

УДК 621.373.826

ФОТОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КАК СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ ЗАДЕРЖКИ РАДИОСИГНАЛОВ

Т.Н. Бахвалова, стажер-исследователь

М.Е. Белкин[@], д.т.н., директор НТЦ «Интегральная радиофотоника»

И.В. Гладышев, к.ф.-м.н., доцент

С.А. Кудж, д.т.н., ректор

А.С. Сигов, академик РАН, президент

*Московский технологический университет (МИРЭА),
Москва 119454, Россия*

[@]Автор для переписки, e-mail: belkin@mirea.ru

Предложены новые принципы построения сверхширокополосного устройства задержки радиосигналов СВЧ-диапазона, учитывающие недостатки современных волоконно-оптических устройств задержки радиосигналов и обеспечивающие возможность совершенствования ключевых технических показателей. Это: введение распределенной схемы формирования модулированного оптического сигнала, содержащей набор маломощных высокоэффективных лазеров с непосредственной модуляцией и спектральным разделением каналов на базе стандартной сетки, что приводит к уменьшению энергопотребления и потерь при передаче; использование в качестве среды замедления сигналов многосердцевинного оптического волокна, что обеспечит почти пропорциональное числу сердцевин улучшение массогабаритных характеристик устройства; введение двухступенчатой схемы обработки (задержки) с промежуточным узлом суммирования и ретрансляции, что позволит уменьшить шаг задержки и возможность одновременного вывода всех градаций задержки; введение в оконечной ступени устройства оптической рециркуляционной схемы задержки, что дает возможность увеличить максимальное время задержки до миллисекундного диапазона. В данной статье представлены базирующиеся на ранее рассмотренных конкретных схемах результаты анализа вариантов построения структурных узлов экспериментального образца волоконно-оптического устройства задержки радиосигналов, предварительного моделирования с целью сокращения временных и финансовых затрат в ходе разработки, а также макетирования для подтверждения корректности выбора.

Ключевые слова: устройство задержки радиосигналов, фотоника, радиофотоника, волоконно-оптические схемы задержки, компьютерное моделирование, экспериментальное исследование.

PHOTONICS TECHNOLOGY AS A WAY FOR UPGRADING KEY TECHNICAL FEATURES OF RADIO-SIGNAL DELAY DEVICES

T.N. Bakhvalova,
M.E. Belkin@,
I.V. Gladyshev
S.A. Kudzh,
A.S. Sigov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: belkin@mirea.ru

Based on the previous results for our investigations of various retarding materials for super-wide bandwidth long-term delay lines and shortcomings of the available fiber-optic delay links based on binary delay chain where semiconductor optical switches are used to switch in or out delay segments that are binary multiples of a minimum delay, the principles of optimization and design of next-generation fiber-optics radio-frequency delay devices are proposed. They include: (1) distributed structure of low-power emitters based on dense wavelength division multiplexing, (2) multicore optical fiber as retarding medium, (3) two-stage processing including optoelectronic repeater unit, and (4) optical recirculation time-delay circuit. Computer-aided simulation and experimental verification of the proposed principles have shown their feasibility, efficiency and the opportunity to improve significantly the energy consumption and weight-dimensional characteristics, to increase the maximum delay time up to the millisecond range with a step in the microsecond range, also to improve the quality and flexibility of the various apparatuses on basis of these devices.

Keywords: radio-frequency delay device, photonics, microwave photonics, fiber-optic delay link, computer-aided simulation, experimental verification.

Введение

Как известно, операция задержки является неотъемлемой частью процесса обработки сигналов, благодаря чему устройства задержки непрерывных и импульсных радиосигналов (УЗРС) находят широкое применение в аппаратуре современных информационно-телекоммуникационных и радиолокационных систем и измерительной технике. К примеру, они используются в диаграммообразующих устройствах активных фазированных антенных решеток (АФАР), приемной аппаратуре систем радиосвязи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия (РЭП), радиоопределения и радионавигации [1–3]. В аналоговых и цифровых радиоприемных средствах телекоммуникационных систем для вещания и связи, а также в радиоизмерительных приборах схемы задержки традиционно входят в состав, например, фильтров, фазовых корректоров, демодуляторов, декодеров и т.д. [4]. Такой уровень распространения и разнообразие условий применения определяют широкий диапазон требований к времени задержки, типично составляющий от единиц наносекунд до сотен микросекунд.

Проведенный нами комплексный анализ традиционных вариантов построения УЗРС [5] на базе электрических, акустических, спин-волновых и сверхпроводящих схем задержки показал, что ни один из них в полной мере не удовлетворяет современным требованиям. Основными проблемами являются недостаточно широкий интервал времени задержки, чрезмерные вносимые потери даже при узкой полосе пропускания, формирование и недостаточное подавление ложных сигналов, плохие эксплуатационные характеристики. Тем не менее, наилучшие параметры с точки зрения реализации сверхширокополосного УЗРС обеспечиваются при использовании цифровой электрической схемы задержки на базе DRFM¹ в интегральном исполнении [3]. Однако данный тип обладает рядом существенных недостатков, в частности, необходимостью дополнительного преобразования в цифровую форму, относительно высоким энергопотреблением, работой в ограниченном диапазоне частот, что в большинстве практических случаев требует дополнительных понижающего и повышающего частоты преобразований, необходимоостью тщательного экранирования аналоговых и цифровых узлов схемы.

В связи с этим возникла потребность в использовании других принципов задержки радиосигналов, и здесь перспективным вариантом считается реализация аналоговых УЗРС на базе фотонной технологии с применением волоконно-оптических линий задержки (ВОЛЗ). В отношении них уже много лет тому назад предсказано, что благодаря компактности, низким потерям, широкой полосе, нечувствительности к электромагнитным наводкам они найдут эффективное применение в измерительной технике, радиолокационных станциях, различных устройствах обработки сигналов диапазона выше 1 ГГц [6]. В настоящее время данная технология получила широкое распространение при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона как способ совершенствования ключевых технических показателей устройств формирования и обработки радиосигналов в общем, так и ВОЛЗ, в частности [7, 8]. Например, в [7] рассмотрены два варианта построения сверхширокополосных аналоговых УЗРС K_u - и K_a -диапазонов на базе так называемых бинарных ВОЛЗ с диапазоном задержек 1–511 мкс при шаге 1 мкс. Там же отмечен принципиальный недостаток такого способа построения, заключающийся в невозможности одновременно появления на выходе УЗРС всех и даже части задержанных копий или обеспечения постоянного доступа к памяти. Для преодоления указанного недостатка, важного для применения, например, в средствах РЭП, нами предложены новые принципы построения волоконно-оптических УЗРС [9]:

- введение распределенной схемы формирования модулированного оптического сигнала, содержащей набор маломощных высокоэффективных лазеров с непосредственной модуляцией и спектральным разделением каналов на базе стандартной сетки, что приводит к уменьшению энергопотребления и потерь пре передаче;
- использование в качестве среды замедления сигналов многосердцевинного оптического волокна (МСОВ), что обеспечит почти пропорциональное числу сердцевин улучшение массогабаритных характеристик УЗРС;
- введение двухступенчатой схемы обработки (задержки) с промежуточным узлом суммирования и ретрансляции, что обеспечит уменьшение шага задержки и

¹Digital Radio-Frequency Memory

возможность одновременного вывода всех градаций задержки;

- введение в оконечной ступени УЗРС оптической рециркуляционной схемы задержки, что позволяет увеличить максимальное время задержки до миллисекундного диапазона.

Вышеуказанные принципы были подтверждены экспериментально [9]. Кроме того, в [10] рассмотрены конкретные схемы, позволяющие реализовать предложенные принципы.

В данной статье представлены результаты анализа вариантов построения структурных узлов экспериментального образца волоконно-оптической УЗРС, предварительного моделирования с целью сокращения временных и финансовых затрат в ходе разработки, а также макетирования с целью подтверждения корректности выбора.

1. Объект исследования и подход к моделированию

Структурная схема волоконно-оптического УЗРС, разработанного на основе рассмотренных выше принципов построения, представлена на рис. 1, где УФМ – узел формирования и модуляции оптического сигнала, УПО – узел предварительной обработки, УРТ – узел ретрансляции, УФОД – узел финальной обработки и детектирования. Общее функциональное назначение каждого узла понятно из его названия. Основной целью моделирования явилось подтверждение реализуемости и оптимального построения вышеуказанных узлов. Моделирование проводилось при помощи одной из наиболее совершенных систем автоматизированного проектирования (САПР) волоконно-оптических телекоммуникационных систем VPI Transmission Maker (VPI TM) фирмы VPIphotonics [11]. САПР VPI TM представляет собой САПР телекоммуникационных волоконно-оптических систем (ТВОС) различных назначений и позволяет эффективно разрабатывать новые фотонные и радиопотонные узлы и устройства на основе волоконных и интегральных волноводов, а также модернизировать уже существующие путем замены их отдельных функциональных элементов. Библиотека элементов представлена обширным набором модулей, параметры которых в большинстве своем

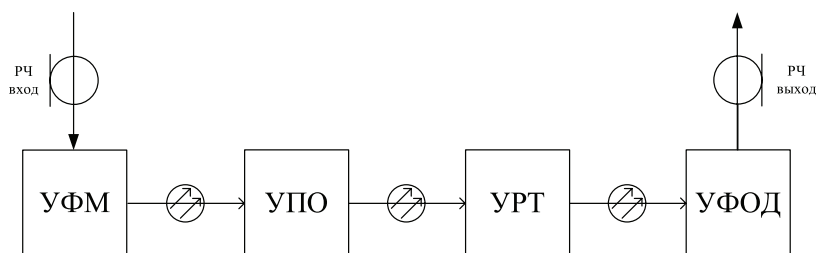


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического устройства задержки непрерывных и импульсных радиосигналов (УЗРС).

могут быть изменены. В процессе моделирования параметры встроенных библиотечных моделей элементов схем выбирались из справочных данных серийно выпускаемой оптоэлектронной и оптической компонентной базы лучших мировых производителей. Общие параметры среды расчета подбирались таким образом, чтобы возможно было промоделировать ключевые характеристики с высокой точностью за минимальное время, и варьировались в зависимости от рассчитываемой модели. В ходе моделиро-

вания, в первую очередь, оценивалась принципиальная возможность реализации линии задержки, поэтому, например, влияние шумов элементов не учитывалось. В связи с отсутствием в библиотеке VPI TM модели относительно нового многосердцевидного волокна моделирование проводилось также с использованием соответствующего числа моделей стандартного одномодового волокна. Частоты лазерного излучения выбирались из 29–36 каналов С-диапазона по сетке DWDM-100 GHz, согласно рекомендации ITU-T G.692.

2. Моделирование и макетирование узла формирования и модулирования

Назначение узла формирования и модулирования оптического сигнала состоит в эффективной генерации лазерного излучения, управлении его интенсивностью модулирующим сигналом радиочастотного (РЧ) диапазона и стыковки со следующим за ним УПО (рис. 1). Рассмотрены три варианта построения схемы данного узла, обеспечивающие формирование 8 каналов модулированного СВЧ-сигналами когерентного оптического излучения для дальнейшей обработки в последующих узлах УЗРС. В варианте 1 исследовалась экономичная схема непосредственной модуляции лазерных излучателей одним и тем же СВЧ-радиосигналом, а в варианте 2 – традиционная для радиофотонного подхода схема внешней модуляции лазерного излучения, в которой, согласно данным разработки ТВОС, обеспечивается больший динамический диапазон. В наиболее простой схеме УФМ варианта 3 используется внешняя модуляция единственного полупроводникового лазера большой мощности. Модуляция во всех трех вариантах осуществлялась последовательностью прямоугольных радиоимпульсов длительностью 100 нс, периодом повторения 2 мкс, частотой заполнения 5 ГГц.

Анализ перечисленных вариантов показал, что обеспечить формирование последовательности импульсов определенной скважности с заполнением радиочастотным сигналом можно с помощью любого из них. Однако имеются и существенные различия. Так, введение внешнего модулятора с полосой электрооптического преобразования в СВЧ-диапазоне (варианты 2 и 3), цена которого превышает стоимость всех остальных структурных элементов УФМ, существенно ухудшает экономические характеристики УЗРС. Кроме того, за счет дополнительных потерь во внешнем модуляторе мощность выходного сигнала будет меньше, чем в случае непосредственной модуляции (вариант 1). В случае единственного полупроводникового лазера большой мощности (вариант 3) возникают проблемы с теплоотводом, кроме того, все 8 каналов имеют одинаковую оптическую несущую, что не обеспечивает гибкость дальнейшей обработки. Поэтому для работы в составе экспериментального образца УЗРС выбран вариант 1 УФМ с непосредственной модуляцией излучения полупроводниковых лазеров. На рис. 2 представлены его структурная схема (а) и разработанная на ее основе компьютерная модель (б). Результаты моделирования выходного оптического спектра при глубине модуляции около 60%, что является типичным режимом для непосредственной модуляции СВЧ сигналом, показаны на рис. 3. Как следует из рис. 3, расстояние между оптическими несущими всех восьми каналов одинаковое и соответствует выбранной спектральной сетке DWDM-100GHz. Коэффициент подавления спектральных составляющих на границах между оптическими каналами примерно равен 30 дБ, что согласуется с принятыми требованиями при многоканальной передаче в аналоговых ТВОС.

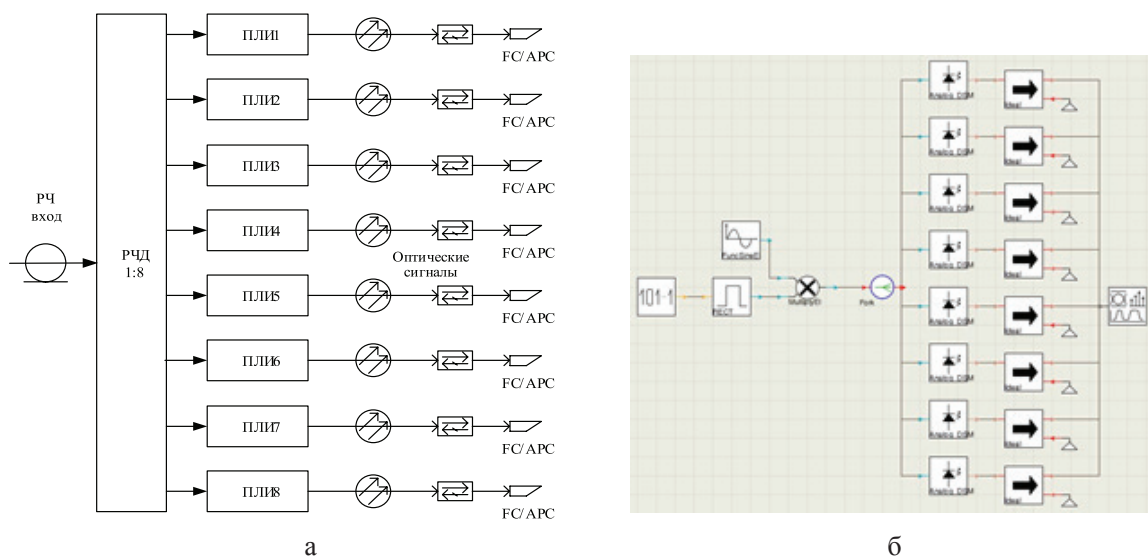


Рис. 2. Структурная схема (а) и модель (б) оптимального варианта построения узла формирования и модуляции оптического сигнала исследуемого УЗРС:

РЧД – радиочастотный делитель; ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель.

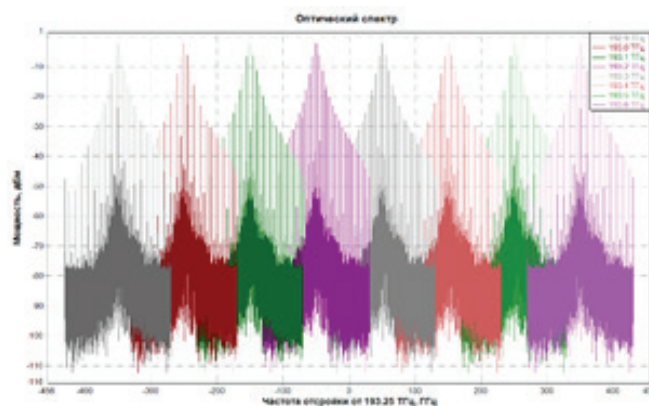


Рис. 3. Выходной оптический спектр модели узла формирования и модуляции оптического сигнала (УФМ).

С целью экспериментального подтверждения корректности выбранной схемы УФМ проведена количественная оценка основного показателя качества передачи аналоговых СВЧ-радиосигналов – линейности выбранных для моделирования лазерных излучателей. Данный технический показатель стандартно проверяется путем определения уровня входной мощности СВЧ-сигнала, который соответствует так называемой точке пересечения третьего порядка (IP3) на характеристике электрооптического преобразования в режиме большого сигнала, рассчитываемой по результатам измерения коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка (ИМИЗ) [7]. Результаты измерения ИМИЗ на частотах 9.95 и 10.1 ГГц при подаче на вход макета излучателя двух немодулированных сигналов мощностью $P_{\text{вх}} = 25$ дБм каждый на частотах 10 и 10.05 ГГц приведены на рис. 4. Видно, что уровень ИМИЗ составляет -47 дБн. Результаты расчета IP3 на основе полученного значения ИМИЗ представлены на рис. 5, где показаны экспериментальные зависимости от входной мощности ($P_{\text{вх}}$) выходной мощности ($P_{\text{вых}}$) первой гармоники (зеленая линия) и ИМИЗ (красная линия). Согласно данным на рис. 5, уровень $P_{\text{вх}}$ в точке IP3 составляет 27.5 дБм, что свидетельствует о высокой линейно-

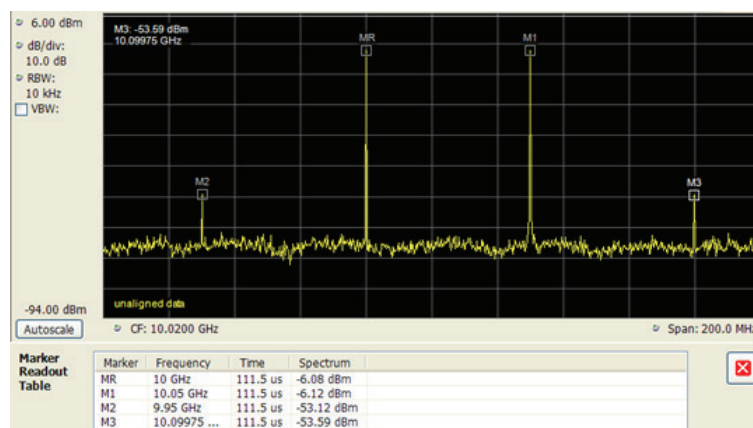


Рис. 4. Измеренная характеристика интермодуляционных искажений 3-го порядка (ИМИЗ)

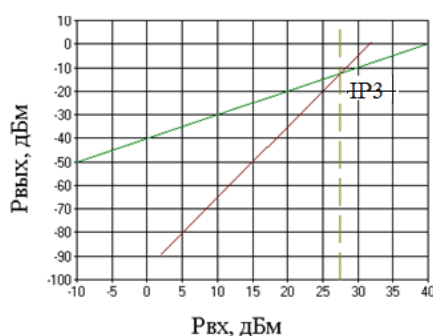


Рис. 5. Экспериментальные зависимости выходной мощности ($P_{\text{вых}}$) (зеленая линия) и ИМИЗ (красная линия) от входной мощности ($P_{\text{вх}}$) первой гармоники.

сти характеристики электрооптического преобразователя выбранного лазерного излучателя [7].

3. Моделирование и макетирование узла предварительной обработки

Компьютерное моделирование проводилось для двух вариантов узла предварительной обработки сигнала (УПО), которые содержали два каскадно-включенных узла, соответственно, выполняющих функции переключаемых и фиксированных задержек [12]. Вариант 1: восемь сегментов переключаемых ВОЛЗ на время 0–0.6 мкс с шагом 0.2 мкс и 8 сегментов фиксированных ВОЛЗ на время 0–5.6 мкс с шагом 0.8 мкс; вариант 2: четыре сегмента переключаемых ВОЛЗ на время 0–1.4 мкс с шагом 0.2 мкс и 4 сегмента фиксированных ВОЛЗ на время 0–4.8 мкс с шагом 1.6 мкс. В первом случае используются 8 различных оптических частот, соответствующих 29–36 каналам С-диапазона по сетке DWDM-100GHz и 4 вариантам линий задержек в каждом канале. Времена задержки выбирались из соображения, чтобы при учете полного времени задержки для каждого из каналов на выходе узла сигналы не перекрывались. В качестве входного сигнала использовался сигнал, получающийся в результате моделирования выбранного УФМ, состоящего из 8 лазеров с прямой модуляцией. Второй вариант УПО отличается тем, что используются только 4 оптические частоты, но с 8 вариантами линий задержек в каждом канале.

Моделирование показало, что оба варианта обеспечивают формирование последовательности импульсов различной амплитуды с заданными временами задержки,

однако число импульсов в последовательности в случае 4-канального УПО получается в 2 раза меньше, что ограничивает возможности по формированию сложных последовательностей импульсов. Поэтому для работы в составе экспериментального образца УЗРС выбран первый вариант УПО с использованием 8 оптических каналов и 4 переключаемых линий задержки в каждом канале. На рис. 6 представлены его структурная схема, содержащая 8 переключаемых и 8 фиксированных модулей задержки (а), и разработанная на ее основе компьютерная модель (б). Пример результатов моделирования временной зависимости выходной мощности импульсов модели выбранного УПО без учета влияния оптических аттенюаторов (ОА на рис. 6) показан на рис. 7. Очевидно (рис. 7), что задержка по всем восьми каналам соответствует указанным на вкладке к рисунку значениям задержек ВОЛЗ. Большой разброс выходных мощностей по каналам, причиной которого являются потери в ВОЛЗ различной длины, может быть уменьшен при помощи ОА.

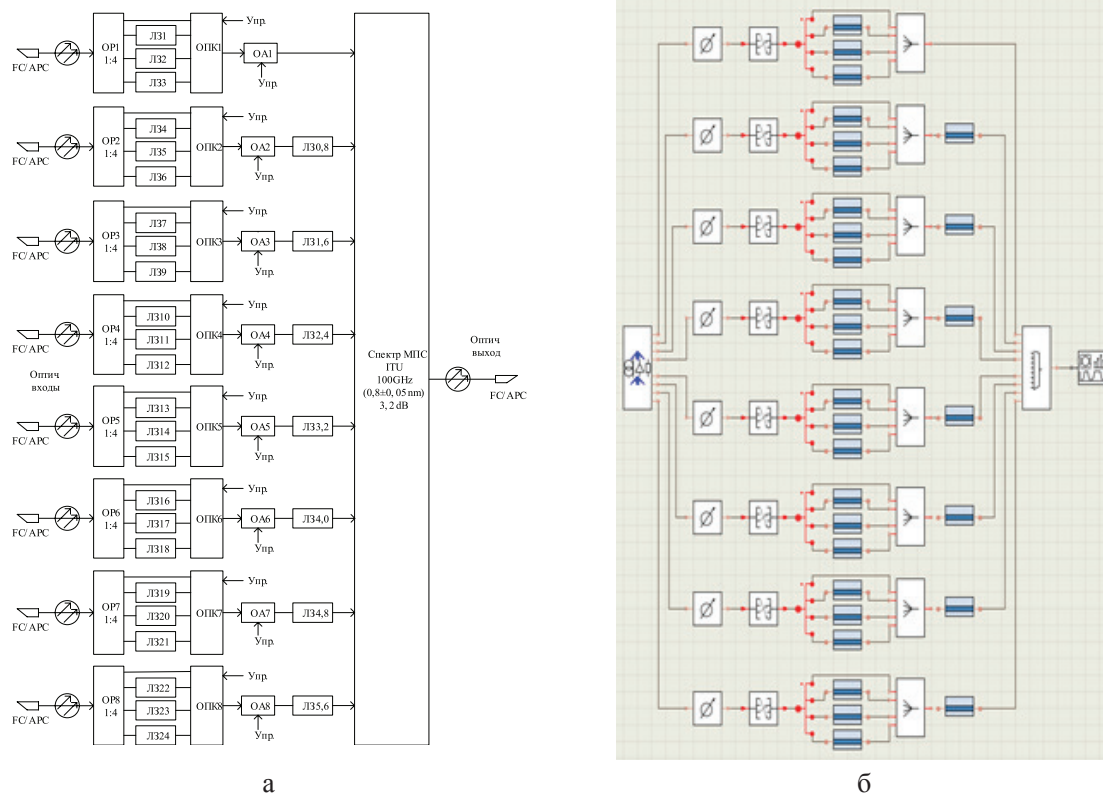


Рис. 6. Структурная схема (а) и модель (б) оптимального варианта построения узла предварительной обработки оптического сигнала исследуемого УЗРС:

ОР – оптический разветвитель; ЛЗ – оптическая линия задержки;
ОПК – оптический переключатель; ОА – оптический аттенюатор.

С целью подтверждения корректности выбранной схемы УПО проведено макетирование и экспериментальное исследование двух ключевых структурных элементов схемы УПО (рис. 6), построенных на базе МСВ: фиксированного модуля задержки (ФМЗ) с параллельным включением сегментов задержки и переключаемого модуля задержки (ПМЗ) с выбором сегмента задержки при помощи электрически управляемого оптического переключателя. Во время испытаний на вход обоих макетов подавались оптические

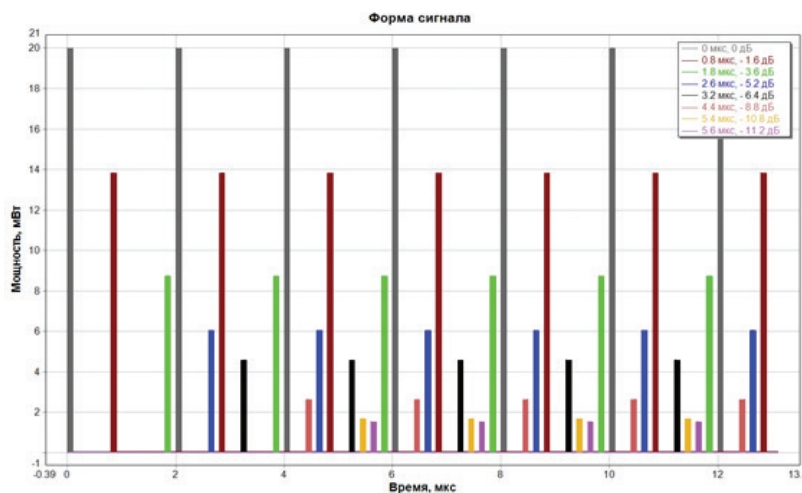


Рис. 7. Временная зависимость выходной мощности модели выбранного узла предварительной обработки оптического сигнала. На вставке указаны использованные для данного канала время задержки и ослабление.

ские несущие С-диапазона, модулированные импульсными радиосигналами длительностью 0.1 мкс, периодом следования 1 мкс и частотами заполнения 80 МГц и 10 ГГц.

Функциональная схема макета оптического тракта ФМЗ на базе одномодового 7-сердцевинного МСОВ (МСОВ-7) приведена на рис. 8. Здесь оптические соединители условно обозначены круглой скобкой, а электрические – угловой. Согласно рис. 8, на входы ФМЗ поступают четыре модулированных оптических сигнала на центральных длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Канал 1 без задержки на волне λ_1 напрямую поступает на соответствующий вход спектрального мультиплексора (СМП), а остальные каналы задерживаются на фиксированное время τ , либо 2τ , либо 3τ , для чего поступают на соответствующие входы устройства ввода-вывода УВВ1 катушки МСОВ-7. В данном случае $\tau=0.2$ мкс, что соответствует длине МСОВ порядка 40 м. Задержанные копии поступают в УВВ2, где сопрягаются со стандартными односердцевинными одномодовыми волокнами типа SMF-28, с помощью которых, как и для канала без задержки, в схеме обеспечивается эффективное оптическое соединение с остальными тремя входами СМП: вывода «е» УВВ1 и выводов «а» и «г» УВВ2.

Результаты измерения вносимых задержек приведены на рис. 9, где показана осциллограмма радиосигналов на выходе макета ФМЗ для случая использования частоты заполнения импульсов 80 МГц. Благодаря примененному принципу спектрального разделения каналов, на выходе макета помимо исходного радиосигнала (левый) появились три его копии (рис. 9), задержанные, соответственно, на 192, 398 и 624 нс. При этом погрешность времени задержки составляет, соответственно, 4, 0.5 и 4%, то есть испытываемый макет ФМЗ можно классифицировать как схему со средней (каналы 1 и 3) либо высокой (канал 2) относительной точностью задержки [4]. Как показали исследования, основная причина разброса точностей состоит в различии задержек оптических каналов примененного в макете ФМЗ спектрального мультиплексора (СМП на рис. 8). Однако данное ограничение не является принципиальным, и на практике точность задержки может быть легко повышена путем подбора длины стандартных волокон в УВВ примененного 7-сердцевинного волокна. Причиной различия амплитуд радиоимпульсов являются по-

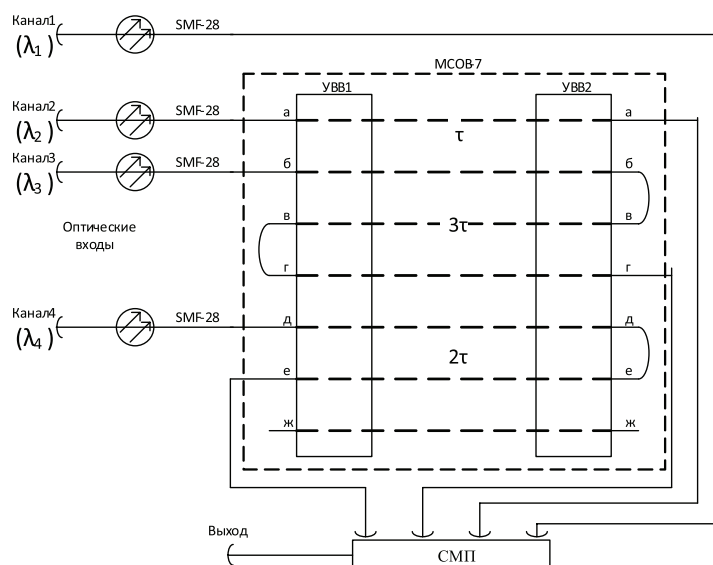


Рис. 8. Функциональная схема оптического тракта фиксированного модуля задержки (ФМЗ) на базе одномодового 7-сердцевинного волокна.

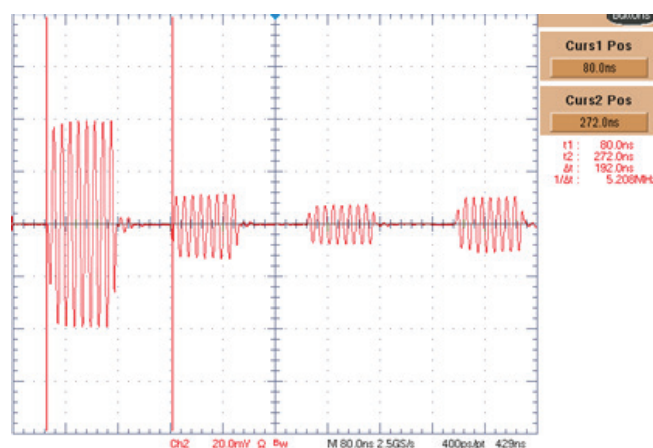


Рис. 9. Осциллограмма радиосигналов на выходе макета ФМЗ.

тери, вносимые УВВ в каждом канале. Этот эффект подтверждает необходимость введения электрически управляемых оптических аттенуаторов, использование которых позволит ввести оптические преобразования так, чтобы обеспечить равенство амплитуд радиоимпульсов на выходе соответствующего узла УЗРС.

Функциональная схема оптического тракта ПМЗ на базе одномодового МСОВ-7 приведена на рис. 10. Оптический сигнал подается на вход оптического разветвителя (ОР) типа 1:4, что обеспечивает его равное деление на 4 части. Выходной канал 1 ОР практически без задержки поступает на вход 4 электрически управляемого оптического переключателя (ОПК) с четырьмя положениями переключения, а остальные каналы задерживаются на фиксированное время τ либо 2τ либо 3τ , для чего поступают на соответствующие входы УВВ1 катушки МСОВ-7. Здесь, как и в случае ФМЗ, $\tau=0.2$ мкс, что соответствует длине МСОВ порядка 40 м. Задержанные копии поступают в УВВ2, где сопрягаются со стандартными односердцевинными одномодовыми волокнами типа SMF-28, с помощью которых, как и для канала без задержки, в схеме обеспечивается эффективное оптическое соединение с остальными тремя входами ОПК: вывода «е» УВВ1

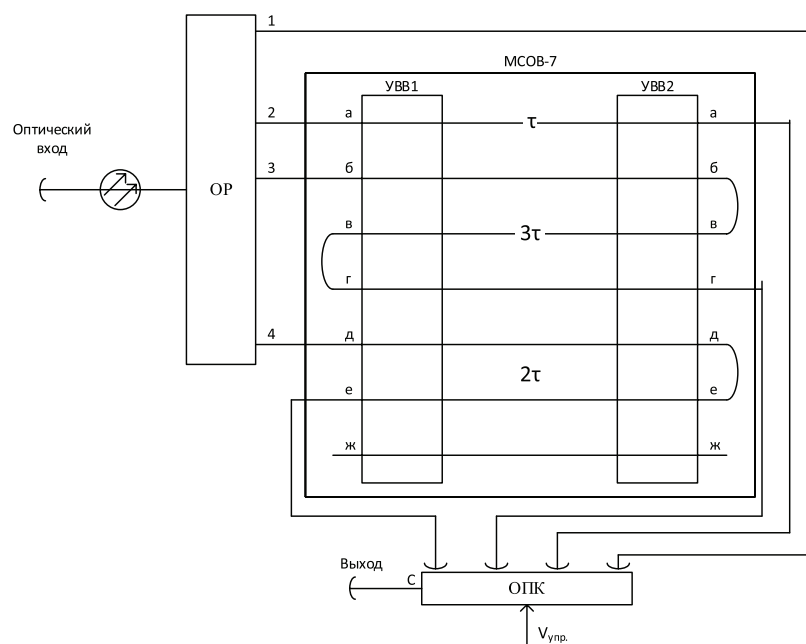


Рис. 10. Функциональная схема оптического тракта переключаемого модуля задержки (ПМЗ) на базе одномодового 7-сердцевинного волокна.

и выводов «а» и «г» УВВ2. Выбранная с помощью управляющего сигнала позиция переключения ОПК обеспечивает пропускание одного из четырех каналов на выход ПМЗ.

Результаты измерения приведены на рис. 11, где показаны осциллограммы радиосигналов на выходе макета ПМЗ в каждом из четырех положений ОПК для случая использования частоты заполнения импульсов 10 ГГц. Приведенные графики наглядно

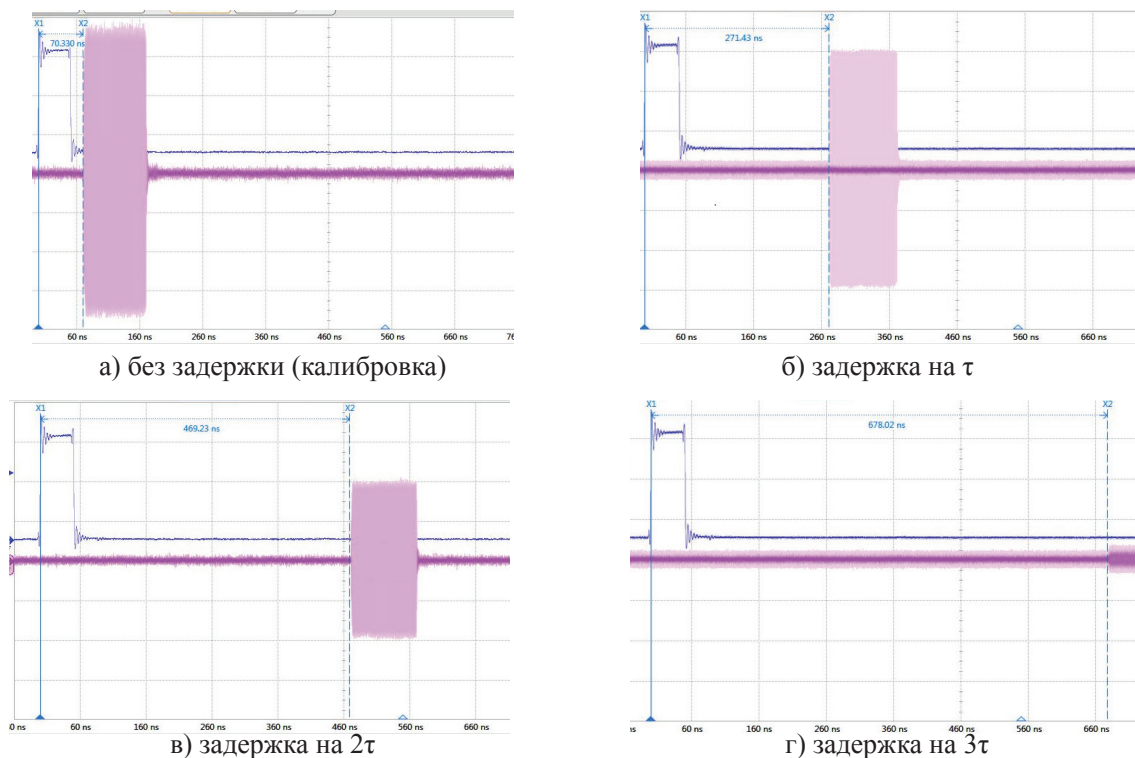


Рис. 11. Осциллограммы радиосигналов на выходе макета ПМЗ в каждом из четырех положений ОПК (частота РЧ-несущей 10 ГГц).

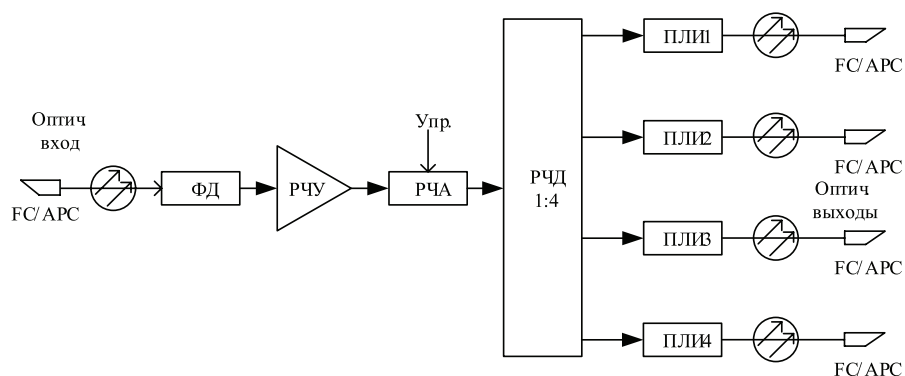
характеризуют эффект задержки импульсного радиосигнала в многосердцевинном волкне с погрешностью не более 0.5–1%, что, согласно [4], соответствует высокоточным линиям задержки. Сравнение результатов измерения задержки для случаев использования высокочастотной (80 МГц) и сверхвысокочастотной (10 ГГц) частот заполнения радиоимпульсов дано в таблице. Высокая точность совпадения данных по задержке на выходе макета ПМЗ при передаче радиосигналов от метрового до сантиметрового диапазона волн подтверждает преимущество использования фотонной технологии для построения УЗРС.

Таблица. Сравнение результатов измерения задержки для высокочастотной и сверхвысокочастотной частот заполнения радиоимпульсов

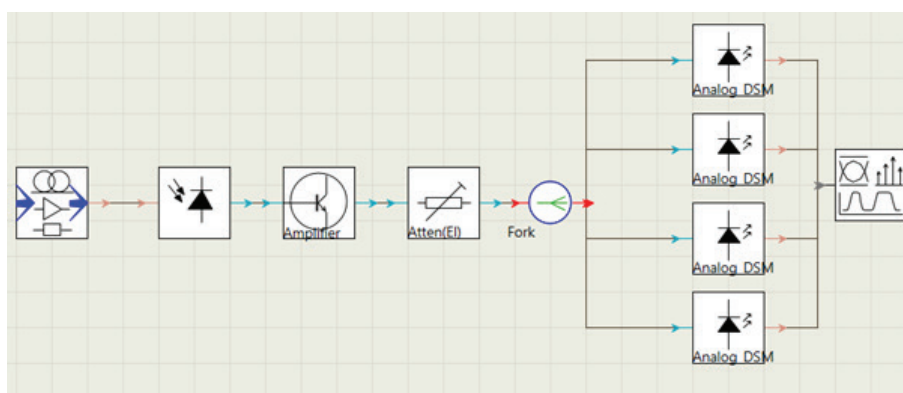
Частота РЧ-несущей, ГГц	0.08	10
Задержка на 0.2 мкс (τ)	0.201	0.201
Задержка на 0.4 мкс (2τ)	0.400	0.399
Задержка на 0.6 мкс (3τ)	0.608	0.608

4. Моделирование и макетирование узла ретрансляции

Компьютерное моделирование проводилось для двух вариантов построения узла ретрансляции (УРТ), назначением которого является суммирование всех получаемых в переключаемых ВОЛЗ узла УПО вариантов задержек. Для этой цели используются теоретически равномерная спектральная характеристика фотодетектора в рабочей полосе спектрального разделения каналов и широкополосное усиление в СВЧ-диапазоне. Оба рассматриваемых варианта содержат два каскадно-включенных модуля, соответственно, выполняющих функции приема оптических сигналов от узла УПО и формирования новых модулированных оптических сигналов для обработки в узле УФОД. В первом варианте единый входной сигнал после усиления разделяется на 4 канала с различными оптическими частотами. Во втором же случае 8 различных каналов на выходе преобразуются в один. Моделирование показало, что в обоих вариантах формируются одинаковые последовательности импульсов. Однако схема варианта 1 включает один фотодетектор с одним СВЧ-усилительным трактом и четыре модулированных СВЧ-сигналами полупроводниковых лазерных излучателя, обеспечивающих спектрально разнесенные каналы для дальнейшей обработки, а схема варианта 2 – восемь фотодетекторов с и один модулированный СВЧ-сигналом полупроводниковый лазерный излучатель. Сравнение двух выше описанных вариантов ясно показывает, что помимо очевидной простоты (экономичности) узла формирования, особенностью варианта 1 является уменьшение энергопотребления за счет меньшего числа СВЧ-усилителей и применения, как и в УФМ, маломощных легко интегрируемых лазеров типа VCSEL. Учитывая данный факт, для работы в составе экспериментального образца УЗРС выбран первый вариант УРТ, в котором единый входной сигнал после оптико-электрического преобразования и усиления разделяется на 4 канала с различными оптическими частотами. На рис. 12 представлены его структурная схема (а) и разработанная на ее основе компьютерная модель (б). Пример результатов моделирования выходного спектра всех четырех оптических каналов (а) и временной зависимости выходной мощности импульсов в первом оптическом канале (б) модели выбранного УРТ при подаче на вход выходного сигнала



а) ФД – фотодетектор; РЧУ – радиочастотный усилитель; РЧА – радиочастотный аттенуатор; РЧД – радиочастотный делитель; ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель.



б)

Рис. 12. Структурная схема (а) и модель (б) оптимального варианта построения узла ретрансляции оптического сигнала исследуемого УЗРС.

УПО (рис. 7) показан на рис. 13. В остальных оптических каналах наблюдалась аналогичная картина с временным сдвигом, соответствующем задержке в данном канале (не показано). Как следует из рис. 13а, коэффициент подавления спектральных составляющих на границах между оптическими каналами примерно равен 60 дБ, что превышает типичные требования при многоканальной передаче в аналоговых ТВОС. Кроме того, согласно рис. 13б, с помощью данного узла обеспечивается суммирование всех задержанных в УПО сигналов, позволяя реализовать возможность одновременного вывода всех градаций задержки. Причина неравномерности выходных мощностей является аналогичная неравномерность входной последовательности импульсов (рис. 7).

С целью подтверждения корректности выбранной схемы УРТ проведено макетирование и экспериментальное исследование с использованием упрощенного двухканального по выходу макета, что не снижает достоверности рассмотрения. При испытаниях на вход макета подавались четыре соответственно задержанных оптических сигнала, модулированные импульсными радиосигналами длительностью 0.1 мкс, периодом следования 1 мкс и частотами заполнения 80 МГц и 10 ГГц. Выходные сигналы лазеров либо напрямую, либо через ВОЛЗ с задержкой на 0.8 мкс подавались на входы оптического Y-разветвителя для осуществления суммирования их мощностей. Регистрация сигналов на выходе макета УРТ обеспечивалась с помощью измерительного фотодиода, выход которого в РЧ-диапазоне соединен с осциллографом.

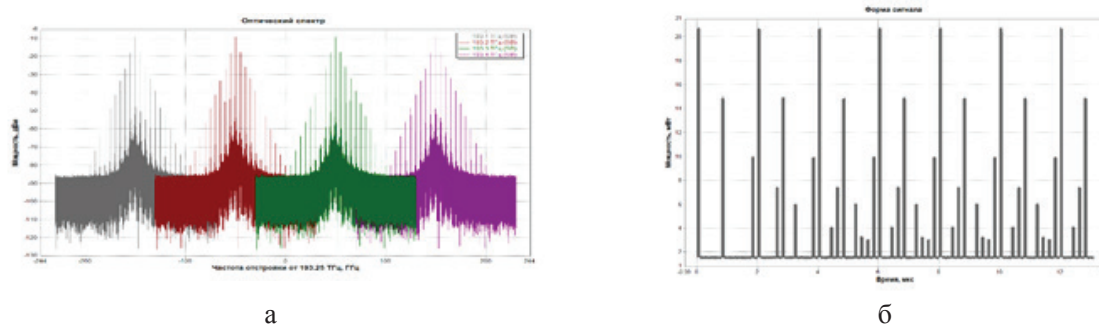


Рис. 13. Выходной спектр (а) и временная зависимость выходной мощности (б) модели выбранного узла ретрансляции (УРТ).

Результаты измерения приведены на рис. 14, где показана осциллограмма сигналов на выходе макетируемого УРТ. Из рис. 14 видно, что в результате прохождения исходного и задержанных радиосигналов через УРТ на его выходе появляется дополнительный пакет копий исходного радиосигнала, задержанный на время, определяемое ВОЛЗ.

Таким образом, в ретранслируемом сигнале с высокой точностью сохраняется заданная во входном узле величина задержки. Проведенное макетирование показывает реализуемость и эффективность применения предложенного принципа оптоэлектронной ретрансляции для многократного увеличения (определяется числом параллельных каналов в УРТ) и одновременного вывода всех градаций задержки, которое отсутствует у существующих волоконно-оптических УЗРС.

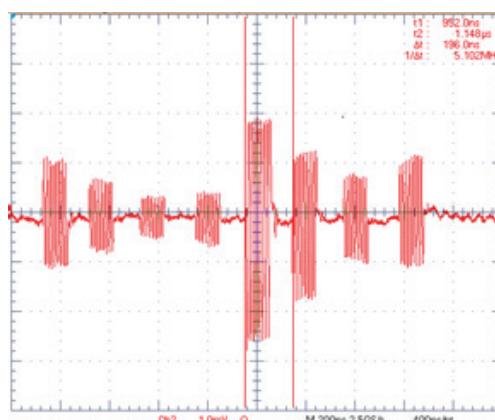


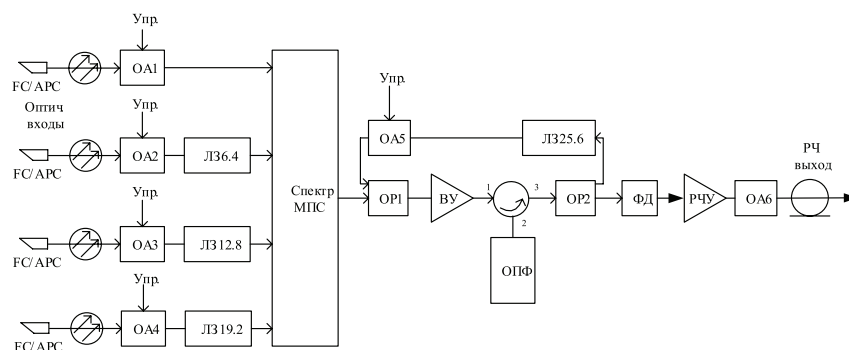
Рис. 14. Осциллограмма сигналов на выходе макета УРТ.

5. Моделирование и макетирование узла финальной обработки и детектирования

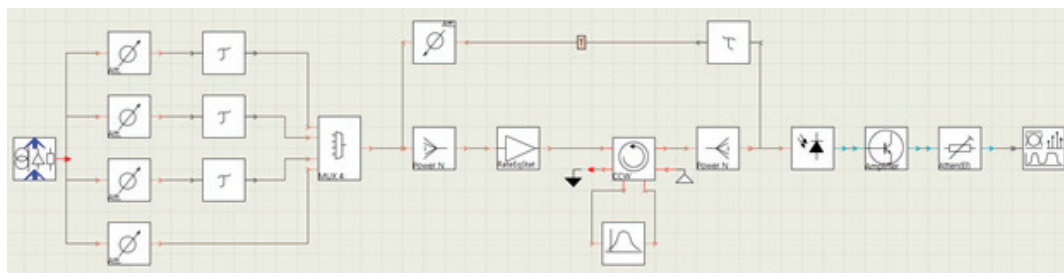
Данный узел является последним элементом структурной схемы разрабатываемого волоконно-оптического УЗРС (рис. 1). Его назначение состоит в максимально возможном расширении диапазона задержек. Согласно проведенному анализу, перспективными решениями для разработки УЗРС с большим временем задержки являются фиксированные линии задержки в последовательном либо параллельном соединении и линии задержки, включенные в рециркуляционную схему. В соответствии с этим компьютерное моделирование проводилось для двух вариантов построения УФОД. Вариант 1 содержит три каскадно-включенных модуля, выполняющих следующие функции: фиксированные задержки на время 6.4, 12.8 и 19.2 мкс; задержку на 25.6 мкс при каждом проходе рециркуляционной схемы; фотодетектирование.

тектирование и усиление радиосигналов в СВЧ-диапазоне. Схемотехнически более простой вариант 2 содержит два каскадно-включенных модуля, выполняющих следующие функции: задержку на 6.4 мкс при каждом проходе рециркуляционной схемы; фотодетектирование и усиление радиосигналов в СВЧ-диапазоне.

Сравнение двух вышеописанных вариантов построения показало, что более экономичным и надежным является примененный в варианте 1 гибридный принцип построения узла на базе сочетания схем однократной и рециркуляционной задержки, которая вследствие положительной обратной связи может стать неустойчивой при задержке модулированных оптических сигналов с большим числом градаций задержки и малым декрементом ее приращения. Экономичность варианта 1 также обеспечивается из-за отсутствия необходимости применения дорогостоящего оптического модулятора. Поэтому для работы в составе экспериментального образца УЗРС выбран первый вариант УФОД. На рис. 15 представлены его структурная схема (а) и разработанная на ее основе компьютерная модель (б). Пример результатов моделирования временной зависимости выходной мощности импульсов модели выбранного УФОД при подаче на вход оптических импульсов длительностью 100 нс показан на рис. 16а, б. Исследовалось два варианта построения рециркуляционной петли: с отсутствием (а) и наличием (б) в ее составе оптического усилителя с оптическим полосовым фильтром для устранения его внеполосных шумов (рис. 15б). В первом случае при каждом последующем проходе наблюдается ослабление выходного сигнала в связи с внутренними потерями в петле, во втором – усиление вследствие чрезмерной компенсации потерь с помощью усилите-



а) ОА – оптический аттенуатор; РЧУ – радиочастотный усилитель; ФД – фотодетектор; ОП – оптический разветвитель; ЛЗ – оптическая линия задержки; ОПФ – оптический полосовой фильтр; ВУ – волоконный усилитель; ЭА – электрический аттенуатор.



б)

Рис. 15. Структурная схема (а) и модель (б) оптимального варианта построения узла финальной обработки и детектирования оптического сигнала исследуемого УЗРС.

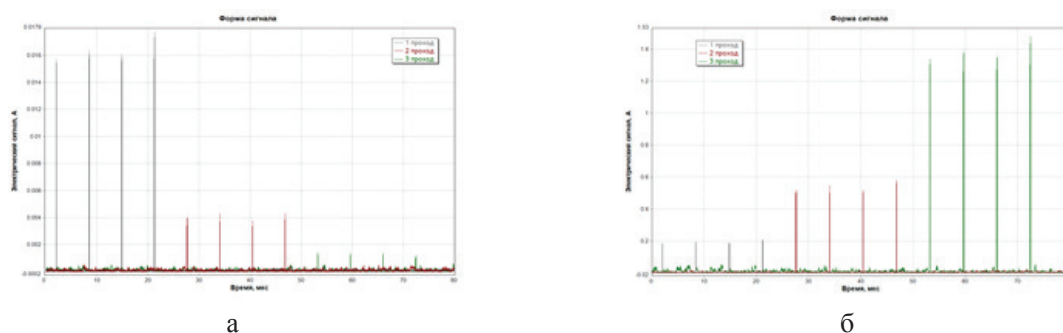


Рис. 16. Сигнал на выходе узла финальной обработки и детектирования сигнала с четырьмя входами, в случаях, когда в петле рециркуляции отсутствует (а) либо включен (б) оптический усилитель.

ля. Данный эффект должен быть учтен при разработке УФОД.

С целью подтверждения корректности выбранной схемы УФОД проведено макетирование и экспериментальное исследование с использованием макета основного элемента УФОД: рециркуляционной петли без оптического усилителя. В состав макета входят: одноканальная линия задержки на 0.6 мкс, оптический X-разветвитель (50/50), к портам 1 и 3 которого подсоединена рециркуляционная схема на базе ВОЛЗ, обеспечивающая при каждом проходе задержку на 830 нс, а к порту 4 – измерительный фотодетектор. Модуляция входного оптического сигнала осуществляется посредством импульсного радиосигнала длительностью 0.2 мкс, периодом следования около 3.4 мкс и частотой РЧ-несущей 80 МГц.

Результаты измерения сигналов на выходе макета УФОД приведены на рис. 17. Отметим, что практическая реализуемость такой схемы построения данного узла УЗРС определяется исключительно уникально малым затуханием оптического волокна в С-диапазоне. В пассивных электрических схемах задержки на базе коаксиального кабеля и других сред задержки РЧ-сигналов это невозможно. На рис. 17 показаны: синхроимпульсы (сверху), определяющие момент поступления исходного сигнала на вход макета, и последовательность радиоимпульсов (снизу), содержащая первичный радиосигнал, прошедший без задержки на выход фотодетектора (самый левый), и его три задержанные после каждого прохода по петле копии. Согласно рис. 17, качество выходного РЧ-сигнала даже после трех проходов достаточно для последующей обработки, и точность величины задержки обеспечивается на уровне 1%. Проведенная эксперимен-

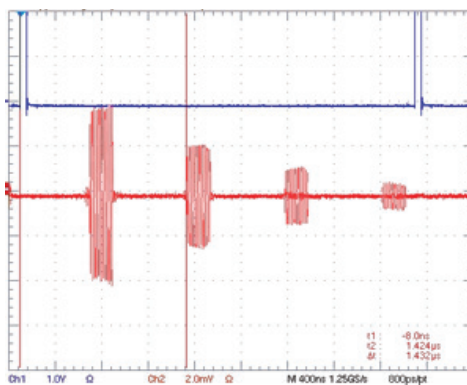


Рис. 17. Осциллограмма сигналов на выходе макета узла финальной обработки и детектирования.

тальная проверка показывает реализуемость и эффективность применения предложенного принципа оптимизации схемы построения УЗРС для многократного увеличения числа задержанных копий радиосигнала. Масштабирование результатов данного эксперимента принципиально позволяет увеличить максимальное время задержки до миллисекундного диапазона при использовании ограниченного объема элементов схемы, что улучшит габаритные характеристики разрабатываемого устройства.

Заключение

Учитывая недостатки современных волоконно-оптических устройств задержки радиосигналов, предложены новые принципы оптимизации схемы их построения:

1) Введение распределенной схемы формирования модулированного оптического сигнала, содержащей набор маломощных высокоэффективных лазеров с непосредственной модуляцией и спектральным разделением каналов на базе стандартной сетки DWDM.

2) Использование в качестве среды замедления сигналов многосердцевинного оптического волокна.

3) Введение двухступенчатой схемы обработки (задержки) с промежуточным узлом суммирования и ретрансляции.

4) Введение оптической рециркуляционной схемы задержки.

Экспериментальная проверка предложенных принципов показала их реализуемость, эффективность и возможность увеличения максимального времени задержки до миллисекундного диапазона с шагом в микросекундном диапазоне при использовании значительно меньшей общей длины волокна, что улучшает габаритные характеристики устройства, дает возможность одновременного вывода всех градаций задержки и, наряду с меньшим энергопотреблением и отсутствием проблем электромагнитной совместимости, обеспечивает высокую конкурентоспособность волоконно-оптических УЗРС по сравнению с широко распространенной цифровой радиочастотной памятью.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI60715X0138).

Литература:

1. Hansen R.C. Phased Array Antennas. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009. 547 p.
2. Справочник по радиолокации / Пер. с англ. под ред. М.И. Сколника. М.: Техносфера, 2015. 1352 с.
3. Добыкин В.Д. [и др.] Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / Под ред. А.И. Куприянова. М.: Вузовская книга, 2009. 360 с.
4. Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. М.: Высшая школа, 1975. 440 с.
5. Белкин М.Е. Сверхширокополосное устройство долговременной задержки радиосигналов: анализ оптимального решения // Инфокоммуникационные и ра-

диоэлектронные технологии. 2016. Т. I. № 1. С. 103–120.

6. Newberg I.L. [et al.] Long microwave delay fiber-optic link for radar testing // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1990. V. 38. № 5. P. 864–866.

7. Урик В.Д., МакКинни Д.Д., Вилльямс К.Д. Основы микроволновой фотоники / Пер. с англ. под ред. С.Ф. Боева, А.С. Сигова. М.: Техносфера, 2016. 376 с.

8. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 1 (10). С. 4–20.

9. Belkin M.E. Design principles of long-term analog RF memory based on fiber-optics and microwave photonics approaches // IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference and International Topical Meeting on Microwave Photonics (Co-Location). California USA, October 31 – November 3, 2016. P. 21–22.

10. Белкин М.Е., Ключник Д.А., Топорков Н.В. Разработка сверхширокополосного устройства долговременной задержки радиосигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2016. Т. I. № 2. С. 218–237.

11. [Http://www.vpiphotonics.com](http://www.vpiphotonics.com)

12. Egorova O.N., Astapovich M.S., Belkin M.E., Semenov S.L. Fiber-optic delay line using multicore fiber // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. V. 44 (1). P. 5–7.