4 V
Bias voltage1 = 0 V
Bias voltage2 = 0 V

Electrical Gain
Gain = -1

Oscilloscope Visualizer

Optical Time Domain Visualizer

Oscilloscope Visualizer_1

Null operating point

Bias ($V_{dc} = V_{pi}$); $V1-V2 = V_{pi} = 4$
 $V_{pi} = 4$; $V_{rf} = 4$
Maximum voltage delta is 8 ($2V_{pi}$)

Sine Generator_1
Frequency = 5 GHz
Amplitude = 2 a.u.
Bias = 2 a.u.
Phase = 0 deg

CW Laser_1
Frequency = 193.1 THz
Power = 0 dBm

Fork 1x2_1

LiNb Mach-Zehnder Modulator_1
Switching bias voltage = 4 V
Switching RF voltage = 4 V
Bias voltage1 = 0 V
Bias voltage2 = 0 V

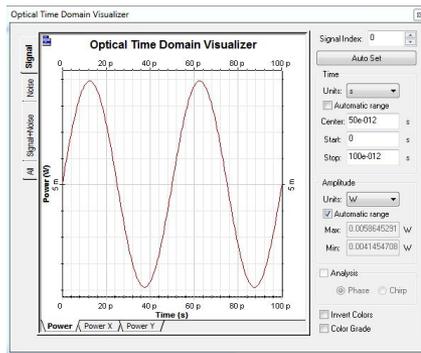
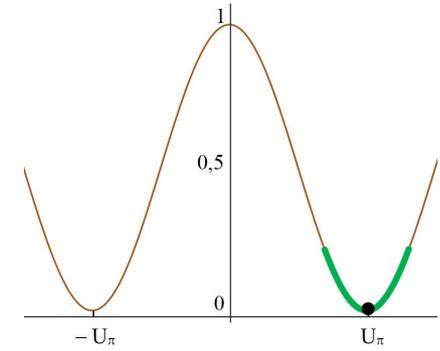
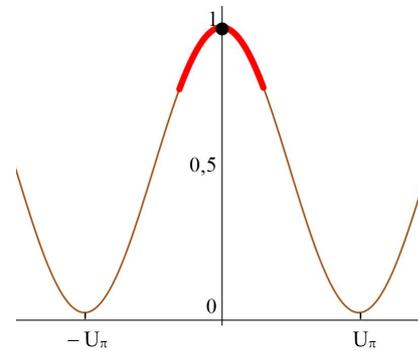
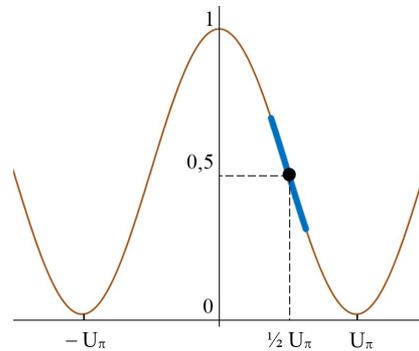
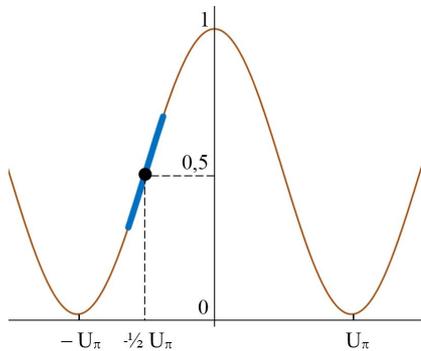
Electrical Gain_1
Gain = -1

Oscilloscope Visualizer_2

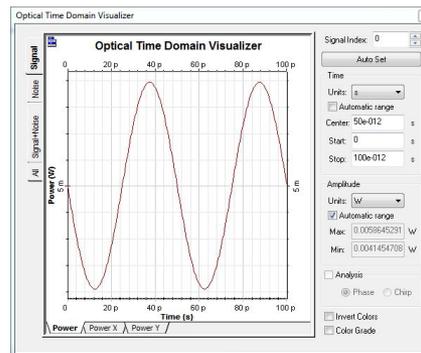
Optical Time Domain Visualizer_1

Oscilloscope Visualizer_3

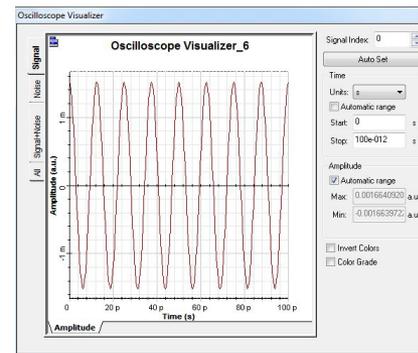
АНАЛОГОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ при использовании модулятора Маха-Цандера



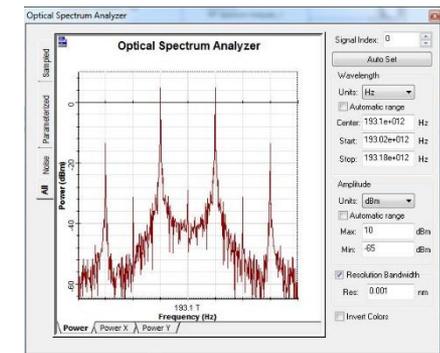
Амплитудное
детектирован
ие



Фазовая
манипуляци
я



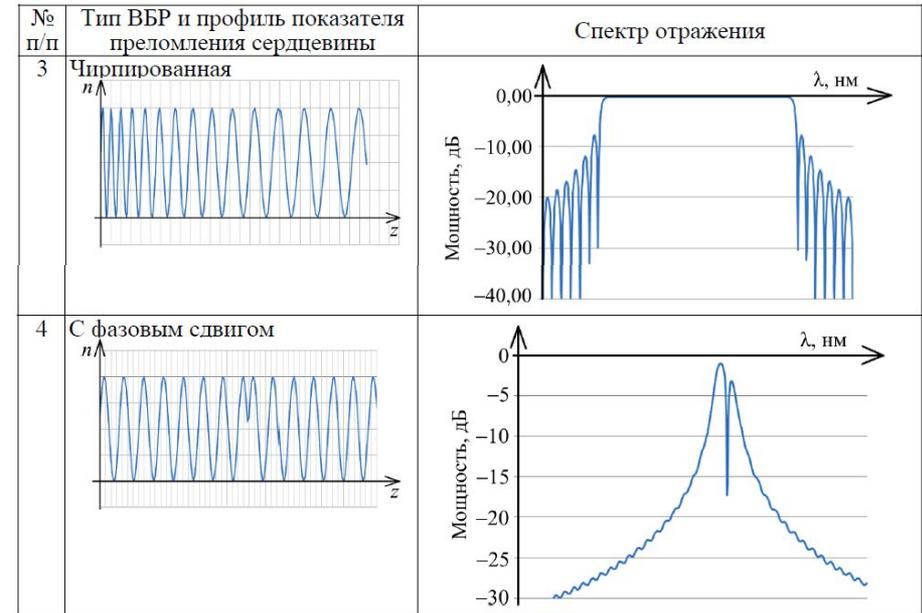
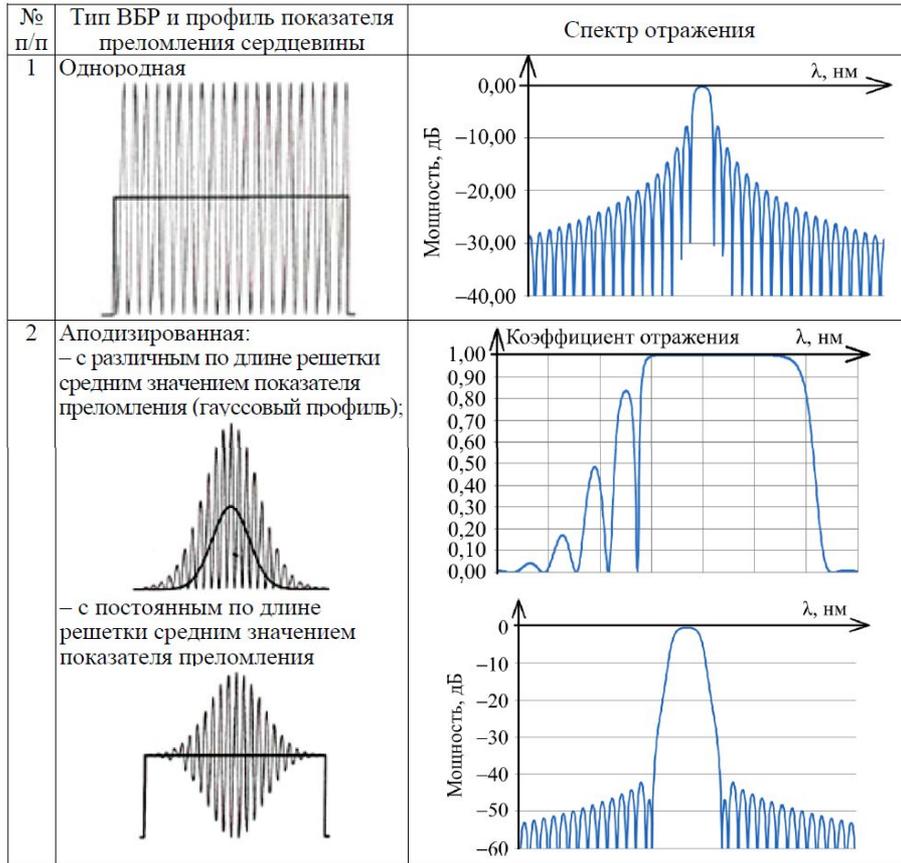
Умножение частоты
с варьируемой
кратностью



Подавление
оптической
несущей

КЛАССИФИКАЦИЯ ВБР

В.Г. Беспрозванных и др. Прикладная фотоника, Т. 3, № 3 (2016)



Представлена классификация **ВБР** для некоторых основных типов спектров отражения.

Источники информации

АКТУАЛЬНОСТЬ РАДИОФОТОНИКИ

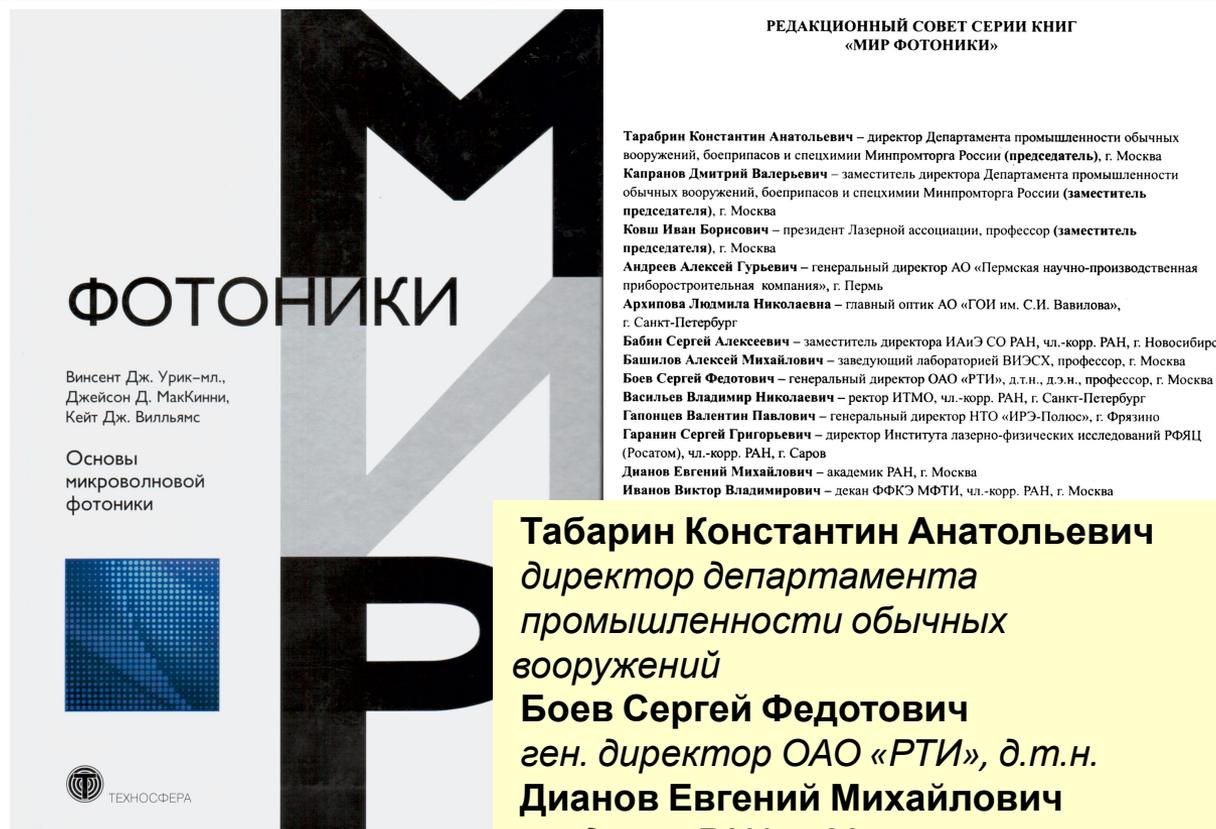
Фотоника является
прикладной
областью.

Описание широкого
диапазона
диапазона применений

радиофотоники

(микроволновой
фотоники),

несомненно, уже
могло бы стать
предметом
отдельной книги.



Табарин Константин Анатольевич
*директор департамента
промышленности обычных
вооружений*
Боев Сергей Федотович
ген. директор ОАО «РТИ», д.т.н.
Дианов Евгений Михайлович
академик РАН, г. Москва

1-я группа научно-технических направлений, по которым срочно требуется импортозамещение **в интересах обороноспособности страны** и сохранения возможности выполнения государством своих социальных обязательств:

- нанофотоника
- оптическая связь
- **радиофотоника**

...

ЛИТЕРАТУРА ПО РАДИОФОТОНИКЕ

Цуканов В.Н., Яковлев М.Я.

Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. – М.:

Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.

Глава 4

Опыт проектирования изделий радиофотоники

4.1 Общие сведения.....	255
4.2 Компонентная база радиофотоники.....	256
4.3 Опыт проектирования устройств СВЧ с использованием радиофотоники.....	256
4.3.1 Опыт проектирования узлов АФАР с использованием достижений радиофотоники.....	257
4.3.1.1 Опыт проектирования волоконно-оптических линий передачи и распределения СВЧ сигналов.....	257
4.3.1.2 Опыт проектирования волоконно-оптических фазовращателей.....	262
4.3.2 Опыт проектирования активных волоконно-оптических линий задержки.....	267
4.3.3 Опыт проектирования оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона.....	272
4.3.4 Опыт проектирования оптоэлектронных АЦП и ЦАП.....	274



ЛИТЕРАТУРА по радиофотонике (книги)

1. В. Урик, Д. МакКинни, К. Вилльямс. *Основы микроволновой фотоники*. М.: Техносфера, 2016. 376 с.
2. В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. *Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство*. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 304 с.
3. А. И. Ларкин, Ф. Т. С. Юу. *Когерентная фотоника*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 319 с.
4. С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. *Физическая оптика: Учебник. 2-е издание*. М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. 656 с.
5. Г. С. Ландсберг. *Оптика: Учебное пособие. 6-е издание*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 848 с.
6. Ю. Айхлер, Г. И. Айхлер. *Лазеры. Исполнение, управление, применение. 7-е издание*. М.: Техносфера, 2012. 496 с.
7. Р. Фриман. *Волоконно-оптические системы связи. 4-е издание*. М.: Техносфера, 2007. 512 с.
8. Сборник статей под редакцией С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова. *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. 3-е издание*. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
9. С. В. Варжель. *Волоконные брэгговские решетки. Учебное пособие*. СПб: Университет ИТМО, 2015. 65 с.

ЛИТЕРАТУРА по радиофотонике (статьи)

1. J. Capmany, D. Novak. *Microwave photonics combines two worlds*. Nat. Photonics, 2007, 1(6), p. 319-330.
2. М. Е. Белкин, А. С. Сигов. *Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника*. Радиотехника и электроника, 2009, т. 54, № 8, с. 901-914.
3. J. Yao. *A Tutorial on Microwave Photonics*. IEEE PHOTONICS SOCIETY NEWSLETTER, April 2012, p. 4-12.
4. А. А. Белоусов и др. *О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн*. Прикладная фотоника, 2014, с. 65-86
5. E. Rouvalis et al. *High-Power and High-Linearity Photodetector Modules for Microwave Photonic Applications*. IEEE Journal of Lightwave Technology - JLT-15942-2014.
6. А. Н. Петров и др. *Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора*. Журнал технической физики, 2015, т. 85, вып. 5, с. 131-136.
7. М. Е. Белкин, С. А. Кудж. А. С. Сигов. *Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии*. Российский технологический журнал, 2016, №1(10), с. 4-20.
8. C. Wang and J. Yao. *Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems*. OPTICS EXPRESS, 2013, 21, No. 19, p. 22868-22884.
9. С. А. Васильев. *Волоконные решетки показателя преломления и их применения*. Квантовая электроника, 2005, т. 35, № 12, с. 1085-1103.