

## ЗАЩИЩЁННЫЙ СЕГМЕНТ ROF СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С НЕЗАВИСИМОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ РАДИОКАНАЛА И ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ

*И.Л. Виноградова<sup>1</sup>, И.К. Мешков<sup>1</sup>, Е.П. Грахова<sup>1</sup>, А.Х. Султанов<sup>1</sup>, В.Х. Багманов<sup>1</sup>, А.В. Воронкова<sup>1</sup>, А.Р. Гизатулин<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

### Аннотация

Предложены принципы построения защищённого сегмента RoF в субтерагерцовом диапазоне частот, обеспечивающего независимую оптическую модуляцию частотными свойствами радиоканала и параметром управления фазированной антенной решётки. Предложена схема построения сегмента RoF для W-диапазона. Получены результаты режима совместной передачи двух мод, одна из которых является поляризованной, режима управления частотными свойствами радиоканала, режима формирования сигнала со спиральным фронтом, режима передачи модулированного оптического сигнала совместно с поляризованным сигналом со спиральным фронтом. Проведено моделирование сигналов с заданным спин-орбитальным состоянием на основе гамильтонова подхода. Представлены результаты расчёта фазово-амплитудного фильтра.

**Ключевые слова:** Radio-over-Fiber, субтерагерцовый W-диапазон, фазированная антенная решетка, пространственный модулятор света, волоконно-оптические системы передачи, дифракционный оптический элемент.

**Цитирование:** Виноградова, И.Л. Защищённый сегмент RoF субтерагерцового диапазона с независимой оптической модуляцией частотных свойств радиоканала и параметра управления фазированной антенной решёткой / И.Л. Виноградова, И.К. Мешков, Е.П. Грахова, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, А.В. Воронкова, А.Р. Гизатулин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 786-799. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-786-799.

### Введение

В последние годы значительно возрос интерес к использованию волоконно-оптических беспроводных и радиофотонных систем, работающих в диапазоне 75...110 ГГц (W-диапазон, или W-band), что связано с желанием уйти от переполненных в настоящее время радиочастот 1...10 ГГц для мультисервисного обслуживания. Этому способствует и неизменно повышающаяся актуальность использования широкополосных (ШП,  $\Delta f \sim 200...500$  МГц) и сверхширокополосных (СШП,  $\Delta f \sim 10$  ГГц и более). Очевидно, что переход к субтерагерцовым частотам и ШП/СШП-сигналам неизбежно приводит к усложнению электронных устройств для их генерирования и обработки. Справедливо заметить, что для W-диапазона электронные устройства вообще являются малоэффективными. Становится уже очевидным, что обеспечить приемлемую работу с подобными системами можно на базе использования оптических методов и волоконно-оптических средств, лишь с незначительным привлечением электроники. К настоящему моменту такие системы уже выделились в отдельный телекоммуникационный подкласс, именуемый Radio-over-Fiber (RoF), для которого во многих случаях сформированы определённые подходы и решения [1–5 и др.]. Уже сейчас RoF-системы завоевали к себе значительный интерес ввиду своей эффективности, простоты реализации, миниатюрности компонентной базы и дешевизны.

Так для генерирования радиоволн субтерагерцового диапазона посредством волоконно-оптических схем в сегментах RoF используются некогерентный и когерентный методы [6]. Первый основан на эффекте бие-

ния на фотоприёмнике (фотодиоде) двух оптических сигналов, разнесённых по оптической длине волны (частоте) на требуемое значение радио-несущей. Но, как показали экспериментальные исследования [6 и др.], результирующий субтерагерцовый радиосигнал в данном случае содержит в себе совокупный фазовый шум обоих лазеров, что приводит к снижению стабильности центральной радиочастоты и перестаёт удовлетворять требованию по стабильности в  $\pm 150$  ppm для диапазона 30–275 GHz, представленному в [7]. В противовес этому когерентные схемы генерации основаны на принципе самогетеродинамирования, в котором сигнал от единственного лазера разделяется на два на интерферометре Маха–Цендера (MZM), и в зависимости от настройки начальной рабочей точки MZM, обеспечивается получение удвоенной или учетверённой частоты относительно входной несущей. Подобный подход позволяет выбрать требуемую радиочастоту и практически уйти от шумов лазера. Он также в меньшей степени подвержен влиянию искажений на волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), таких как хроматическая дисперсия, особенно в случае использования видов модуляции с подавленной несущей. Поэтому данный метод успешно применяется для построения RoF-систем диапазона 1...10 ГГц.

Но непосредственный его перенос в W-диапазон не представляется эффективным, в частности из-за сложности применения перестраиваемых адаптивных гетеродинов указанного диапазона. Простое применение известного метода (при неизменной входной несущей частоте) потребует использования каскадных гетеродинных схем, что существенно усложнит общую структуру системы, а также увеличит стоимость её реализации, что касается только непосредст-

венно канала абонентской передачи. Если учесть, что для современного телекоммуникационного сегмента всегда должны быть решены задачи информационной защищённости передаваемых сигналов, реализации служебных каналов управления (значением используемой в текущий момент частоты несущей, направлением радиопелестка, и пр.), то построение сегмента RoF в W-диапазоне по известному методу будет громоздким и неэффективным решением, что практически сведёт на нет достоинства технологии RoF либо вообще может оказаться невозможным.

Таким образом, задача поиска баланса между простотой реализации оптической схемы генерирования требуемого радиосигнала (в частности, в W-диапазоне) и удовлетворительным уровнем стабильности его радиочастоты при сохранении известных достоинств RoF остается актуальной.

### 1. Постановка задачи

Исходя из актуальности разработки эффективных телекоммуникационных сегментов категории Radio-over-Fiber, работа которых базируется на использовании ШП/СШП-радиосигналов в W-диапазоне, настоящее исследование посвящено разработке и экспериментальной апробации предложенной волоконно-оптической схемы, которая может быть заложена в основу сегмента RoF-W-band и не содержит решений, потенциально обладающих значительным фазовым шумом. Схема призвана обеспечить генерирование подобной категории сигналов с возможностью адаптивной перестройки несущей радиочастоты и ширины полосы канала средствами ВОЛП RoF, а также позволяет выполнять удалённое управление радиоизлучающей системой (в данном случае – фазированной антенной решёткой (ФАР)) по совмещённому скрытому служебному каналу передачи без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса.

Здесь необходимо заметить, что субтерагерцовый W-диапазон демонстрирует существенное затухание радиосигнала при распространении как внутри, так и вне помещений ввиду значительного поглощения радиоволн в атмосфере по сравнению с традиционными радиодиапазонами мультисервисной передачи [8]. Ввиду этого для увеличения дальности действия радиолиний в данном диапазоне целесообразно использовать остронаправленные антенны с большим коэффициентом усиления. Такие антенны, как правило, реализуются на базе ФАР. В отсутствие ФАР дальность радиолинии для безлицензионной передачи (ниже установленного регламента в разрешённых спектральных окнах, рис. 1) не будет превышать нескольких десятков метров.

Согласно рекомендациям международного союза электросвязи [9] для высокоскоростных широкополосных систем передачи предложено использовать два W-поддиапазона шириной по 5 ГГц: 71–76 ГГц и 81–86 ГГц. Для работы в данных поддиапазонах предусматривается «лёгкое» (не строгое) лицензирование в некоторых странах Европы, Канаде и США.

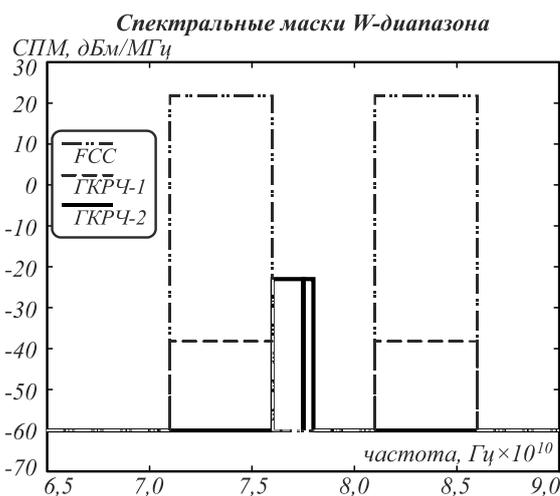


Рис. 1. Спектральные маски W-диапазона [9]. Здесь FCC – Federal Communications Commission – Федеральная комиссия по связи (США); ГКРЧ – Государственный комитет по радиочастотам (Россия)

Также решением Федеральной комиссии по связи (FCC) спектральная плотность мощности (СПМ) радиосигналов данного диапазона должна быть ограничена значением 150 мВт/МГц [FCC 05–45 от 24 февраля 2005 г.]. В Российской Федерации для систем связи W-диапазона принято решение [ГКРЧ от 15.07.2010 (Протокол №10-07)], согласно которому полосы радиочастот 71–76 ГГц и 81–86 ГГц выделены для использования радиорелейными станциями прямой видимости в условиях соблюдения требований по максимальной мощности передатчика в 0,15 Вт (ГКРЧ-1). Данное решение также предусматривает использование W-поддиапазонов 76–77,5 ГГц, 77,5–78 ГГц для разработки, модернизации и производства юридическими и физическими лицами радиосистем любительской службы в условиях ограничений на максимальную полосу и максимальную мощность в зависимости от категории – от 5 до 10 Вт (ГКРЧ-2). Учитывая вышеперечисленные регламентирующие документы, сформированы спектральные маски для систем, работающих в W-диапазоне, представленные на рис. 1.

Так для решения задачи создания эффективного сегмента RoF-W-band предлагается (рис. 2) использовать оптическую двухмодовую передачу (формирующуюся, например, в световоде типа OFS Two Mode-Index Fiber на телекоммуникационной длине волны 1310 нм) и с радиочастью на базе остронаправленной управляемой ФАР.

Указанные оптические моды предлагается использовать следующим образом: одна (пусть LP01) задействуется для переноса информационного абонентского сигнала [10], предназначенного для трансляции в радиопередающую часть RoF до абонента (назовём абонентский сигнал); и другая (в данном случае LP11) предназначается для переноса служебного сигнала управления диаграммой направленности (ДН) ФАР RoF, которая передаётся до оптико-радиотехнического конвертера RoF (служебный сигнал).



поляризацией, что реализуется в схеме по рис. 2 с применением оптического переключателя, управляемого напряжением  $V_{упр,2}$ , и ортогонально расположенных поляризаторов (П). Схема может быть упрощена, если ключ с поляризаторами заменить на устройство, управляющее поляризацией. На приёме (в схеме оптико-радиотехнического конвертера) мода LP11 сначала должна быть выделена из суммарного светового поля, как упоминалось выше, а затем – измерено её состояние поляризации. Кодирование информации по состоянию поляризации LP11 предполагается реализовать по бинарной системе в виде логических 0 ( $\leftrightarrow$ ) и 1 ( $\Phi$ ), подаваемых затем на цифровые фазовращатели антенных элементов ФАР в последовательном коде. Последние обеспечат преобразование вида «код  $\rightarrow$  фаза» [21] и тем самым – управление лепестком ДН ФАР. Очевидно, что эффективный приём служебного сигнала и информации управления для ДН ФАР возможен в случае сохранения состояния поляризации модой LP11, установленного для неё в передатчике.

В отсутствие цифрового кода на входах фазовращателей (все нули), последние предполагается настроить на отклонение лепестка в заведомо неиспользуемом (глухом) направлении, например, в сторону радиопоглощающего экрана. Фактически, в случае неприёма цифрового кода будет наблюдаться отсутствие радиоизлучения ФАР, что и обеспечит защиту канала от несанкционированного использования.

Предполагается, что данная схема может быть интересна для непротяжённых (преимущественно абонентских, т.е. «последней мили») телекоммуникационных сегментов, таких как xPON.

## 2. Экспериментальная апробация разработанного сегмента RoF

Изучение возможности практической реализации схемы по рис. 2 решено было проводить экспериментально-лабораторным способом. Для чего оптический приёмный модуль (обозначен на рис. 2 как оптико-радиотехнический конвертер) был сформирован по схеме рис. 3а), при этом блок, формирующий составной оптический сигнал, был реализован по схеме рис. 2.

Предполагалось изучить следующие режимы:

1. Режим совместной передачи двух мод, для одной из которой (LP11) задавалось состояние поляризации. Здесь необходимо определить степень смешения мод LP01 и LP11 и вращения поляризации, наблюдаемые на приёме (при отсутствии в схеме НЛ и выставленной рабочей точки MZM на максимум пропускания) при длине волоконно-оптической линии совместной передачи (LP01 + LP11) до 4 км, что позволит определить рабочую длину указанной линии в основном эксперименте.

2. Режим управления частотными свойствами радиоканала (при отключённом канале передачи моды LP11) как при отключённом, так и при подключённом источнике абонентского сигнала. Решено было фильтр Ф (последовательно включённый с MZM в схеме по рис. 2) не использовать.

3. Режим формирования сигнала со спиральным фронтом (первого порядка с  $m=1$ , в моде LP11), установления для него требуемого состояния поляризации (в соответствии с требуемым кодом) при отключённом канале передачи абонентского сигнала и последующем анализировании принимаемого состояния поляризации на приёмной стороне волоконно-оптической линии.

4. Режим передачи модулированного в MZM и НЛ сигнала совместно с поляризованным сигналом со спиральным фронтом. Предполагалось изучить эффективность их объединения и дальнейшего выделения полезной информации, переносимой модами при использовании в схеме всех преобразующих устройств.

В экспериментальной установке (рис. 3б) использовался лазерный модуль с волоконно-оптическим выходом и DFB-лазером EMCORE 1615A с перестраиваемой стабилизированной (с шагом  $10^{-4}$  нм, обеспечиваемой встроенными контурами температурной стабилизации и стабилизации по заданному значению  $\lambda$ ) длиной волны в диапазоне 1300...1335 нм, регулируемой значением тока накачки (мА) посредством интерфейса управления модулем. Лазерный модуль включал в себя элемент охлаждения лазерного излучателя. Для проведения эксперимента было выставлено:  $\lambda_1 = 1310,56 \pm 0,0001$  нм. Лазер обеспечивал генерацию вертикально поляризованного излучения в пределах ( $\pm 10^\circ$ ) от вертикали. Использовался модулятор Маха–Цендера MX1300-LN-20 с волоконно-оптическим входом и выходом, предназначенный для работы с оптическими сигналами в спектральном диапазоне 1290–1330 нм, рабочим телом которого являлся ниобат лития. Управление рабочей точкой модулятора было основано на применении постоянного напряжения смещения  $V_{см}$  в пределах 0...+5 В, что обеспечивало подстройку оптических длин плеч модулятора. Использовалось устройство «Элемент перестройки длины волны излучения» 1982A Amplified Lightwave Converter (выносной электронно-оптический слот с волоконно-оптическими входом и выходом), предназначенный для работы с входным излучением в диапазоне 1310,05...1310,70 нм, управляемый через USB-порт компьютера с установленным специализированным программным обеспечением. Использовался корпусированный дифракционный оптический элемент (К-ДОЭ), выполненный на основе фазосдвигающей пластины и расположенных коллиматоров по обе стороны от неё, к которым были прикреплены оконцованные световодные пиг-тайлы для подключения данного элемента в волоконно-оптическую линию, и предназначенный для формирования волны со спиральным фронтом первого порядка для моды LP11.

Использовались волоконно-оптические переключатели OSW22-1310E, управляемые напряжением, на основе микроэлектромеханической системы вида 2×2 с рабочим диапазоном 1280–1625 нм, один из входов которых при проведении исследований закрывался волоконно-оптической заглушкой.

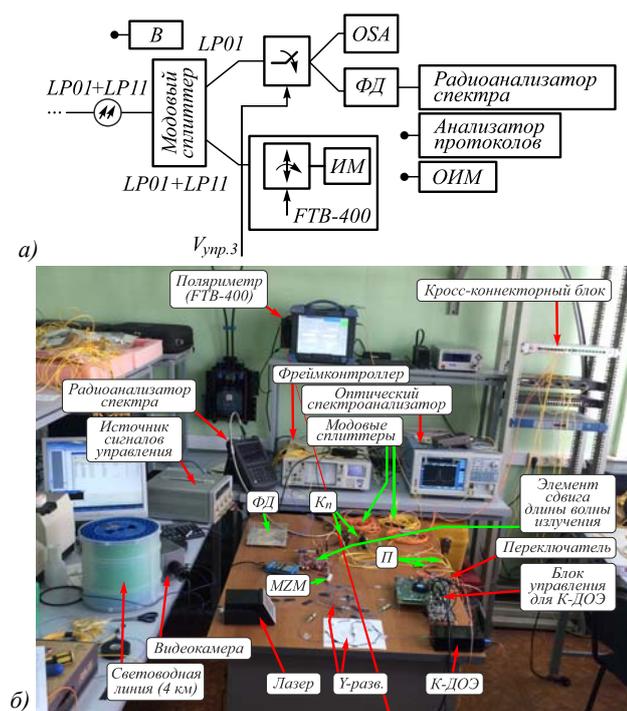


Рис. 3. Схема приёмного модуля при экспериментальном исследовании предложенного сегмента RoF (а) и фото экспериментального стенда (б)

Использовались волоконно-оптические поляризаторы LP1310PM-APC на основе элемента турмалина (на рис. 2 обозначены через П); волоконно-оптические контроллеры поляризации для оптоволоконных систем FPC025, основанные на двулучепреломляющих волокнах (на рис. 2 обозначены через Кп). Использовались волоконно-оптические разветвители вида 1×2, основанные как на одномодовых световодах SMF-28+ с диаметром сердцевины 9 мкм (узких световодов), так световодах OFS Two Mode-Index Fiber Item #80731 с диаметром сердцевины 16 мкм (широких световодах), а также световодный кросс-коннекторный блок, обеспечивающий удобство переключения компонентов. Использовались модовые сплиттеры вида 1×2, сходные по конфигурации с Y-разветвителями мощности. В настоящее время существует большой выбор модовых сплиттеров, различающихся функционально: начиная от конструкций, подобных Y-разветвителям с подсоединением различных типов волокон (именуемые в литературе – типа «photonic lantern») [16], что позволяет, в частности, эффективно выделять низшие моды, и до весьма сложных конструкций с длиннопериодными волоконными решётками, обеспечивающими, например, гашение LP01 при выведении LP11 [22], и фотонно-кристаллическими элементами. В настоящем эксперименте были применены модовые сплиттеры (Mode Selective Couplers, 2 modes), построенные на широких (вход-выход (1) и один из входов-выходов Y-разветвления, обозначены ОВ-2 на рис. 2) и на узких (другой из входов-выходов Y-разветвления, ОВ-1) световодах. В узкий световод ответвлялась мода LP01, т.к. LP11 и другие выше LP01 там распростра-

няться не могут на используемой длине волны. Широкий световод в другом ответвлении содержал в своей сердцевине длиннопериодную волоконную решётку, резонансным образом отражающую LP01 на длине волны 1310 нм в результате взаимодействия с её коэффициентом распространения  $\beta_{01}$ . Такие сплиттеры позволяли объединять моды: основную моду с гауссовским фронтом, подаваемую из узкого световода, и модовую композицию из широкого световода, а также и выделять (при противоположном включении) моду LP01, выходящую из узкого Y-ответвления, из суммарной модовой композиции, выводимой из широкого Y-ответвления.

При проведении эксперимента применены также балансный фотодетектор 43 Gb/s BR-40D, подключенный на выносном электронном слоте; оптический спектроанализатор Yokogawa AQ6370 OSA, обеспечивающий анализ спектра излучения в диапазоне длин волн 600–1700 нм со средней разрешающей способностью в 0,02 нм (точное значение зависит от поддиапазона по длине волны и варьируется от 0,02 до 1 нм); радиоанализатор спектра Keysight N9041B, обеспечивающий возможность исследования спектра электрических сигналов с частотой до 110 ГГц; видеокамера Xenics XEVA-2.35-320, доукомплектованная дополнительно к объективу устанавливаемым блоком с волоконно-оптическим подключением для входного сигнала, позволяющая получать видеоизображения сигналов в диапазоне от ~1 мкм до 2,35 мкм (по гарантии производителя) – на рис. 3б обозначена «В»; и поляриметр автоматический E81MRDISPAP, представляющий собой модуль, доукомплектовывающий поляризационный рефлектометр POTDR FTB-5500B в составе измерительной платформы EXFO FTB-400, также призванный работать на телекоммуникационных длинах волн. Поляриметр обеспечивал измерение мощности (ИМ) сигнала в зависимости от установленного (выбранного) состояния поляризации.

В качестве источника сигнала абонента использовался фрейм-контроллер AQ2202 YOKOGAWA, в состав которого входил двухслотовый анализатор протоколов сетей асинхронной передачи с возможностью установки битовой скорости от 1 Мбит/с до 10 Гбит/с и генерацией тестового абонентского сигнала (при параллельном измерении реакции сегмента), с оптическим интерфейсом, и оптический измеритель мощности (ОИМ). В качестве источника сигналов управления выступал стабилизированный программируемый источник питания EA-PS 9080-50 1U. Волоконно-оптическая линия (для совместной передачи обеих мод) представляла собой цельный световод (одной строительной длины) OFS Two Mode-Index Fiber Item #80731, которое по своим параметрам (профилю линейного показателя преломления, дисперсионным и нелинейным характеристикам) близко к стандартному ступенчатому волокну, соответствующему МСЭ-T G.652, но имеет больший диаметр сердцевины. Все эти компоненты сохраняли свои рабочие качества в широком диапазоне рабочих условий.

Исследование режима 1 совместной передачи двух мод, для одной из которой устанавливалось заданное состояние поляризации, было проведено следующим образом. Сначала блок, формирующий оптический сигнал, выполнял генерирование только одной моды LP01, а канал формирования моды LP11 был отключён. В приёмном модуле после модового сплиттера измерялась оптическая мощность этой же принимаемой моды (в канале ОВ-1), а затем (после переключения ОИМ на соседний выход приёмного сплиттера) – мощности модовой композиции, состоящей из возможно возбуждённой при распространении в совместном канале паразитной LP11, а также и других высших мод, поддерживаемых используемым широким световодом. Далее результат сравнивался со значением мощности LP01, измеренной с выхода передатчика.

Затем для передачи в линию был подключён канал формирования LP11 без использования поляризаторов, а канал с LP01 – отключён. После чего были выполнены измерения оптической мощности излучения, поступающего из одного и из второго выходов приёмного модового сплиттера соответственно, и сравнены с мощностью с выхода передатчика. Это позволило оценить степень возбуждения соседней моды (уровень перекачки мощности при её изначальном отсутствии без дополнительных «мешающих» устройств) и, возможно, дополнительных паразитных мод, а также оценить разделяющие свойства используемых сплиттеров.

Затем измерения были проведены при подключении поляризационных устройств на пути LP11, задавалась вертикальная поляризация (на выходе для обоих каналов был проведён анализ поляризации принимаемого излучения с подключением поляриметра на измерительной платформе EXFO вместо ОИМ), и далее – уже с подключённым источником сигнала абонента, имитируемого фреймконтроллером, для моды LP01. В последней категории измерений на приёме, кроме мощности, оценивалось качество абонентского сигнала (по параметрам сигнал/шум и коэффициенту битовых ошибок) с подключением вместо ОИМ приёмного входа анализатора протоколов.

В результате было установлено следующее. Простое возбуждение соседней моды (при единственной входной для линии передачи) в собранном нами оптоволоконном тракте можно признать незначительным – перекачивается не более 15...17% (главным образом при LP11 → LP01) мощности. Перекачка LP01 → LP11 остаётся в пределах 7...8%. Учитывая, что на подобную перекачку в немалой степени влияют несоосности волоконно-оптических соединений (которых на нашей линии немало), главным образом – коннекторы, то для реальных сетей это значение может быть снижено путём выполнения сварных соединений вместо коннекторных.

Несколько хуже обстоит дело с изменением поляризации – примерно до 48...50% мощности было принято с изменённой поляризацией, что говорит о её

существенном вращении на данной линии. Это, скорее всего, можно объяснить тем, что световодная линия длиной 4 км размещена на катушке (намотана), что обеспечивает ей значительное количество изгибов, напряжений и т.д. Но разместить данную линию свободно, во-первых, в настоящем эксперименте не представлялось возможным, и, во-вторых, не представлялось целесообразным ввиду того, что разрабатываемый сегмент предназначен для «последней мили», для которой как раз свойственны сегменты с существенно вращающейся поляризацией. Качество принимаемого абонентского сигнала было признано приемлемым, т.е. параметры соответствовали Рек. МСЭ-Т М.550/М.2101. Из всего этого был сделан вывод о сохранении структуры собранной линии и её длины в 4 км.

Исследование режима 2 управления частотными свойствами радиоканала волоконно-оптическими средствами было проведено следующим образом. Сначала был выбран диапазон частот, который впоследствии будет предназначен для радиоканала, а именно – с центральной несущей частотой в 77 ГГц, что обеспечит его безлицензионную передачу при умеренных амплитудах (см. рис. 1). Решено было использовать амплитудно-модулированный оптический сигнал с подавлением несущей частоты и двумя боковыми полосами, отстоящими от центральной на входную частоту модуляции (по аналогии с [19]), и шириной полосы информационного сигнала, ограниченной значением в 1,5 ГГц. Режим был реализован путём подачи соответствующего управляющего напряжения ( $V_{cm} = +0,5$  В) на рабочую точку MZM, обеспечивая тем самым минимум пропускания центрального колебания. Особенностью данного подхода является простота реализации (сигнал может быть сформирован на базе любого формата модуляции) и эффективность выделения полезного сигнала на приёме – нет необходимости подавлять центральную частоту. Далее была выставлена величина перестройки длины волны излучения на элементе НЛ – на  $\cong -0,4408$  нм, что и будет соответствовать 77 ГГц. Для этого было установлено управляющее напряжение  $V_{упр,1} = 0,861$  В.

В результате на приёме как на оптическом (рис. 4а), так и на радиоспектроанализаторе (рис. 4б) наблюдалось желаемое – сложение двух оптических сигналов – с выхода MZM (правый пик на рис. 4а) и НЛ (левый пик на рис. 4б).

Это обеспечивало формирование модулированного радиочастотного сигнала вокруг значения 77 ГГц на выходе балансного фотодетектора, который может быть передан в эфир при подключении соответствующего радиоизлучателя. Описанный опыт был успешно повторен и для сигнала без подавления центрального несущего колебания (при выставлении рабочей точки MZM посредством смещения  $V_{cm} = +2,0$  В на максимум его пропускания), что позволило сделать заключение о работоспособности предложенного способа управления частотными свойствами радиоканала посредством данной волоконно-оптической схемы.

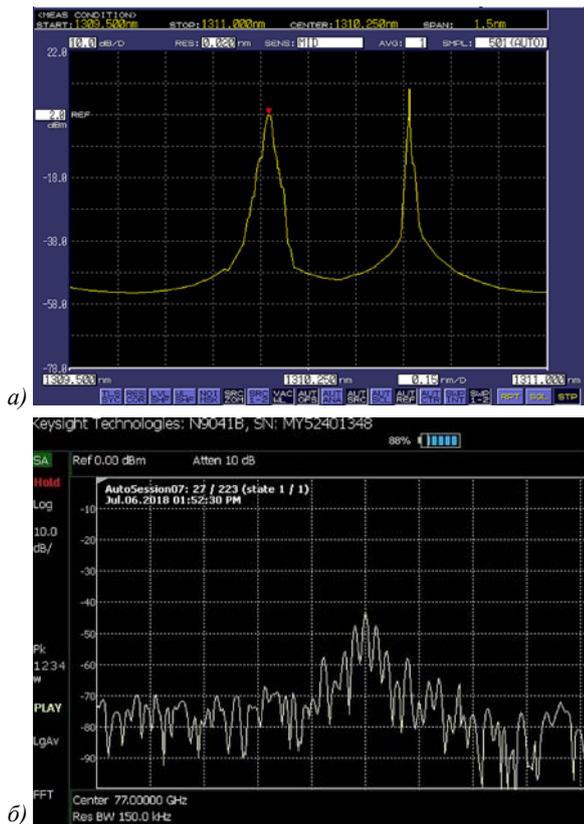


Рис. 4. Спектр принимаемого оптического (а) и электрического (б) сигналов. Красный треугольник – курсор

Исследование режима 3 формирования сигнала со спиральным фронтом первого порядка с целью дальнейшего использования его задаваемой поляризации для управления ФАР было проведено следующим образом. В схеме эксперимента (по рис. 2 и по рис. 3) на пути моды LP11, сформированной с выхода К-ДОЭ, сначала подключался горизонтальный поляризатор, после чего на приёме с выхода (ОВ-2) приёмного сплиттера измерялась оптическая мощность и фиксировалось состояние поляризации, при котором указанная мощность была максимальной. Затем проводились аналогичные измерения при установленном в передатчике вертикальном поляризаторе. В результате чего было подтверждено, что состояние поляризации принимаемого LP11-вortexа может случайным образом не совпадать с тем, которое было установлено для него в передатчике, что согласуется с результатом, полученным при исследовании режима 1.

Для того чтобы обеспечить свойство сохранения состояния поляризации, придаваемое вортекс-моду LP11 в передатчике (а вихревое состояние всё равно должно формироваться для эффективного выделения именно данной моды), было предложено формировать её вихревое состояние новым способом, не привязываясь к первому порядку, а именно: с применением специализированного фазово-амплитудного фильтра, который должен устанавливаться в составе компонента К-ДОЭ (рис. 2), вместо используемой в настоящем эксперименте фазосдвигающей пластины. Параметры такого фильтра должны рассчитываться исходя из

свойств конкретной световодной линии. Указанный фильтр необходим для формирования специальной вихревой композиции на базе моды LP11, обладающей свойством сохранения состояния поляризации при распространении её в подобной среде. Выделение данной вихревой композиции из суммарного светового поля на приёме также должно производиться аналогичным фазово-амплитудным фильтром, но выполняющим обратное преобразование. После чего для выделенного излучения должно выполняться измерение состояния поляризации, и далее – формироваться цифровой код для управления ДН ФАР.

Исследование режима 4 совместной передачи модулированного в МЗМ и НЛ сигнала и поляризованного сигнала со спиральным волновым фронтом было проведено следующим образом. Для этого формирующий модуль был собран по схеме рис. 2, а приёмный – по схеме рис. 3а. Исследовалась возможность эффективного мультиплексирования модулированных мод в одну световодную линию, и дальнейшего выделения полезной информации, переносимой модами. Было выполнено фотографирование интерферограмм объединённого сигнала (LP01+ +LP11) сразу после передающего модового сплиттера, рис. 5а, и после прохождения световодной линии 4 км, рис. 5б. Фотографии получены для случая установления вертикальной поляризации в канале моды LP11.

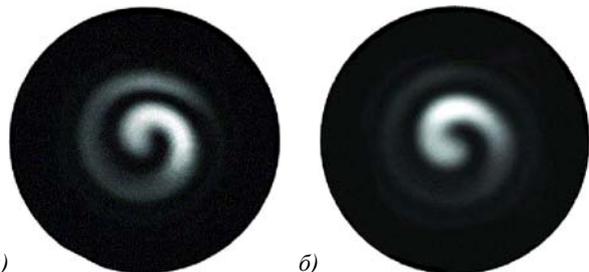


Рис. 5. Интерферограмма переданного (а) и принятого (б) объединённого сигнала

В результате анализа качества абонентского сигнала с подключением анализатора протоколов в выходной канал LP01 было установлено его соответствие требованиям Рек. МСЭ-Т М.550/М.2101. Измерения были проведены как для режима с подавленной несущей (выставляемой рабочей точкой МЗМ), так и без подавления несущего колебания. Отсюда был сделан вывод о том, что абонентский сигнал выделяется успешно и управление его частотными свойствами, отработанное в режиме 2, выполняется.

Однако анализ состояния поляризации светового поля с выхода LP11 подтвердил полученные ранее в этом направлении результаты: информация для управления ФАР в коде 0 ( $\leftrightarrow$ ) и 1 ( $\nabla$ ) передаётся неудовлетворительно.

Всё это позволило сделать общий вывод о том, что предложенная схема сегмента RoF-W-band является условно работоспособной – при условии обеспечения свойства сохранения поляризации моды LP11 в процессе её распространения через вращающую поляризацию световодную линию, что характерно для ре-

альных (эксплуатирующихся) линий связи. Решением данной задачи может являться формирование специальных пучков подобно представленных в [23–26], базовые подходы и методы в области которых в значительной степени развиты и проработаны в научной школе ИСОИ РАН. Возможно также найти решение в виде некоторой вихревой композиции для данной моды, устойчивой к вращению поляризации.

Следует также учесть, что используемые в эксплуатации световоды не будут поддерживать двухмодовый режим передачи на выбранной длине волны излучения. Последний будет достигнут лишь при  $\lambda = 850$  нм при использовании стандартного волокна, соответствующего МСЭ-Т G.652 (в настоящее время «условно телекоммуникационной» длине волны). Для проведения эксперимента данный случай не был выбран ввиду высокой сложности приобретения оборудования на данную длину волны. Тем не менее, для масштабного применения подобного RoF-W-band-850 нм ориентированная разработка оборудования, как представляется авторам, вполне возможна. И в такой среде будет поддерживаться более двух мод, что повышает актуальность использования специальным образом сформированного фронта для используемой моды, переносящей служебный канал.

**3. Моделирование сигналов с заданным спин-орбитальным состоянием на основе гамильтонова подхода и расчёт фазово-амплитудного фильтра, формирующего сохраняющуюся поляризацию сигнала со спиральным фронтом**

Для исследования возможности создания требующегося в поставленной технической задаче фазово-амплитудного фильтра, формирующего сохраняющуюся поляризацию волны со спиральным фронтом, было предложено воспользоваться гамильтоновым подходом и спинорным представлением уравнений Максвелла. Данный подход позволяет несложным образом учесть воздействующие факторы и найти сохраняющиеся величины – эффекты, связанные с поляризацией и угловым орбитальным моментом.

По аналогии с [27], использовано формализованное квантово-механическое представление для вортекс-состояния электромагнитной волны в виде биспинора:

$$|\Psi\rangle = \begin{pmatrix} E_z \\ E_x + iE_y \\ iH_z \\ -H_y + iH_x \end{pmatrix},$$

где  $E$  и  $H$  – вектора электрического и магнитного полей соответственно. Такое описание в квантовой электродинамике справедливо для фермионных частиц с нулевой массой покоя (например, нейтрино).

Уравнение распространения будет иметь вид:

$$i \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial z} = \hat{H} |\Psi\rangle, \tag{1}$$

где гамильтониан записывается как:

$$\hat{H} = (\vec{\sigma}' \times \nabla)_z + \omega \alpha_z, \tag{2}$$

$\alpha_z$  – матрица Дирака [20],  $\nabla$  – оператор Гамильтона (набла), и матрицы Паули  $\vec{\sigma}'$   $2 \times 2$  определяются следующим образом:

$$\vec{\sigma}' = \begin{pmatrix} \vec{\sigma} & 0 \\ 0 & \vec{\sigma} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Матрицы Паули определяют спин состояния волны со спиральным фронтом:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Полный ортогональный набор векторов состояний, включающий в себя волны с постоянными пространств  $\beta > 0$  и  $\beta < 0$ , и состояния с проекцией спина на направление распространения:  $S_z > 0$  и  $S_z < 0$  можно представить в виде четырёх векторов:

$$\begin{aligned} |\Psi_1\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \cdot \varphi_{m-1}^+ \\ 0 \cdot \varphi_m^+ \\ \frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^+ \\ \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^+ \end{pmatrix}; & |\Psi_2\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \cdot \varphi_m^- \\ 1 \cdot \varphi_{m-1}^- \\ \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^- \\ \frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}; \\ |\Psi_3\rangle &= \begin{pmatrix} -\frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^+ \\ \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^+ \\ 1 \cdot \varphi_{m-1}^+ \\ 0 \cdot \varphi_m^+ \end{pmatrix}; & |\Psi_4\rangle &= \begin{pmatrix} \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^- \\ \frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^- \\ 0 \cdot \varphi_m^- \\ 1 \cdot \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $\chi$  – радиальное волновое число [20], и введён следующий набор зависящих от азимутального индекса  $m$  радиально-угловых функций:

$$\begin{aligned} \varphi_m^+ &= J_m(\chi\rho) \cdot e^{jm\varphi}, \quad \varphi_m^- = J_m(\chi\rho) \cdot e^{-jm\varphi}, \\ \varphi_{m-1}^+ &= J_{m-1}(\chi\rho) \cdot e^{j(m-1)\varphi}, \\ \varphi_{m-1}^- &= J_{m-1}(\chi\rho) \cdot e^{-j(m-1)\varphi}. \end{aligned}$$

Здесь  $J_m(\bullet)$  – функции Бесселя 1-го рода порядка  $m$ .

Используя полный набор ортогональных векторов состояния, можно найти матрицу унитарного преобразования  $U$ , приводящую гамильтониан  $\hat{H}$  в уравнении распространения (1) к диагональному виду так, что преобразованный гамильтониан  $\tilde{H} = U \cdot H \cdot U^+$ , может быть представлен:

$$\tilde{H} = \beta(\omega) \sigma'_z \cdot \gamma_0, \tag{5}$$

где диагональная матрица  $\gamma_0$  является матрицей Дирака [28].

Матрица унитарного преобразования имеет следующую форму:

$$U = \frac{1}{\sqrt{T}} \begin{pmatrix} \varphi_{m-1}^+ & 0 & -\frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^+ & \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^- \\ 0 & \varphi_{m-1}^- & \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^+ & -\frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^- \\ \frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_{m-1}^+ & \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^- & \varphi_{m-1}^+ & 0 \\ \frac{j\chi}{\omega} \cdot \varphi_m^+ & \frac{\beta}{\omega} \cdot \varphi_m^- & 0 & \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где нормировочная функция  $T$  определяется выражением

$$T = J^2_{m-1}(\chi\rho) + J^2_m(\chi\rho) + \frac{\beta^2}{\omega^2} (J^2_{m-1}(\chi\rho) - J^2_m(\chi\rho)).$$

Можно убедиться, что матрица (6) удовлетворяет соотношению унитарности:  $U \cdot U^+ = 1$ , а система векторов состояния (4) превращается в систему единичных векторов таких, что:

$$U^+ |\varphi_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_1\rangle, \quad U^+ |\varphi_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_2\rangle, \quad (7)$$

$$U^+ |\varphi_3\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_3\rangle, \quad U^+ |\varphi_4\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_4\rangle.$$

Вектора состояния  $|\varphi_1\rangle$  и  $|\varphi_4\rangle$  соответствуют  $\beta > 0$ , т.е. волнам, распространяющимся в положительном направлении вдоль оси  $z$ , и могут быть выбраны в качестве принципиальных мод, сохраняющих при распространении как поляризацию, так и проекцию углового момента на ось  $z$ . Действительно, преобразованный гамильтониан коммутирует как с оператором проекции спина на ось  $z$ , так и с оператором проекции углового момента на ось  $z$ :

$$[\hat{H}, \sigma_z] = 0, \quad [U, M_z] = 0. \quad (8)$$

Известно, что любую унитарную матрицу  $M$ , в том числе и  $U$  по (6), можно представить в символическом виде:  $M = \exp\{jA\}$ , где  $A$  – некоторая эрмитова матрица ( $A^+ = A$ ). Если  $|\Phi_n\rangle$  представляет собственный вектор матрицы  $A$  с собственным значением  $\Lambda_n$ , то является справедливым следующее соотношение:

$$A|\Phi_n\rangle = \Lambda_n|\Phi_n\rangle, \text{ или} \\ M|\Phi_n\rangle = \exp(j\Lambda_n)|\Phi_n\rangle, \quad (9)$$

и функциональные матричные значения примут вид:

$$\langle \Phi_n | M | \Phi_n \rangle = \exp(j\Lambda_n),$$

что в технической интерпретации и представляет собой функцию фазы, являющейся скалярной. Последняя может быть дискретизована, и далее – построен ДОО.

Это говорит о существовании принципиальной технической возможности расчёта и создания такого фазо-амплитудного фильтра, который и сформирует сохраняющую поляризацию вихревую композицию, о чём речь шла выше.

Такой фазово-амплитудный фильтр может использоваться не только в схеме по рис. 1, но и в других системах категории RoF-W-band – для доуплотнения информационных каналов, обеспечения служебных каналов и т.д. Но для таких случаев необходимо заметить, что при проведении расчётов данного фильтра была принята во внимание единственная частота излучения, тогда как во многих сегментах RoF их две, не говоря уже о полосности информационного излучения. Это приведёт к тому, что фильтр должен одинаково работать для близких, но разных оптических длин волн, т.е. обладать широкополосностью. Это может быть достигнуто с применением методов [29, 30] либо технологии вариации показателя преломления материала [31].

Таким образом, убедившись в том, что фазово-амплитудный фильтр, обеспечивающий генерирование сохраняющей поляризацию волны со спиральным фронтом, является реализуемым, можно согласиться, что разработанный сегмент RoF-W-band обладает практической значимостью. Но уже сегодня для перспективных систем RoF одной из краеугольных задач, обладающих огромной значимостью, является создание схем бесшовной передачи сигнала из оптической в радиочасть, и наоборот. В нашем случае для того, чтобы оптический канал, управляющий диаграммой направленности ФАР, наиболее точно произвёл воздействие на определённый элемент решётки, необходимо разработать экспериментальный прототип радиооптического конвертера, преобразующего спин-орбитальные моды оптического волокна в электрические сигналы для управления ФАР. Процесс конвертирования предполагается осуществлять с помощью системы пространственных фильтров, корреляционно согласованных с волнами со спиральными фронтами в оптическом волокне. Формирование электрических сигналов управления ФАР предполагается осуществить на основе оптических линий задержки. Выбор параметров оптических линий задержек сигналов управления ФАР необходимо осуществлять из требований к форме и углу отклонения лепестка диаграммы направленности антенны, с учётом выбранной конфигурации и параметров элементарных излучателей. Сказанное здесь определяет направление дальнейших исследований по отношению к предложенному сегменту.

### Выводы

Предложена схема построения сегмента RoF-W-band, обеспечивающая адаптивное управление частотными свойствами радиосигнала и обладающая существенно меньшим фактором фазовых шумов в сравнении с аналогами за счёт использования единственного лазера. Получение высокочастотного радио-

сигнала обеспечивается за счёт сдвига длины волны оптического излучения в оптическом элементе, подключённом параллельно к модулятору Маха–Цендера. В данной схеме предложено также осуществлять управление диаграммой направленности антенной решётки по скрытому оптическому каналу, передаваемому по соседней моде. Причём в качестве информационной компоненты использовать поляризацию сигнала, а для эффективного разделения мод – формировать данную моду со спиральным фронтом.

В процессе экспериментальной апробации работоспособности схемы было установлено, что формирование радиочастотного сигнала в абонентском канале производится эффективно, а сохранение переданной поляризации не достигается.

Для того чтобы обеспечить сохранение указанного свойства, в работе предложен метод и выполнен расчёт специализированного фазово-амплитудного фильтра, который обеспечит формирование вихревой композиции на базе моды LP<sub>11</sub>, устойчивой к вращению поляризации в световоде. Использование такого фильтра и формируемой им вихревой композиции для моды LP<sub>11</sub> позволит не только обеспечить её эффективное выделение из суммарного светового поля на приёме, но и успешно передавать состояние поляризации, устанавливаемое в передатчике.

### Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00123).

Авторы выражают благодарность ОАО НПП «Полигон» за содействие при проведении экспериментальных исследований.

Авторы выражают благодарность профессорам В.А. Бурдину и А.В. Бурдину за консультирование при проведении экспериментальных исследований.

### Литература

1. **Rommel, S.** 15Gbit/s duobinary transmission over a W-band radio-over-fiber link / S. Rommel, J.J.V. Olmos, I.T. Monroy // 2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – 2016. – P. 197-200. – DOI: 10.1109/RTUWO.2016.7821883.
2. **Chorchos, L.** Reconfigurable radio access unit for DWDM to W-band wireless conversion / L. Chorchos, S. Rommel, J.P. Turkiewicz, I.T. Monroy, J.J.V. Olmos // IEEE Photonics Technology Letters. – 2017. – Vol. 29, Issue 6. – P. 489-492. – DOI: 10.1109/LPT.2017.2656894.
3. **Chorchos, L.** W-band real-time transmission utilizing a reconfigurable RAU for NG-PON networks / L. Chorchos, J.P. Turkiewicz, S. Rommel, I.T. Monroy, J.J.V. Olmos, S. Spolitis // 2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – 2016. – P. 66-69. – DOI: 10.1109/RTUWO.2016.7821857.
4. **Rommel, S.** Channel characterization for high-speed W-band wireless communication links / S. Rommel, L.C.P. Cavalcante, J.J.V. Olmos, I.T. Monroy, A.G. Quintero // 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). – 2015. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/OECC.2015.7340310.
5. **Rommel, S.** Outdoor W-band hybrid photonic wireless link based on an optical SFP+ module / S. Rommel, L. Chorchos, E.P. Grakhova, A.Kh. Sultanov, J.P. Turkiewicz, J.J.V. Olmos, I.T. Monroy // IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – Vol. 28, Issue 21. – P. 2303-2306. – DOI: 10.1109/LPT.2016.2592326.
6. **Rommel, S.** Millimeter wave hybrid photonic wireless links for high-speed wireless access and mobile fronthaul. – Ph.D. thesis. – Technical University of Denmark, 2017. – 212 p.
7. Recommendation ITU-R SM.1045-1. Frequency tolerance of transmitters [Electronical Resource]. – 1997. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1045-1-199707-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1045-1-199707-1!!PDF-E.pdf) (request date 10.08.2018).
8. **Salazar, A.R.** Convergence of photonics and electronics for terahertz wireless communications / A.R. Salazar, S. Rommel, E. Anufriyev, J.J.V. Olmos, I.T. Monroy // 2016 21<sup>st</sup> European Conference on Network and Optical Communications (NOC). – 2016. – P. 1-2. – DOI: 10.1109/NOC.2016.7507005.
9. Report ITU-R F.2323-0. Fixed service use and future trends [Electronical Resource]. – 2014. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-F.2323-2014-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-F.2323-2014-PDF-E.pdf) (request date 10.08.2018).
10. **Rommel, S.** 225m outdoor W-band radio-over-fiber link using an optical SFP+ module / S. Rommel, S. Rodriguez, L. Chorchos, E.P. Grakhova, A.Kh. Sultanov, J.P. Turkiewicz, J.J.V. Olmos, I.T. Monroy // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. – 2016. – Th2A.16. – DOI: 10.1364/OFC.2016.Th2A.16.
11. **Mao, F.** Orbital angular momentum radiation from circular patches / F. Mao, T. Li, Y. Shao, J. Yang, M. Huang // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2016. – Vol. 61. – P. 13-18. – DOI: 10.2528/PIERL16012604.
12. **Любобытов, В.С.** Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смешения мод / В.С. Любобытов, А.З. Глявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Барманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 352-359.
13. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Päivänranta, J. Turunen // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2009. – Vol. 11, Issue 6. – 065702. – DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.
14. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photo-lithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15, Issue 5. – P. 331-340. – DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
15. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28, Issue 10. – P. 2115-2123. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
16. **Бурдин, В.А.** Оптоволоконное устройство для разделения мод / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин, О.Г. Морозов, А.А. Кузнецов, А.М. Юдаков // IV Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018). – 2018. – С. 251-258.
17. **Убайдуллаев, Р.Р.** Волоконно-оптические сети. 8.9. AON с коммутацией каналов [Электронный ресурс] / Р.Р. Убайдуллаев. – URL: <https://studfiles.net/preview/1095663/page:78/> (дата обращения 11.08.2018).
18. **Mukherjee, B.** Optical communication networks / B. Mukherjee. – New York: McGraw-Hill, 2005. – 576 p.
19. **Abraha, S.T.** Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. –

- Ph.D. thesis. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2012. – 205 p.
20. **Derickson, D.** Fiber optic test and measurement / D. Derickson. – New Jersey: Prentice Hall, 1998. – 642 p. – ISBN: 978-0-13-534330-2.
  21. **Ерохин, Г.А.** Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев; под ред. Г.А. Ерохина. – М.: Радио и связь, 2009. – 352 с.
  22. **Васильев, С.А.** Волоконные решётки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085-1103.
  23. **Khonina, S.N.** Self-reproduction of multimode laser fields in weakly guiding stepped-index fibers / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2007. – Vol. 16, Issue 3. – P. 167-177. – DOI: 10.3103/S1060992X07030071.
  24. **Харитонов, С.И.** Преобразование конической волны с круговой поляризацией в вихревой цилиндрически поляризованный пучок в металлическом волноводе / С.И. Харитонов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 197-211. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-197-211.
  25. **Khonina, S.N.** Propagation of laser vortex beams in a parabolic optical fiber / S.N. Khonina, A.S. Striletz, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7523. – 75230B (12 p.). – DOI: 10.1117/12.854883.
  26. **Khonina, S.N.** Optical vortices in a fiber: mode division multiplexing and multimode self-imaging / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer. – In: Recent progress in optical fiber research / ed. by M. Yasin, S.W. Harun, H. Arof. – Croatia: INTECH, 2012. – Chapter 15. – P. 327-352. – DOI: 10.5772/28067.
  27. **Bagmanov, V.Kh.** Spinor-based approach on wave processes in optical fiber / V.Kh. Bagmanov, A.Kh. Sultanov // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – 103420C. – DOI: 10.1117/12.2270701.
  28. **Landau, L.D.** Quantum mechanics: Non-relativistic theory / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – 3<sup>rd</sup> ed. – Oxford: Pergamon Press, 1971. – Vol. 3. – 616 p. – ISBN: 978-0-08-020940-1.
  29. **Андреева, К.В.** Расчёт экструдированных преломляющих оптических элементов, формирующих заданные распределения интенсивности / К.В. Андреева, Е.С. Андреев, М.А. Моисеев, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 812-819. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-812-819.
  30. **Карпеев, С.В.** Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
  31. **Андрианова, А.В.** Подход к получению 3D-наноструктурного стеклокерамического материала на основе интенсивной пластической деформации / А.В. Андрианова, И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, Г.И. Абдрахманова, Е.П. Грахова, А.А. Ишмияров, Л.З. Янтилина // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 489-500. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500.

#### Сведения об авторах

**Виноградова Ирина Леонидовна**, 1970 года рождения, доктор технических наук, доцент, в 1992 году окончила Уфимский авиационный институт (УАИ, ныне – Уфимский государственный авиационный технический университет – УГАТУ) по специальности «Информационно-измерительная техника», работает ведущим научным сотрудником на кафедре телекоммуникационных систем в УГАТУ. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, математическая обработка сигналов, широкополосные системы передачи, антенная техника. E-mail: [vil-4@mail.ru](mailto:vil-4@mail.ru).

**Мешков Иван Константинович**, 1985 года рождения, кандидат технических наук, доцент, в 2007 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает доцентом на кафедре телекоммуникационных систем в УГАТУ. Область научных интересов: обработка сигналов, спутниковые данные, обработка цифровых сигналов. E-mail: [mik.ivan@bk.ru](mailto:mik.ivan@bk.ru).

**Грахова Елизавета Павловна**, 1990 года рождения, в 2012 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает доцентом на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: обработка сигналов, сверхширокополосные системы передачи, антенная техника. E-mail: [eorlingsbest@mail.ru](mailto:eorlingsbest@mail.ru).

**Султанов Альберт Ханович**, 1950 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1973 году окончил Новосибирский электротехнический институт связи (НЭИС, ныне – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики – СибГУТИ) по специальности «Многоканальная электросвязь», работает заведующим кафедрой телекоммуникационных систем в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ). Область научных интересов: полупроводниковая и антенная техника, оптика, связь, обработка изображений. E-mail: [tku@ugatu.ac.ru](mailto:tku@ugatu.ac.ru).

**Багманов Валерий Хусаинович**, 1951 года рождения, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Доктор технических наук (2007 год), профессор кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. Является

членом международного научного общества SPIE. Специалист в области моделирования и обработки сложных сигналов в телекоммуникационных системах. Автор более 200 статей и 4 монографий. E-mail: [tk@ugatu.ac.ru](mailto:tk@ugatu.ac.ru).

**Воронкова Анна Владимировна**, 1990 года рождения, в 2012 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы», работает старшим преподавателем на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, сверхширокополосные системы передачи. E-mail: [annette210590@gmail.com](mailto:annette210590@gmail.com).

**Гизатулин Азат Ринатович**, 1992 года рождения, в 2016 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по направлению подготовки магистров «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», работает ассистентом на кафедре телекоммуникационных систем. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы. E-mail: [azat\\_poincare@mail.ru](mailto:azat_poincare@mail.ru).

ГРНТИ: 49.44.31.

Поступила в редакцию 20 августа 2018 г. Окончательный вариант – 4 октября 2018 г.

## SECURED ROF SEGMENT IN SUBTERAHERTZ RANGE PROVIDING INDEPENDENT OPTICAL MODULATION OF RADIOCHANNEL FREQUENCY CHARACTERISTICS AND PHASED ANTENNA ARRAY BEAMSTEERING PARAMETER

I.L. Vinogradova<sup>1</sup>, I.K. Meshkov<sup>1</sup>, E.P. Grakhova<sup>1</sup>, A.Kh. Sultanov<sup>1</sup>, V.Kh. Bagmanov<sup>1</sup>, A.V. Voronkova<sup>1</sup>, A.R. Gizatulin<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

### Abstract

Design principles are proposed for a secure subterahertz RoF segment providing independent optical modulation by radiochannel frequency characteristics and a phased antenna array beamsteering parameter. A design scheme of the RoF segment for the W-range is proposed. The results obtained include co-transmission of two modes (one of which is polarized), radio channel frequency properties control, orbital angular momentum signal shaping, co-transmission of a modulated optical signal and a polarized signal and orbital angular momentum signal. Simulation is carried out for signals with a given spin-orbit state based on a Hamiltonian approach. Results of a phase-amplitude filter calculation are presented.

**Keywords:** Radio-over-Fiber, subterahertz W-range, phased antenna array, spatial light modulator, fiber optic communications, and diffractive optical element.

**Citation:** Vinogradova IL, Meshkov IK, Grakhova EP, Sultanov AKh, Bagmanov VKh, Voronkova AV, Gizatulin AR. Secured RoF segment in subterahertz range providing independent optical modulation of radiochannel frequency characteristics and phased antenna array beamsteering parameter. *Computer Optics* 2018; 42(5): 786-799. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-786-799.

**Acknowledgements:** The study was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 18-19-00123. The authors are grateful to the JSC “NPP Poligon” for their assistance in conducting the experimental studies. The authors are grateful to professors V.A. Burdin and A.V. Burdin for advising on the experimental research.

### References

- [1] Rommel S, Olmos JJV, Monroy IT. 15Gbit/s duobinary transmission over a W-Band radio-over-fiber link. 2016 *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)* 2016: 197-200. DOI: 10.1109/RTUWO.2016.7821883.
- [2] Chorcho L, Rommel S, Turkiewicz JP, Olmos JJV, Monroy IT. Reconfigurable radio access unit for DWDM to W-band wireless conversion. *IEEE Photon Technol Lett* 2017; 29(6): 489-492. DOI: 10.1109/LPT.2017.2656894.
- [3] Chorcho L, Turkiewicz JP, Rommel S, Monroy IT, Olmos JJV, Spolitis S. W-band real-time transmission utilizing a reconfigurable RAU for NG-PON networks. 2016 *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)* 2016: 66-69. DOI: 10.1109/RTUWO.2016.7821857.
- [4] Rommel S, Cavalcante LCP, Olmos JJV, Monroy IT, Quintero AG. Channel Characterization for High-Speed W-Band Wireless Communication Links. 2015 *Opto-Electronics and Communications Conference – OECC* 2015: 1-3. DOI: 10.1109/OECC.2015.7340310.
- [5] Rommel S, Chorcho L, Grakhova EP, Sultanov AKh, Turkiewicz JP, Olmos JJV, Monroy IT. Outdoor W-band hybrid photonic wireless link based on an optical SFP+ Module. *IEEE Photon Technol Lett* 2016; 28(21): 2303-2306. DOI: 10.1109/LPT.2016.2592326.
- [6] Rommel S. Millimeter wave hybrid photonic wireless links for high-speed wireless access and mobile fronthaul. Ph.D. thesis. Technical University of Denmark; 2017.
- [7] Recommendation ITU-R SM.1045-1. Frequency tolerance of transmitters. Source: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1045-1-199707-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1045-1-199707-1!!PDF-E.pdf).
- [8] Salazar AR, Rommel S, Anufriyev E, Olmos JJV, Monroy IT. Convergence of photonics and electronics for terahertz wireless communications. 2016 21<sup>st</sup> European Conference on Network and Optical Communications (NOC) 2016: 1-2. DOI: 10.1109/NOC.2016.7507005.

- [9] Report ITU-R F.2323-0. Fixed service use and future trends. Source: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-F.2323-2014-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-F.2323-2014-PDF-E.pdf).
- [10] Rommel S, Rodriguez S, Chorchos L, Grakhova EP, Sultanov AKh, Turkiewicz JP, Olmos JJV, Monroy IT. 225m outdoor W-band radio-over-fiber link using an optical SFP+ module. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition 2016: Th2A.16. DOI: 10.1364/OFC.2016.Th2A.16.
- [11] Mao F, Li T, Shao Y, Yang J, Huang M. Orbital angular momentum radiation from circular patches. Progress in Electromagnetics Research Letters 2016; 61: 13-18. DOI: 10.2528/PIERL16012604.
- [12] Luybopytov VS, Tlyavlin AZ, Sultanov AKh, Bagmanov VKh, Khonina SN, Karpyeev SV, Kazanskiy NL. Mathematical model all optical detecting system of mode propagation parameters in optical fiber in fewmode for adaptive mode compensation [In Russian]. Computer Optics 2013; 37(3): 352-359.
- [13] Khonina SN, Balalayev SA, Skidanov RV, Kotlyar VV, Päivänranta B, Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 2009; 11(6): 065702. DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.
- [14] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. Optics and Lasers in Engineering 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
- [15] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements. J Opt Soc Am A 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [16] Burdin VA, Burdin AV, Morozov OG, Kuznetsov AA, Yudakov AM. Fiber optic device for mode splitting [In Russian]. IV International conference on Information technology and Nanotechnology (ITNT-2018) 2018: 251-258.
- [17] Ubaidullaev RR. Fiber optic networks. 8.9. AON with channel switching. Source: <https://studfiles.net/preview/1095663/page:78/>.
- [18] Mukherjee B. Optical communication networks. New York: McGraw-Hill; 2005.
- [19] Abraha ST. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. Ph.D. Thesis. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2012.
- [20] Derickson D. Fiber optic test and measurement. New Jersey: Prentice Hall; 1998. ISBN: 978-0-13-534330-2.
- [21] Erokhin GA, Chernyshev OV, Kozirev ND. Antenna-feeder devices and propagation of radio waves [In Russian]. Moscow: "Radio and svyaz" Publisher; 2009.
- [22] Vasil'ev SA, Medvedkov OI, Korolev IG, Bozhkov AS, Kurkov AS, Dianov EM. REVIEW: Fibre gratings and their applications [In Russian]. Quantum Electronics 2005; 35(12): 1085-1103. DOI: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041
- [23] Khonina SN, Volotovskiy SG. Self-reproduction of multimode laser fields in weakly guiding stepped-index fibers. Opt Mem Neural Networks 2007; 16(3): 167-177. DOI: 10.3103/S1060992X07030071.
- [24] Kharitonov SI, Khonina SN. Conversion of a conical wave with circular polarization into a vortex cylindrically polarized beam in a metal waveguide [In Russian]. Computer Optics 2018; 42(2): 197-211. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-197-211.
- [25] Khonina SN, Striletz AS, Kovalev AA, Kotlyar VV. Propagation of laser vortex beams in a parabolic optical fiber. Proc SPIE 2010; 7523: 75230B. DOI: 10.1117/12.854883.
- [26] Khonina SN, Kazanskiy NL, Soifer VA. Optical vortices in a fiber: mode division multiplexing and multimode self-imaging. In Book: Yasin M, Harun SW, Arof H, eds. Recent progress in optical fiber research. Chap 15. Croatia: "Intech" Publisher; 2012: 327-352. DOI: 10.5772/28067.
- [27] Bagmanov VKh, Sultanov AKh. Spinor-based approach on wave processes in optical fiber. Proc SPIE 2017; 10342: 103420C. DOI: 10.1117/12.2270701.
- [28] Landau LD, Lifshitz EM. Quantum mechanics: Non-relativistic theory. 3<sup>rd</sup> ed. Vol. 3. Oxford: Pergamon Press; 1971.
- [29] Andreeva KV, Adreev SV, Moiseev MA, Kravchenko SV, Byzov EV, Doskolovich LL. Design of extruded refractive optical elements to generate a prescribed intensity distribution [In Russian]. Computer Optics 2017; 41(6): 812-819. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-812-819.
- [30] Karpeev SV, Alferov SV, Khonina SN, Kudryashov SI. Study of the broadband radiation intensity distribution formed by diffractive optical elements [In Russian]. Computer Optics 2014; 38(4): 689-694.
- [31] Andrianova AV, Vinogradova IL, Sultanov AKh, Meshkov IK, Abdrakhmanova GI, Grakhova EP, Ishmiyarov AA, Yantilina LZ. An approach to synthesizing a 3D nanostructured glass-ceramic material based on intensive high-pressure torsion [In Russian]. Computer Optics 2016; 40(4): 489-500. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500.

#### Author's information

**Irina Leonidovna Vinogradova** (b. 1970), Doctor of Technical Science, Assistant Professor, graduated from Ufa Aviation Institute in 1992 (presently – Ufa State Aviation Technical University), majoring in "Information and Measuring Equipment". She works as the lead researcher at the Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests are currently focused on fiber optics, telecommunications systems, mathematical signal processing, broadband transmission systems, antenna technology. E-mail: [vil-4@mail.ru](mailto:vil-4@mail.ru).

**Ivan Konstantinovich Meshkov** (b. 1985), Candidate of Technical Science, Assistant Professor, received Eng. Deg. in 2007 in Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television from Ufa State Aviation Technical University. He works as assistant professor at the Telecommunication Systems department in USATU. His research interests include signal processing, satellite data processing, digital signal processing. E-mail: [mik.ivan@bk.ru](mailto:mik.ivan@bk.ru).

**Elizaveta Pavlovna Grakhova** (b. 1990), received Eng. Deg. in 2012 in Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television from Ufa State Aviation Technical University. Currently she works as assistant professor at Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests include signal processing, ultra wideband transmission systems, antenna technology. E-mail: [eorlingsbest@mail.ru](mailto:eorlingsbest@mail.ru).

**Albert Khanovich Sultanov** (b. 1950), Doctor of Technical Science, Professor, graduated from Novosibirsk Electrotechnical Institute of Telecommunications in 1973 (presently – Siberia State University of Telecommunications and Informatics), majoring in “Multichannel Electrocommunication”. Currently he is the Head of Telecommunication Systems department in Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests include semiconductor and antenna techniques, optics, communication and image processing. E-mail: [tko@ugatu.ac.ru](mailto:tko@ugatu.ac.ru) .

**Valeriy Khusainovich Bagmanov** (b. 1950), graduated from the Physics faculty at the Moscow State University named after M.V. Lomonosov. Doctor of Technical Sciences, Professor of Telecommunication Systems department at Ufa State Aviation Technical University. He is a *SPIE*-member. He is co-author of about 200 scientific papers and 4 monographs. E-mail: [tko@ugatu.ac.ru](mailto:tko@ugatu.ac.ru) .

**Anna Vladimirovna Voronkova** (b. 1990) received Eng. Deg. in 2012 in Multichannel Telecommunication Systems from Ufa State Aviation Technical University. Currently she works as senior lecturer at Telecommunication Systems department in USATU. Her research interests include fiber optics, telecommunication systems, ultra wideband systems. E-mail: [annette210590@gmail.com](mailto:annette210590@gmail.com) .

**Azat Rinatovich Gizatulin** (b. 1992), received master degree in 2016 in Infocommunication Technologies and Communications from Ufa State Aviation Technical University He works as assistant at the Telecommunication Systems department in USATU. His research interests include fiber optics, telecommunication systems. E-mail: [azat\\_poincare@mail.ru](mailto:azat_poincare@mail.ru) .

---

*Received August 20, 2019. The final version – October 4, 2018.*

---