

Problems of development of ontology for subject-based intelligent scientific Internet resource

Yu. A. Zagorulko^{1,2}, G. B. Zagorulko¹, and O. I. Borovikova¹

¹A. P. Ershov Institute of Informatics Systems, RAS
6, Lavrientiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²Novosibirsk State University
2, Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
zagor@iis.nsk.su

Received on October 25, 2016

Abstract: *The present paper concerns the problems and main features of the development of ontology for subject-based intelligent scientific Internet resources. In these resources the ontology is used not only for formalization and systematization of the heterogeneous knowledge, data and information processing facilities, but also for organization of a convenient access to them. Development of ontology providing the above-mentioned functions is a very difficult and laborious process. To facilitate it the methodology including a set of techniques and ontology design patterns, as well as ontology building method using a representative set of base ontologies, is suggested.*

Keywords: *intelligent scientific internet resources, ontology, Semantic Web technology, ontology design pattern.*

For citation (IEEE): Yu. A. Zagorulko, G. B. Zagorulko, and O. I. Borovikova “Problems of development of ontology for subject-based intelligent scientific Internet resource,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 207–217, 2016. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.2.16

1. Введение

В своей повседневной деятельности ученый должен иметь удобный содержательный доступ ко всем имеющимся на данный момент знаниям и данным, относящимся к области его исследований, а также к разработанным в ней средствам обработки и анализа информации. При этом желательно, чтобы вся эта информация представлялась в виде сети знаний и данных как наиболее естественной и удобной форме подачи информации для человека.

В такой сети первый слой (слой знаний) составляют понятия моделируемой области знаний, выстроенные в иерархию «общее — частное», а второй (слой данных) — связанные между собой различными отношения-

ми информационные объекты, т. е. экземпляры понятий, представляющие реальные или виртуальные объекты моделируемой области знаний. Например, научные организации, персоны, разработанные в рамках данной области знаний модели, методы анализа данных, включая их реализации в виде web-сервисов, и т. п. Если по такой сети организовать навигацию, то пользователь получит удобный доступ к знаниям и данным.

Для решения этой проблемы была предложена концепция и архитектура тематического интеллектуального научного интернет-ресурса (ИНИР) [1], обеспечивающего содержательный доступ к систематизированным научным знаниям и информационным ресурсам заданной области знаний, а также к средствам их интеллектуальной обработки и анализа.

Основу такого ИНИР составляет онтология [2], которая служит не только для формализации и систематизации различных видов знаний, данных и средств обработки и анализа информации, интегрируемых в ИНИР, но и для организации удобного содержательного доступа к ним.

Построение такой онтологии является довольно сложным и трудоемким процессом. Чтобы облегчить его, предложена методология, включающая набор методик и паттернов разработки онтологий, а также метод построения онтологии ИНИР на основе представительного множества базовых онтологий. В статье подробно описываются основные характеристики данной методологии.

2. Структура и методы построения онтологии ИНИР

Как было сказано выше, онтология составляет ядро системы знаний ИНИР и наряду с описанием различных аспектов моделируемой области знаний содержит соотнесенное с ним описание структуры и типологии интегрируемых информационных ресурсов и методов обработки и анализа данных. В связи с этим онтология ИНИР состоит из системы взаимосвязанных онтологий, отвечающих за представление указанных выше трех компонентов знаний, а именно: онтологии области знаний ИНИР, онтологии задач и методов, онтологии научных интернет-ресурсов.

Онтология области знаний задает систему понятий и отношений, предназначенных для детального описания области знаний ИНИР и выполняемой в ее рамках научной и исследовательской деятельности.

Онтология задач и методов описывает задачи, для решения которых предназначен ИНИР, и методы их решения.

Онтология научных интернет-ресурсов служит для описания представленных в сети Интернет информационных ресурсов, релевантных области знаний ИНИР.

Построение таких сложных онтологий «с нуля» — непростая задача, поэтому был предложен метод построения онтологий ИНИР на основе небольшого, но представительного набора базовых онтологий, включающих только самые общие сущности, не зависящие от конкретных областей знаний ИНИР. В этот набор входят: (1) онтология научного знания, (2) онтология научной деятельности, (3) базовая онтология задач и методов, (4) базовая онтология научных информационных ресурсов.

Онтология научного знания (см. рис. 1) содержит классы, задающие структуры для описания понятий конкретных областей знаний, такие как *Раздел науки*, *Метод исследования*, *Объект исследования*, *Предмет исследования*, *Научный результат* и др. Эта онтология также включает отношения, связывающие между собой объекты указанных выше классов. Используя эти классы, можно выделить и описать значимые для моделируемой области знаний разделы и подразделы, задать типизацию методов и объектов исследования, описать результаты научной деятельности.

Онтология научной деятельности (см. рис. 1) базируется на онтологии, предложенной в [3] для описания научно-исследовательских проектов и расширенной для применения к более широкому классу задач. Эта онтология включает классы понятий, относящиеся к организации научной и исследовательской деятельности, такие как *Персона*, *Организация*, *Событие*, *Научная деятельность*, *Проект*, *Публикация* и др. Онтология научной деятельности включает также отношения, позволяющие связывать понятия данной онтологии не только между собой, но и с понятиями онтологии научного знания.

Базовая онтология научных информационных ресурсов включает класс *Информационный ресурс* в качестве основного класса. Набор атрибутов и связей этого класса основан на стандарте Dublin core [4]. Его атрибутами являются: название ресурса, язык ресурса, тематика ресурса, тип ресурса, дата создания ресурса и др. Для представления информации об источниках ресурса и его создателях, а также связанных с ним событиях, организациях, персонах, публикациях и других сущностях вводятся специальные отношения, связывающие класс *Информационный ресурс* с классами других онтологий ИНИР.

Базовая онтология задач и методов включает такие классы, как *Задача*, *Метод решения* и *Web-сервис*. С помощью понятий и отношений данной онтологии могут быть описаны задачи, для решения которых предназначен ИНИР, методы их решения и реализующие их web-сервисы.

На основе первых двух онтологий строится онтология области знаний ИНИР, на основе третьей — онтология задач и методов, на основе четвертой — онтология научных интернет-ресурсов (см. табл. 1).

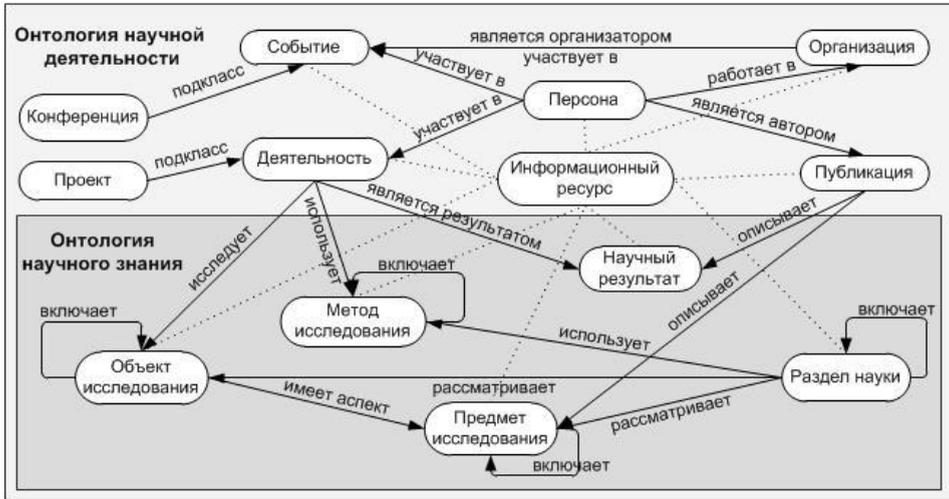


Рис. 1. Онтология научной деятельности и онтология научного знания.

Fig. 1. The ontology of research activity and the ontology of scientific knowledge

Таблица 1. Онтологии ИНИР и базовые онтологии.

Table 1. The ISIR ontologies and base ontologies

Онтологии ИНИР	Используемые базовые онтологии
Онтология области знаний	Онтология научной деятельности Онтология научного знания
Онтология задач и методов	Базовая онтология задач и методов
Онтология научных интернет-ресурсов	Базовая онтология научных интернет-ресурсов

Использование такой методологии значительно упрощает создание онтологии ИНИР и ее дальнейшее сопровождение.

Заметим, что система знаний ИНИР включает также тезаурус, который содержит описание терминов области знаний ИНИР, т. е. слова и словосочетания, с помощью которых понятия онтологии представляются в текстах и пользовательских запросах. Тезаурус также строится на основе специальной базовой онтологии — онтологии представления тезауруса.

3. Представление сложных сущностей

При реализации основных компонентов ИНИР, в том числе онтологии, были использованы средства технологии Semantic Web [5], хорошо

зарекommenовавшие себя при разработке не только интеллектуальных интернет-приложений, но и прикладных интеллектуальных систем.

Технология Semantic Web была выбрана прежде всего потому, что она предоставляет достаточно удобные и выразительные средства представления знаний и данных, в частности языки RDF, RDF(S) и OWL [2], которые стали уже стандартными средствами описания онтологий, что обеспечивает возможность понимания и переиспользования онтологий другими разработчиками.

Кроме того, применение языка OWL [2, 6] позволяет использовать существующие в свободном доступе машины вывода, с помощью которых можно не только выводить новые знания, но и контролировать корректность и целостность всей системы знаний ИНИР.

Несмотря на указанные выше неоспоримые преимущества средств технологии Semantic Web, при их использовании возникали проблемы, связанные с тем, что предложенная концепция представления знаний и данных в ИНИР и их визуализации пользователю не всегда удобно укладывалась в возможности этих средств.

Основная трудность спецификации онтологии средствами языка OWL состоит в том, что OWL обеспечивает представление только простых сущностей, в то время как в онтологии необходимо представлять сложные понятия и отношения. Для этих целей был разработан набор оригинальных методик и паттернов разработки онтологий, использование которых не только упрощает разработку онтологии, но и повышает уровень контроля вводимых в нее данных, а также обеспечивает удобное представление информации конечному пользователю.

Заметим, что описанный в настоящей статье набор методик и паттернов был использован при построении базовых онтологий ИНИР.

3.1. Описание областей допустимых значений

При описании классов онтологии необходимо задавать область допустимых значений его атрибутов. Если такая область имеет конечное число значений, то ее называют доменом. Домен характеризуется названием и множеством элементарных значений. Введение доменов не только позволяет контролировать ввод информации, но и повышает удобство этой операции — инженер знаний или эксперт вместо того, чтобы каждый раз вспоминать (или придумывать) значение того или иного атрибута объекта, просто выбирает его из списка значений, заданного в домене.

Примерами таких доменов являются «Должность», «Тип организации», «Тип публикации», «Язык публикации», которые включают соот-

ответственно виды должностей в организации, типы организаций, типы и языки публикаций.

Так как в OWL для задания указанного вида доменов нет специальных средств, было предложено представлять каждый домен отдельным классом, заданным перечислением своих элементов (индивидов). Все такие классы являются наследниками служебного класса «Домен» (см. рис. 2), который, в свою очередь, является наследником класса «Служебный класс».

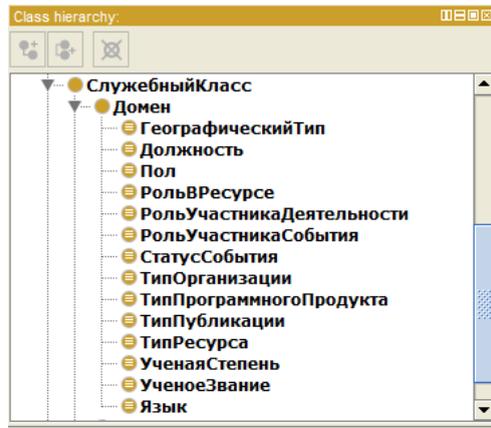


Рис. 2. Служебный класс *Домен*.

Fig. 2. *Domain* service class

Достоинством такого способа задания области допустимых значений является и то, что он позволяет поддерживать многоязычность онтологии. Действительно, с каждым значением домена могут быть связаны метки (*label*), представляющие его на разных языках.

3.2. Представление сложноструктурированных сущностей

При построении онтологии часто требуется представлять сущности, имеющие сложную структуру. Так, при описании научной деятельности часто возникает потребность в атрибутированных отношениях, т. е. в бинарных отношениях, снабженных атрибутами, уточняющими связь между аргументами отношения.

Примером атрибутированного отношения является отношение «участвует Персона в Деятельности» из онтологии научной деятельности:

участвует Персона в Деятельности
arg1: Персона: Нариньяни А. С.
arg2: Деятельность: проект InDoc

роль: научный руководитель,
дата начала: 2000,
дата окончания: 2003.

Аргументами такого отношения являются «персона» и «деятельность», а атрибутами — «роль», «дата начала» и «дата окончания», служащие для задания дополнительной информации об отношении.

Так как язык OWL не позволяет задавать атрибуты для отношений, нами был предложен специальный паттерн.



Рис. 3. Паттерн атрибутированного отношения.

Fig. 3. Attributed relation pattern

Для представления атрибутированных отношений данный паттерн предусматривает введение служебного класса «ОтношениеСАтрибутами», а для представления каждого конкретного отношения такого типа вводится класс, являющийся наследником этого класса.

Заметим, что этот паттерн отличается от паттерна “qualified relation” [7], предложенного в сообществе Linked Data, тем, что в нем явно указывается порядок аргументов отношения. Благодаря этому сохраняется информация об ориентированности отношения, что важно для представления пользователю полной информации о характере связи между объектами.

Аналогичным образом строятся паттерны многоместных отношений, паттерны для представления проектов, событий и др.

4. Описание методов визуализации информации для пользователя средствами онтологии

Для пользователей очень важно удобное представление содержащейся в контенте ИНИР информации. В связи с этим нами был предложен способ отображения этой информации на экране монитора с помощью шаблонов визуализации, строящихся с использованием свойств, объявленных в онтологии ИНИР как *AnnotationProperty*. Всего было введено три таких свойства: *order*, *link* и *shortlink*.

Шаблоны визуализации задаются для каждого класса онтологии. Различают шаблоны визуализации объектов класса и шаблоны визуализации ссылок на объекты.

Шаблон визуализации объектов класса включает все его атрибуты и связанные с ним отношения. По умолчанию атрибуты класса и связанные с ним отношения, в том числе и их атрибуты, отображаются в том порядке, в котором они заданы в онтологии. По желанию пользователя порядок показа атрибутов может быть изменен (см. рис. 4). Для этого с помощью свойства *order* задаются порядковые номера атрибута.

Шаблон визуализации ссылки на объект какого-либо класса может включать как атрибуты данного класса, так и атрибуты связанных с ним классов и заданных между ним и другими классами отношений.

Вводится два вида ссылок на объект — полные и краткие. Полные ссылки используются при отображении списка объектов заданного класса, краткие — при отображении ссылки на объект при визуализации какого-либо другого объекта.

Для описания полных ссылок используется свойство *link*, для кратких — *shortlink*. Значением этих свойств является целое число, задающее порядок следования компонентов в ссылке.

Фамилия	Боровикова
Предыдущая фамилия	Россеева
Имя	Олеся
Отчество	Игнатьевна
работает в Организации	
Организация	
Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН ИСИ СО РАН	
Должность	младший научный сотрудник
Дата начала	1999
развивает Метод	
Метод исследования	
Онтологическое моделирование	
участвует Персона в Деятельности	
Деятельность	
Методы и технологии создания и управления интеллектуальными научными Интернет-ресурсами на основе онтологий и семантических сетей	
Роль	исполнитель
Начало участия	2014
Завершение участия	2015

Рис. 4. Визуализация объекта класса «Персона».

Fig. 4. Visualization of an object of “Person” class

5. Заключение

В статье обсуждены проблемы и особенности построения онтологии для тематических ИНИР с использованием технологии Semantic Web.

Для упрощения процесса создания онтологии предложена методология, включающая набор методик и паттернов разработки онтологий, а также метод построения онтологии ИНИР на основе множества базовых онтологий.

Предложенные паттерны поддерживают стандартизацию представления сложных сущностей и благодаря этому обеспечивают лучшее понимание онтологий разными людьми, делая возможной коллективную разработку онтологий и повышая уровень их переиспользуемости.

Наличие довольно представительного набора базовых онтологий и метода построения всех онтологий ИНИР на их основе значительно снижает сложность и трудоемкость процесса создания ИНИР.

Источники финансирования и выражение признательности

Исследования, посвященные разработке онтологий для тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 13-07-00422 и 16-07-00569).

Список литературы

1. Загоруйко Ю. А., Загоруйко Г. Б., Боровикова О. И. Технология создания тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, базирующаяся на онтологии // Программная инженерия. 2016. Т. 7, № 2. С. 51—60.
2. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010. 224 с.
3. Benjamins V. R., Fensel D. Community is Knowledge! in (KA)2 // Proc. of 11th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-based Systems workshop KAW'98 (Banff, Canada, April 1998). — Calgary : University of Calgary, 1998. С. KM.2-1—KM.2-18.
4. Hillmann D. Using Dublin Core [Electronic resource]. Режим доступа: <http://dublincore.org/documents/usageguide/> (дата обращения 25.10.2016).
5. Hitzler P., Krötzsch V., Rudolph S. Foundations of Semantic Web Technologies. Chapman & Hall/CRC, 2009. 455 с.
6. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. 2009. С. 91—110.
7. Dodds L., Davis I. Linked Data Patterns. 2012 [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patterns.dataincubator.org/book> (дата обращения 25.10.2016).

References

- [1] Y. A. Zagorulko, G. B. Zagorulko, and O. I. Borovikova, “Technology for Building Subject-Based Intelligent Scientific Internet Resources Based on Ontology,” *Softw. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 51–60, 2016. (In Russ.). doi: 10.17587/prin.7.51-60

- [2] V. A. Lapshin, *Ontologii v kompyuternih sistemah* [Ontology in computer systems]. Moscow: Nauchnyi Mir, 2010. (In Russ.).
- [3] V. R. Benjamins and D. Fensel, "Community is Knowledge! in (KA)2," in *Proc. of 11th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-based Systems workshop KAW'98 (Banff, Canada, April 1998)*, 1998, p. KM.2-1–KM.2-18.
- [4] D. Hillmann, "Using Dublin Core." [Online]. Available: <http://dublincore.org/documents/usageguide/>
- [5] P. Hitzler and M. Krötzsch..., *Foundations of semantic web technologies*. Chapman & Hall, CRC Press, 2009.
- [6] G. Antoniou and F. Harmelen, "Web ontology language: OWL," in *Handbook on ontologies*, 2009, pp. 91–110. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3_4
- [7] L. Dodds and I. Davis, "Linked Data Patterns," 2012. [Online]. Available: <http://patterns.dataincubator.org/book>.

Acknowledgement

The studies devoted to the development of ontologies for subject-based intelligent scientific Internet resources have been supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 13-07-00422 and 16-07-00569).

Разработка сверхширокополосного устройства долговременной задержки радиосигналов

¹ Белкин М. Е., ¹ Ключник Д. А., ² Топорков Н. В.

¹ *Лаборатория «Сверхвысокочастотные и оптоэлектронные устройства»,
Московский технологический университет (МИРЭА)
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454, Российская Федерация*

² *Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт (КНИРТИ)
ул. Ленина, 2, г. Жуков, Калужская обл., 249192, Российская Федерация
belkin@mirea.ru*

Статья поступила 29 ноября 2016 г.

Аннотация: *Рассмотрены принципы построения и достигнутые параметры серийно выпускаемых и разработанных сверхширокополосных устройств долговременной задержки радиочастотных сигналов (СУДЗ-РЧС) с использованием волоконно-оптических схем задержки. С учетом недостатков существующих устройств предложены принципы оптимизации схемы построения волоконно-оптической СУДЗ-РЧС следующих поколений.*

Ключевые слова: *сверхширокополосное устройство долговременной задержки радиочастотных сигналов, волоконно-оптическая схема задержки.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Белкин М. Е., Ключник Д. А., Топорков Н. В. Разработка сверхширокополосного устройства долговременной задержки радиосигналов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2016. Т. 1, № 2. С. 218—237.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Белкин, М. Е. Разработка сверхширокополосного устройства долговременной задержки радиосигналов / М. Е. Белкин, Д. А. Ключник, Н. В. Топорков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2016. — Т. 1, № 2. С. 218—237.

Design of ultra-wideband long-term RF-signal delay devices

M. E. Belkin¹, D. A. Klyushnik¹, and N. V. Toporkov²

¹Laboratory of Microwave and Optoelectronic Devices,
Moscow Technological University (MIREA)

78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russian Federation

²Kaluga Research Radio Engineering Institute (KNIRTI)

2 Lenin Str., Zhukov, Kaluga region, 249192, Russian Federation

belkin@mirea.ru

Received on November 29, 2016

Abstract: Based on the previous results for investigation of various retarding materials for super-wide bandwidth long-term delay lines [1], the principles of design and the achieved parameters of commercially produced and developed RF-signal delays with the use of fiber-optic circuits were studied. Considering the shortcomings of existing devices, the principles of optimization and design of fiber-optic delay lines for next generation devices: (1) a distributed structure of low-power emitters based on dense wave-length division multiplexing, (2) a multicore optical fiber as a retarding medium, (3) two-stage processing including an optoelectronic repeater unit, and (4) an optical recirculation time-delay circuit were proposed. Experimental verification of the proposed principles has shown their feasibility, efficiency and the opportunity to significantly improve 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 delay device.

Keywords: ultra-wideband long-term delay of radio frequency signals, fiber-optic delay circuit.

For citation (IEEE): M. E. Belkin, D. A. Klyushnik, and N. V. Toporkov, "Design of ultra-wideband long-term RF-signal delay devices," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 218–237, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.2.17

1. Введение

Проведенный в [1] анализ современного мирового развития радиоэлектронных систем (РЭС) радиочастотного (РЧ) диапазона показывает, что наиболее эффективным путем построения СУДЗ-РЧС является применение методов и подходов волоконной оптики и радиофотоники (микроволновой фотоники): нового междисциплинарного направления, созданного на стыке радиотехники и оптоэлектроники [2]. Реализация данного подхода в пер-

спективных РЭС помимо значительного улучшения технико-экономических показателей дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик РЭС двойного назначения, как электромагнитная совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе преднамеренным), экологичность. Актуальность предлагаемого подхода обосновывается:

— приоритетом направления «радиофотоника» в технологическом развитии отрасли электронной и радиоэлектронной промышленности РФ, обозначенном в Государственной программе Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013—2025 гг.» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2012 г. № 2396-р);

— задачами создания критических и базовых промышленных технологий, задачами создания электронной компонентной базы, в том числе импортозамещения, в соответствии с федеральной целевой программой (ФЦП) «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011—2020 гг.»;

— возможностью преодоления технических, технологических, ресурсных, экологических и др. ограничений в отечественной радиоэлектронной промышленности;

— отсутствием широкой возможности воспользоваться существующими решениями, методами, технологиями, развитых в зарубежных странах.

В настоящей статье, в развитие описанных в [1] исследований, проводится анализ принципов построения и современного состояния серийно выпускаемых и разрабатываемых сверхширокополосных СУДЗ-РЧС на базе волоконно-оптических линий задержки. С использованием результатов анализа предлагаются оптимизированные принципы и схемы построения волоконно-оптических устройств долговременной задержки радиосигналов, корректность которых подтверждается результатами начальных экспериментальных исследований.

2. Принципы построения активной волоконно-оптической схемы задержки

Типичная структурная схема одноканальной активной волоконно-оптической схемы задержки (ВОСЗ) РЧ-сигналов представлена на рис. 1. На рисунке входной РЧ-сигнал передается через пассивный направленный ответвитель и РЧ-переключатель. Кроме того, часть сигнала с отвода направленного ответвителя проходит через канал задержки, содержащий передающий оптоэлектронный модуль (ПОМ), оптический тракт, приемный оптоэлектронный модуль (ПРОМ), и поступает на другой вход РЧ-переключателя.

Принцип работы ВОСЗ, достаточно простой и стандартный для функциональных элементов радиофоники, состоит в использовании эффекта задержки при распространении оптической волны в одномодовом световоде (примерно 5 нс/м при распространении в кварцевом волокне). Прямое и обратное преобразования РЧ- и оптических сигналов осуществляются во входящих в состав ПОМ и ПРОМ полупроводниковых лазерах и фотодиодах с соответствующей полосой модуляции. Таким образом, СУДЗ-РЧС на базе ВОСЗ содержит три принципиальных узла: ПОМ, волоконно-оптический элемент задержки на основе стандартного одномодового световода и ПРОМ. Схема рис. 1 может быть легко развита в многоканальную структуру путем использования параллельно и последовательно включенных одноканальных схем, волокон различной длины и дополнительных оптических либо электрических переключателей.

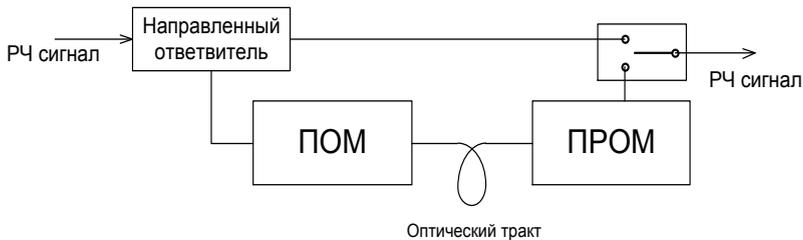


Рис. 1. Обобщенная структурная схема одноканальной активной волоконно-оптической схемы задержки РЧ-сигналов.

Fig. 1. A generalized block diagram of an active single-channel fiber-optic delay circuit of RF signals

Основные преимущества по сравнению с традиционными устройствами задержки РЧ-диапазона, например линиями задержки на основе ПАВ, вытекающими из известных преимуществ волоконно-оптических систем передачи, заключаются в следующем:

- низкие потери в собственно элементе задержки, практически не зависящие от частотного диапазона;
- широкая полоса, достигающая нескольких октав (то есть мгновенная полоса пропускания может соответствовать рабочему диапазону частот и на практике будет определяться полосой пропускания РЧ-усилителей);
- нечувствительность к электромагнитным наводкам.

Дополнительно для СУДЗ-РЧС на базе активных схем задержки ключевым показателем является низкое энергопотребление.

3. Принципы построения и параметры многоканальных СУДЗ-РЧС с регулируемым временем задержки

В общем случае увеличивать и переключать время задержки в ВОСЗ можно путем последовательного (каскадного) и/или параллельного соединения рассмотренных выше одноотводных сегментов. Однако с целью обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум устройства, а также из экономических соображений, поскольку стоимость лазерного излучателя существенно выше стоимости остальных элементов сегмента ВОСЗ, лучшим вариантом является использование многоканальных волоконно-оптических схем задержки. Пример реализации СУДЗ-РЧС на базе трехканальной активной волоконно-оптической схемы задержки сигналов РЧ-диапазона [3] представлен на рис. 2.

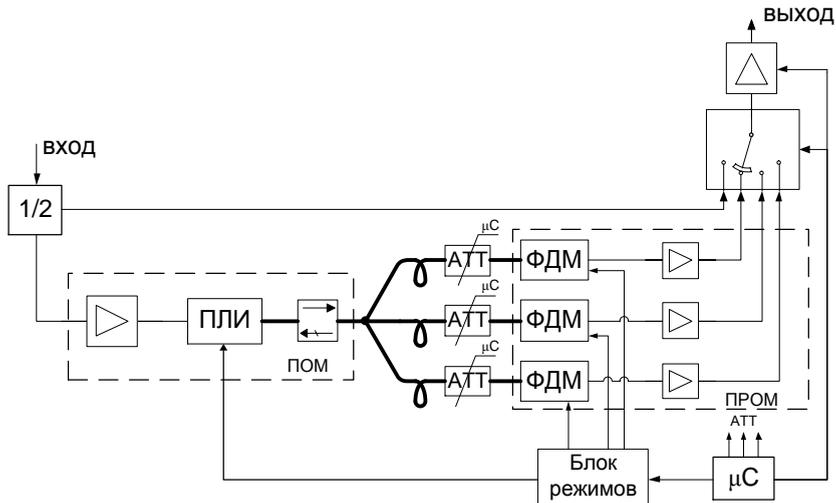


Рис. 2. Пример реализации СУДЗ-РЧС на базе трехканальной активной ВОСЗ.

Fig. 2. Example of a designed ultra-wideband long-term RF-signal delay device on the basis of a three-channel optical active fiber delay circuit

Как следует из рисунка, схема волоконно-оптического тракта ВОСЗ согласно рис. 1 содержит ПОМ, включающий один полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ), выходной оптический сигнал которого с помощью пассивного оптического разветвителя распределяется по трем волокнам различной длины, ослабляется (при необходимости) в оптических аттенуаторах (АТТ) и принимается ПРОМ с тремя фотодиодными модулями (ФДМ). Выходные СВЧ-сигналы ФДМ усиливаются и поступают на соответствующие входы полупроводникового переключателя типа 4:1, в

различных положениях которого обеспечивается разное время задержки одного и того же РЧ-сигнала. На выходе переключателя установлен РЧ-усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, служащий для согласования уровней при параллельном и/или последовательном наборе таких трехотводных сегментов для создания ВОСЗ с широким интервалом изменения времени задержки. Режимы работы данного усилителя, а также РЧ-переключателя, ПЛИ, ФДМ и АТТ контролируются при помощи встроенного микроконтроллера. Регулируемые оптические аттенюаторы в каждом отводе служат для согласования уровней на выходе каждого канала задержки.

Очевидно, что экономический эффект от применения описанных выше многоотводных ВОСЗ будет возрастать по мере увеличения числа отводов оптического разветвителя. Однако при этом к лазерному излучателю, помимо требований к диапазону модулирующих частот, будут предъявляться дополнительные требования по минимально допустимой (с точки зрения обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум на выходе ВОСЗ) оптической мощности. Для их оценки предположим, что используемые в ВОСЗ оптоэлектронные компоненты имеют типичные для аналоговых ВОСП параметры: мощность излучения ПЛИ в волокне 2 мВт, пороговая чувствительность ФДМ 0,2 мВт (энергетический потенциал линии 10 дБ). Предположим также, что средние потери в пассивном оптическом тракте каждого отвода составляют 3 дБ. Тогда путем стандартных расчетов можно определить, что для обеспечения данного энергетического потенциала излучение лазера может быть распределено максимум по трем направлениям (через пассивный разветвитель типа 1:3). В результате получаются всего лишь четыре градации регулировки времени задержки. Разумеется, для увеличения числа градаций возможно параллельно-последовательное включение аналогичных сегментов ВОСЗ, однако гораздо более привлекательным путем представляется применение одного лазерного излучателя с повышенной выходной оптической мощностью. В частности, в рассмотренном выше примере расчета при применении ПЛИ с выходной мощностью 30 мВт возможна реализация 55 ступеней регулировки времени задержки.

Отметим однако, что реализация ПЛИ с подобными параметрами для активных волоконно-оптических схем задержки РЧ-сигналов связана с серьезными техническими и технологическими проблемами, поскольку в применяемых в настоящее время гетероструктурных лазерах увеличение выходной мощности приводит к почти пропорциональному уменьшению полосы модулирующих частот. Кроме того, при разработке ПОМ с ис-

пользованием мощного ПЛИ возникает трудоемкая задача, связанная с эффективным отводом тепла. В общем, проблема создания лазерного излучателя с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции также актуальна для оптимального построения аппаратуры гораздо более широкого применения, в частности в современных локальных волоконно-оптических сетях различного назначения [4]. Исследования показали, что ее решение состоит в поиске новых лазерных структур, в частности наногетероструктур с квантоворазмерной активной областью. Другой, на наш взгляд, более эффективный подход состоит в использовании распределенного источника оптического излучения на базе набора маломощных ПЛИ с так называемым спектральным разделением каналов (СРК). Данный метод нашел самое широкое применение в современных телекоммуникационных ВОСП [5], и его эффективность для схемы СУДЗ-РЧС также будет исследоваться в настоящей статье.

В качестве примера для подтверждения корректности описанных выше принципов построения и проделанных оценок, а также демонстрации преимуществ данного класса схем задержки РЧ-сигналов рассмотрим результаты разработки многоотводной ВОСЗ [6], выполненной сотрудниками Алабамского университета (США) почти 20 лет назад, но, по нашим сведениям, до сих пор остающейся образцом схемы задержки сигналов РЧ-диапазона с наилучшими параметрами. Данная ВОСЗ содержит шесть каскадно включенных сегментов задержки с числом отводов в каждом сегменте от 3 до 5. Причем время задержки в сегментах увеличивается по мере продвижения от входа к выходу. Первый сегмент выполнен на базе РЧ-схемы задержки на коаксиальных линиях, в которых, как показано в [1], обеспечиваются наилучшие параметры при интервале задержки в наносекундном диапазоне. Остальные сегменты реализованы на базе рассмотренных выше активных волоконно-оптических схем задержки. Волоконно-оптические тракты сегментов 2—5 работают в спектральном диапазоне 1300 нм, последнего шестого сегмента с наибольшими значениями времени задержки с целью уменьшения потерь в волокне — в спектральном диапазоне 1550 нм. В связи с отсутствием в те годы мощных полупроводниковых лазеров с полосой модуляции в СВЧ-диапазоне источником оптического излучения в сегментах 2—5 является твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате с накачкой от полупроводникового лазера. При этом ввиду невозможности инжекционной модуляции СВЧ-сигнал подводится при помощи четырех внешних электрооптических модуляторов на основе ниобата лития. Источником оптического излучения последнего сегмента задержки служит полупроводниковый лазер, выходная мощность

которого усиливается с помощью эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ). Разработанная ВОСЗ имеет следующие основные параметры:

— полоса рабочих частот (и полоса пропускания) 2—18 ГГц (более 3 октав);

— интервал времени задержки 0—658,54 мкс с шагом 20 нс;

— отношение сигнал/шум не менее 56 дБ/МГц;

— время переключения задержки (программируется) не более 30 нс;

— мощность потребления не более 200 Вт.

Другим перспективным, на наш взгляд, путем расширения диапазона задержек СУДЗ-РЧС, помимо рассмотренных выше каскадирования и увеличения числа каналов, может стать не использовавшийся до сих пор в волоконно-оптических устройствах задержки подход, заключающийся в применении оптической рециркуляционной схемы задержки (ОРСЗ). Принцип работы ОРСЗ поясняется на рис. 3.

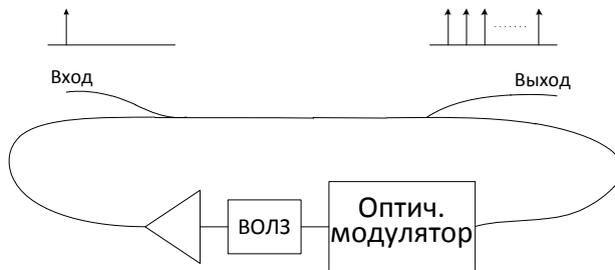


Рис. 3. Принцип работы оптической рециркуляционной схемы задержки.

Fig. 3. The operating principle of an optical recirculating delay circuit

Как следует из рисунка, одночастотный входной оптический сигнал, распространяясь по волоконно-оптической петле, проходит волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ), и его задержанная копия поступает на выход петли. Понятно, что при каждом проходе число копий будет увеличиваться на время задержки в ВОЛЗ. Согласно рис. 3, помимо принципиального элемента — ВОЛЗ, в состав рециркуляционной петли входят также два дополнительных узла: оптический модулятор и оптический усилитель. Оптический модулятор за счет сдвига частоты сигнала при каждом проходе (см. рис. 3) обеспечивает стабильную работу петли [7], оптический усилитель компенсирует потери в петле, выравнявая мощности сигнала при множестве проходов. Отметим, что относительно небольшой частотный сдвиг не будет оказывать влияния на качество «электрической» копии задержанного сигнала, поскольку характеристика оптико-электрического преобразования фотодетектора является равномерной в широкой спектральной полосе, особенно в диапазоне 1550 нм.

4. Современное состояние и принципы оптимизации волоконно-оптических сверхширокополосных устройств долговременной задержки радиочастотных сигналов

Наш поиск показал, что в настоящее время волоконно-оптические СУДЗ-РЧС производятся рядом известных зарубежных фирм и двумя отечественными предприятиями. Кроме того, исследование результатов последних разработок волоконно-оптических СУДЗ-РЧС показало, что вектор современного развития данного направления четко направлен в сторону увеличения диапазона и уменьшения шага задержек. Для реализации данной тенденции в последнее время предложена так называемая бинарная схема задержки (БСЗ), принцип действия которой заключается в параллельном подсоединении к основному волоконно-оптическому тракту набора ВОЛЗ различной длины. Каждая ВОЛЗ может вручную или посредством управления по шине данных подключаться либо отключаться от основного тракта с помощью оптического переключателя, что обеспечивает возможность создания СУДЗ-РЧС с задержкой до сотен микросекунд при шаге единицы микросекунд. Пример реализации такой БСЗ [8] с диапазоном задержек 1—511 мкс при шаге 1 мкс представлен на рис. 4. Основные параметры выпускаемой продукции и результаты последних разработок приведены в табл. 1.

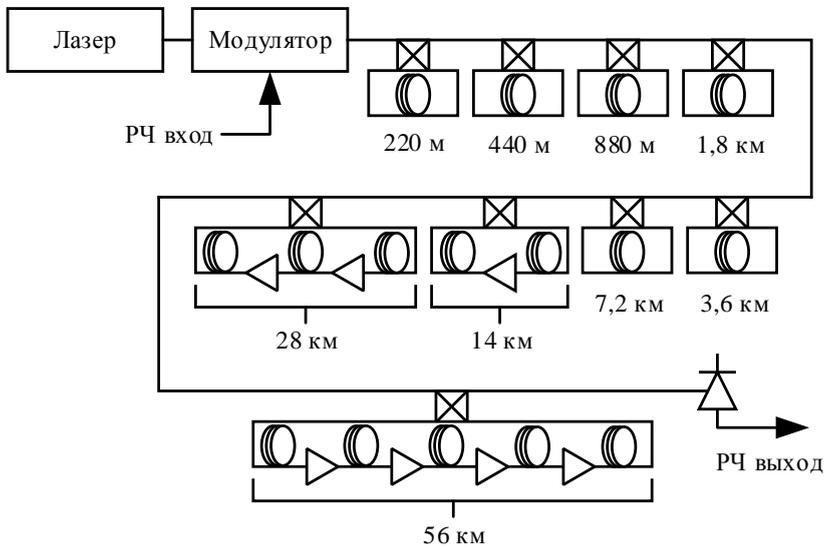


Рис. 4. Схема волоконно-оптической БСЗ с диапазоном задержек 1—511 мкс при шаге около 1 мкс [8].

Fig. 4. Binary optical fiber delay circuit delays with the range 1—511 microseconds (about 1- μ s step [8])

Таблица 1. Основные параметры современных волоконно-оптических устройств долговременной задержки РЧ-сигналов.

Table 1. Main parameters of modern fiber optics for long delay of RF signals

Производитель/ Разработчик	MPS Inc., США	EMCORE, США	Центр ВОСПИ, РФ	ЗАО «Техномаш- ВОС», РФ	Naval Research Laboratory, США	Naval Research Laboratory, США
Модель/Источник	MP-5000-DL/ MP-6000-DL	Optiva OTS- ODLS	МЛЗ-5- FC/APC	ВОЛЗА-120	[9]	[10]
Интервал времени задержки, мкс	1-12	3 - 40	1,68; 3,38; 6,79; 3,62; 27,27	120	Фиксирован- ные 67 и 125 либо 100 и 200	1-511 (шаг 1 мкс)
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,1-18	0,05-18	0-8	9-11	0-20 либо 0- 40	0,5-18
Относительная точность задержки, % (нс)	1 (1 мкс)	±2	(± 2,5)	4,2 (±5000)	-	-
Вносимые потери, дБ	27	≤10	-	0	20	-35 (с электр. усилением 55 дБ)
Стабильность времени задержки	-	-	-	$6,8 \cdot 10^{-4}$ %/°C	-	-
Стабильность фазовой характеристики	-	2° (за 10 с)	-	-	-	-
Отклонение ФЧХ от линейной	-	≤10°	-	-	-	-
Неравномерность АЧХ, дБ	±0,5	≤±3	1	-	12 (в полосе 40 ГГц)	7
Относит. уровень ложных сигналов (динамический диапазон), дБн (дБ·Гц ^{2/3})	-	≤-60	-	≤125 дБн/Гц (при отстрой- ке 3 кГц)	(103-107)	(88)
Допустимая входная мощность (-1 дБ), дБм	13	≥+16	-	-	20	-50
Уровень второй гармоники, дБн	-	≤-45	-	-	-	-
Точка пересечения 3-го порядка по входу, дБм	24	-	-	-	6-8	-
Коэффициент шума, дБ	45	≤70	-	-	43-47	10
Число переключаемых линий задержки	1 из 12	до 4	5	-	1 из 4	до 512
Управление переключением	ручное либо по RS-232	по RS-232	ручное	нет	ручное либо по RS-232	по RS-232
Рабочая температура, °C	-20...+70	-10...+50	+10...+35	0-40	0...+40	0...+40
Масштабные характеристики	171,5x152x 60,5 мм	19", 6 U	368x200 x150 мм	21 кг, 300x 300x380 мм	19", 6 U	648x432x 223 мм
Потребляемая мощность, Вт	-	200	24	50	-	-

Из таблицы можно сделать следующие выводы. Максимальное время задержки составляет 120 мкс в относительно узкой полосе радиочастот для серийно выпускаемых СУДЗ-РЧС и 511 мкс для разработанных СУДЗ-РЧС, что подтверждает выполненные выше аналитические оценки [1]. При этом нижняя и верхняя частоты рабочего диапазона составляют 0,1 и 18 ГГц соответственно для серийно выпускаемых СУДЗ-РЧС и до 40 ГГц для разработанных СУДЗ-РЧС.

5. Принципы оптимизации

Проведенные аналитические исследования показали, что на базе аналоговой волоконно-оптической системы передачи радиосигналов возможно создание нового класса широко применяемых в современной аппаратуре радиолокации, связи и измерительной техники функциональных РЧ-элементов — сверхширокополосных устройств долговременной задержки радиочастотных сигналов — с параметрами, которые невозможно получить с помощью других известных вариантов реализации схем задержки РЧ-сигналов, а именно: результаты анализа достижимых характеристик лучших образцов продукции отечественных и зарубежных производителей и современных зарубежных разработок устройств аналогичного назначения показали, что при использовании активной волоконно-оптической схемы задержки, работающей в полосе от метрового до миллиметрового диапазонов волн, обеспечивается интервал времени задержки от наносекундного до долей миллисекундного диапазона с относительной точностью установки значения задержки до 10^{-4} и относительной температурной стабильностью до 10^{-5} град $^{-1}$, что полностью удовлетворяет общим требованиям к схемам задержки РЧ-диапазона [1]. Анализ также показал недостатки современных волоконно-оптических устройств долговременной задержки, основными среди которых являются:

- мощность энергопотребления и массогабаритные характеристики существующих волоконно-оптических устройств долговременной задержки (см. табл. 1) не позволяют их использование в мобильных и переносных аппаратурных исполнениях. Первое связано с использованием сосредоточенной схемы формирования оптических сигналов на базе мощного лазера и большими потерями во внешнем модуляторе и в многоотводных или многокаскадных пассивных оптических разветвителях, для компенсации которых требуется применение оптических усилителей. Второе — с использованием в качестве задерживающей среды стандартного одномодового волокна при относительно малом погонном замедлении РЧ-сигнала;

- отсутствие или чрезмерно большой шаг перестройки времени задержки, а также отсутствие возможности одновременного вывода всех градаций задержки снижают качество и гибкость работы устройства и делают его в целом ряде применений неконкурентоспособным по сравнению с цифровой радиочастотной памятью [1].

Учитывая вышеприведенные недостатки, предлагаются следующие принципы оптимизации схемы построения волоконно-оптических СУДЗ-РЧС.

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, что приведет к уменьшению энергопотребления за счет отсутствия внешних модуляторов и замене оптических разветвителей (см. рис. 2) на оптические переключатели и спектральные мультиплексоры/демультиплексоры с существенно меньшими вносимыми потерями, а также к улучшению массогабаритных характеристик за счет возможности интеграции узла.

2) Использование в качестве среды замедления сигналов многосердцевинного оптического волокна [11], что при больших временах задержки (см. рис. 4) обеспечит почти пропорциональное числу сердцевин улучшение массогабаритных характеристик устройства.

3) Введение двухступенчатой схемы обработки (задержки) с промежуточным узлом суммирования и ретрансляции обеспечит уменьшение шага задержки и возможность одновременного вывода всех градаций задержки, повышая качество и гибкость работы устройства.

4) Введение в оконечной ступени описанной выше оптической рециркуляционной схемы задержки (рис. 3) позволяет увеличить максимальное время задержки до миллисекундного диапазона, что, наряду с меньшим энергопотреблением, обеспечивает высокую конкурентоспособность по сравнению с цифровой радиочастотной памятью.

6. Проверка реализуемости предложенных принципов оптимизации

Из четырех предложенных принципов оптимизации первый достаточно очевиден и широко используется в современной и перспективной аппаратуре волоконно-оптической связи [5]. Эффективность второго принципа также подтверждена рядом применений, в том числе для простых ВОСЗ [11]. В частности, простой расчет показывает, что использование серийно выпускаемого в настоящее время 7-сердцевинного МСВ (см. www.fibercore.com) приведет к уменьшению общей длины волокна (и габаритов устройства) в схеме СУДЗ-РЧС (рис. 4) с 112 км до 16 км. Вследствие этого дальнейшее изложение будет сосредоточено на исследовании оставшихся двух принципов.

6.1. Суммирование и ретрансляция задержанных радиосигналов

Схема измерительной установки для проверки данного принципа построения СУДЗ-РЧС представлена на рис. 5.

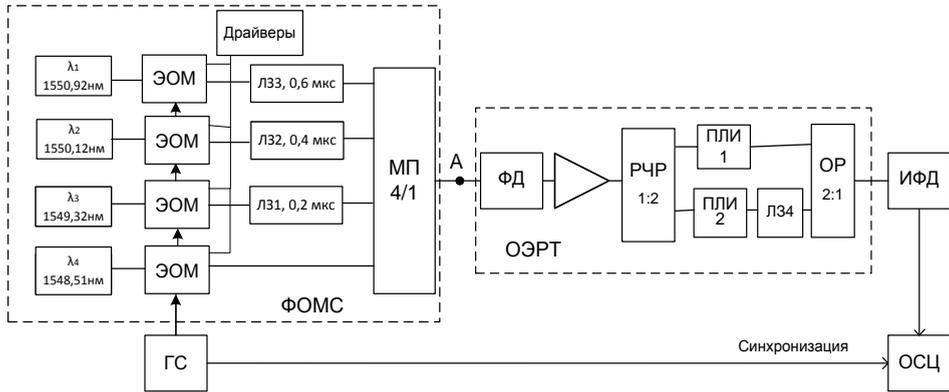


Рис. 5. Схема измерительной установки для проверки принципа суммирования и ретрансляции импульсных РЧ-сигналов.

Fig. 5. The scheme of measurement to verify the principle of summation and impulse relay of RF signals

Как видно из рисунка, исследуемая схема содержит узел формирования оптических модулированных сигналов (ФОМС) и узел оптоэлектронной ретрансляции (ОЭРТ). Основными элементами узла ФОМС являются четыре высококогерентных полупроводниковых лазера, работающих в *C*-диапазоне на длинах волн λ_1 — λ_4 согласно стандартной спектральной сетке DWDM с шагом 100 ГГц (каналы Ch.33—Ch.36). Их излучение модулируется по интенсивности с помощью электрооптических модуляторов (ЭОМ), и каждый оптический модулированный сигнал соответственно поступает на вход спектрального мультиплексора (МП) напрямую либо с задержкой на 0,2, 0,4 или 0,6 мкс, реализуемой в одномодовом 7-сердцевинном волокне длиной около 40 м. Модуляция осуществляется с помощью генератора сигналов (ГС) модели Keysight E8752D и представляет собой импульсный радиосигнал длительностью 0,1 мкс, периодом следования 2 мкс и частотой заполнения 80 МГц. Четырехканальный оптический сигнал с выхода узла ФОМС поступает на вход узла ОЭРТ, в котором с помощью фотодетектора (ФД) осуществляется оптико-электрическое преобразование и суммирование задержанных РЧ-сигналов. Далее преобразованные сигналы усиливаются и делятся пополам в радиочастотном разветвителе (РЧР), после чего каждый из них модулирует по интенсивности соответствующий полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ). Выходные сигналы ПЛИ подаются напрямую либо через ВОЛЗ Л34 (задержка 0,8 мкс) на входы оптического Y-разветвителя (ОР) для осуществления суммирования их мощностей. Регистрация сигналов на

выходе узлов ФОМС или ОЭРТ обеспечивается с помощью измерительного фотодиода (ИФД), выход которого в РЧ-диапазоне соединен с осциллографом (ОСЦ) модели Tektronix TDS5034B.

Результаты измерения приведены на рис. 6, где на рис. 6,а показана осциллограмма сигналов на выходе узла ФОМС, а на рис. 6,б — на выходе узла ОЭРТ. Как видно из рисунка 6,а, благодаря примененному принципу спектрального разделения каналов на выходе узла ФОМС (ИФД и ОСЦ подсоединялись к точке А, рис. 5) помимо исходного радиосигнала (левый) появились три его копии, задержанные соответственно на 192, 398 и 624 нс. При этом погрешность времени задержки составляет соответственно 4, 0,5 и 4 %. Следовательно, согласно описанным в [1] критериям, исследуемое СУДЗ-РЧС можно классифицировать как схему с малой (каналы 1 и 3) либо высокой (канал 2) относительной точностью задержки. Как показали наши исследования, основная причина разброса точностей состоит в различии задержек оптических каналов примененного в макете узла ФОМС спектрального мультиплексора (МП на рис. 5). Однако данное ограничение не является принципиальным, и на практике точность задержки может быть легко повышена путем подбора длины стандартных волокон в устройствах ввода-вывода примененного 7-сердцевинного волокна.

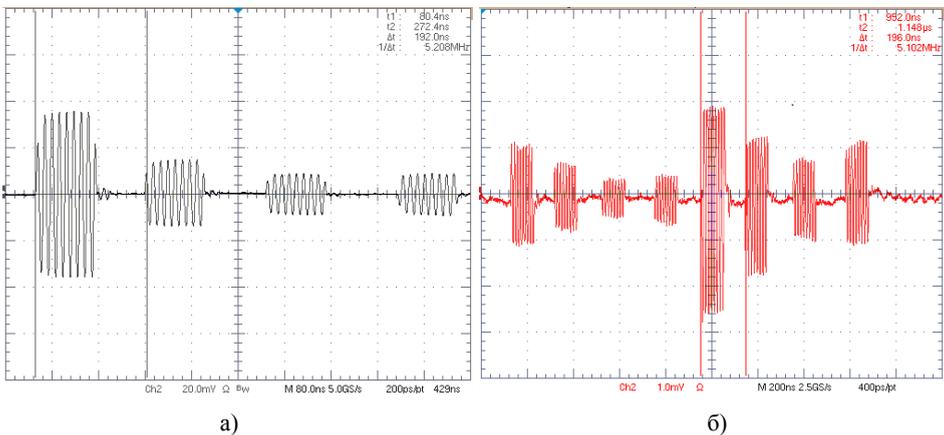


Рис. 6. Осциллограммы импульсных радиосигналов до (а) и после (б) ретрансляции.

Fig. 6. Waveforms of pulsed radio signals before (a) and after (b) relaying

В результате прохождения сформированных узлом ФОМС исходного и задержанных радиосигналов через узел ОЭРТ на его выходе помимо входного появляется дополнительный пакет копий исходного радиосигнала (рис. 6,б), задержанный на время, определяемое ВОЛЗ ЛЗ4 (рис. 5). Как

видно из рисунка, в ретранслируемом сигнале с высокой точностью сохраняется заданная в узле ФОМС величина задержки.

Проведенная экспериментальная проверка показывает реализуемость и эффективность применения предложенного принципа оптоэлектронной ретрансляции для многократного увеличения (определяется числом параллельных каналов в узле ОЭРТ) и одновременного вывода всех градаций задержки, что, как отмечено выше, отсутствует у существующих волоконно-оптических СУДЗ-РЧС (табл. 1). Развитие данного подхода является темой наших дальнейших исследований.

6.2. Рециркуляционная схема задержки радиосигналов

Схема измерительной установки для проверки данного принципа построения СУДЗ-РЧС представлена на рис. 7. Как видно из рисунка, исследуемая схема содержит один канал узла ФОМС (рис. 5), работающий на длине волны λ_4 , оптический X-разветвитель (50/50), к портам 1 и 3 которого подсоединена ВОЛЗ ЛЗ5, обеспечивающая задержку на 830 нс, а к порту 4 — измерительный фотодиод и осциллограф. Модуляция оптического сигнала осуществляется с помощью того же ГС и представляет собой импульсный радиосигнал длительностью 0,2 мкс, периодом следования около 3,4 мкс и частотой заполнения 80 МГц.

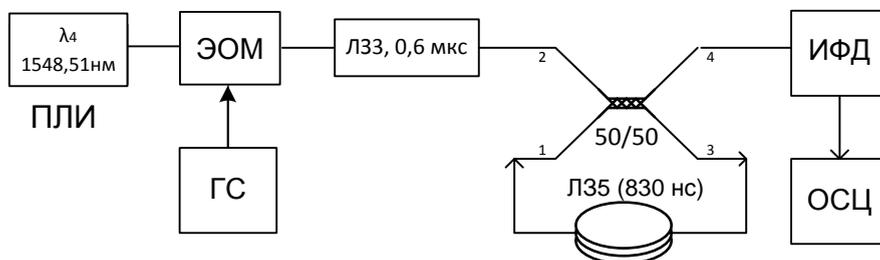


Рис. 7. Схема измерительной установки для проверки принципа рециркуляции импульсных РЧ-сигналов.

Fig. 7. Scheme of measurement to verify the recycling principle of pulsed RF signals

Результаты измерения сигналов на выходе данной предельно простой рециркуляционной схемы приведены на рис. 8. Отметим, что практическая реализуемость такой схемы построения СУДЗ-РЧС исключительно определяется уникально малым затуханием оптического волокна в С-диапазоне, что, согласно приведенным в [1] расчетам, не представляется возможным в пассивных электрических схемах задержки на базе коаксиального кабеля и других сред задержки РЧ-сигналов. В частности, на рис.

8, а показаны: синхроимпульсы (сверху), определяющие момент поступления исходного РЧ-сигнала от ГС на вход ЭОМ, и последовательность радиоимпульсов (снизу), содержащая первичный радиосигнал, прошедший без задержки через порты 2—4 X -разветвителя схемы (рис. 7) (самый левый), и его три задержанные копии, последовательно прошедшие через рециркуляционную схему. Согласно рисунку, качество выходного РЧ-сигнала даже после трех проходов достаточно для последующей обработки и точность величины задержки обеспечивается на уровне 1 %. Тем не менее, следует отметить, что очевидный недостаток такой простой схемы построения СУДЗ-РЧС состоит в необходимости выполнения условия кратности периода исходного радиосигнала и времени задержки в рециркуляционной петле (в данной схеме она равна 4), что снижает гибкость применения данного устройства. Несоблюдение данного условия приводит к возникновению паразитных сигналов, что проиллюстрировано на рис. 8, б. Проблема может быть решена либо путем усложнения схемы рециркуляционной задержки с введением выключения после определенного числа проходов или сдвига частоты оптического сигнала (см. рис. 3) либо путем усложнения схемы последующей электронной обработки.

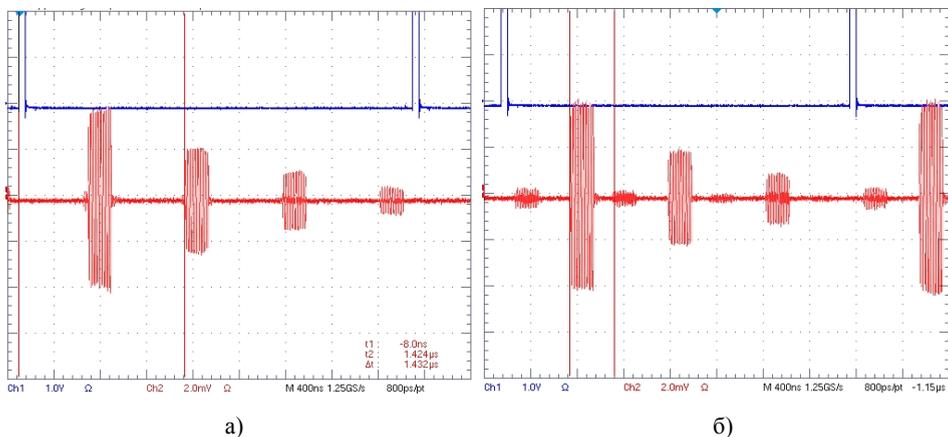


Рис. 8. Осциллограммы радиосигналов на выходе рециркуляционной схемы:
 а — время задержки в петле кратно периоду следования радиоимпульсов;
 б — время задержки в петле не связано с периодом следования радиоимпульсов.

Fig. 8. Waveforms of radio signals at the output of the recycling circuit:
 а — the time delay in the loop is a multiple of the repetition period of radio pulses;
 б — delay time in the loop is not connected with the repetition period of radio pulses

Проведенная экспериментальная проверка показывает реализуемость и эффективность применения предложенного принципа оптимиза-

ции схемы построения СУДЗ-РЧС 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 устройства, однако для достижения этого необходимо введение в петлю оптического усилителя (см. рис. 3), что является предметом дальнейших исследований.

7. Волоконно-оптическое устройство долговременной задержки СВЧ-сигналов

Структурная схема разработанного на основе рассмотренных выше принципов оптимизации СУДЗ-РЧС представлена на рис. 9, где УФМ — узел формирования и модуляции оптического сигнала, УПО — узел предварительной обработки, УРТ — узел ретрансляции, УФОД — узел финальной обработки и детектирования. Результаты предварительных экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

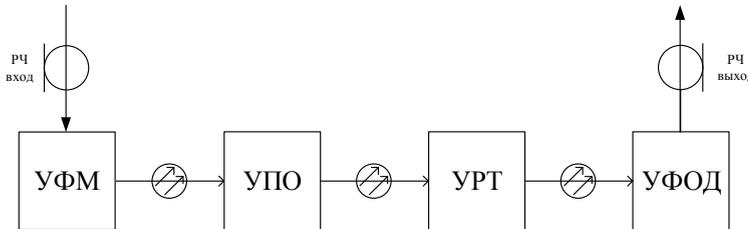


Рис. 9. Структурная схема волоконно-оптического СУДЗ-РЧС.

Fig. 9. The block diagram of a designed ultra-wideband long-term RF-signal delay device

Таблица 2. Основные параметры разработанного СУДЗ-РЧС.

Table 2. Basic parameters of the designed ultra-wideband long-term RF-signal delay device

Интервал времени задержки, мкс	0,2—60
Диапазон рабочих частот, ГГц	4—18
Шаг перестройки времени задержки, мкс	0,2
Относительная точность задержки, %	1
Вносимые потери, дБ	-3—0
Неравномерность АЧХ, дБ	4
Динамический диапазон, дБ	$\geq 85 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}^{2/3}$
Допустимая входная мощность (-1 дБ), дБм	10
Количество задержанных копий на выходе	более 350
Потребляемая мощность, Вт, не более	5

Сравнение достигнутых параметров с данными табл. 1 показывает, что разработанное волоконно-оптическое устройство долговременной задержки импульсных радиосигналов СВЧ-диапазона превышает современный отечественный уровень по всем основным показателям и соответствует по основным показателям зарубежному уровню, значительно превышая его по коэффициенту передачи, неравномерности АЧХ, количеству и шагу задержанных копий на выходе, что повышает качество и гибкость работы устройства. Потребляемая мощность разработанного устройства на порядок меньше по сравнению с активной цифровой радиочастотной памятью [1].

8. Заключение

На основании выводов [1], рассмотрены принципы построения и достигнутые параметры серийно выпускаемых и разработанных СУДЗ-РЧС с использованием волоконно-оптических схем задержки. Проведенное рассмотрение показало, что на базе радиофотонного подхода и аналоговых волоконно-оптических систем передачи радиосигналов создан новый класс широко применяемых в современной аппаратуре радиолокации, связи и измерительной техники СУДЗ-РЧС с параметрами, которые невозможно получить с помощью других известных вариантов реализации схем задержки РЧ-сигналов.

Анализ также выявил недостатки современных волоконно-оптических СУДЗ-РЧС, основными среди которых являются:

- мощность энергопотребления и массогабаритные характеристики существующих волоконно-оптических устройств долговременной задержки не позволяют их использовать в мобильных и переносных аппаратурных исполнениях;

- отсутствие или чрезмерно большой шаг перестройки времени задержки, а также отсутствие возможности одновременного вывода всех градаций задержки.

С учетом вышеприведенных недостатков предложены следующие принципы оптимизации схемы построения современных волоконно-оптических СУДЗ-РЧС.

- 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 СУДЗ-РЧС по сравнению с цифровой радиочастотной памятью.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI 60715X0138).

Список литературы

1. Белкин М. Е. Сверхширокополосное устройство долговременной задержки радиосигналов: анализ оптимального решения // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 1. С. 103—120.
2. Белкин М. Е., Кудж С. А., Сигов А. С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. № 1 (10). С. 4—20.
3. Long Microwave Delay Fiber-Optic Link for Radar Testing / Newberg I. L. [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1990. Т. 38, № 5. С. 864—866.
4. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 11. С. 32—37.
5. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 272 с.
6. Wurtz L. T., Wheelless W. P. Design of a programmable 2—18 GHz microwave fiber-optic delay line // IEEE Southeastcon'97 Conference Proceedings. 1997. С. 11—19.
7. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation / Kawanishi T., Sakamoto T., Shinada S. [et al.] // IEICE Electronics Express. 2004. Т. 1, № 8. С. 217—221.
8. Microwave photonic delay line signal processing / Diehl J. F. [et al.] // Applied Optics. 2015. Т. 54, № 31. С. F35—F41.
9. Design and performance of Ka-band fiber-optic delay lines / Urick V., Singley J., Sunderman C., Diehl J., Williams K. // NRL Memorandum Report, NRL/MR/5650-12-9456 (2012).
10. Design and performance of a 560-microsecond Ku-band binary fiber-optic delay line / Singley J., Diehl J., McDermit C., Sunderman C., Urick V. // NRL Memorandum Report, NRL/MR/5650-14-9545 (2014).
11. Multi-core fiber design and analysis / Koshiba M. [et al.] // ECOC Technical Digest. 2011. P. 1—3.

Acknowledgement

The work was supported by the Russian Ministry of Education (project RFMEFI 60715X0138).

References

- [1] M. E. Belkin, "Ultra-wideband long-term RF-signal delay devices: optimal decisions analysis," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 103–120, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.1.08
- [2] M. E. Belkin, S. A. Kudzh, and A. S. Sigov, "Novel principles of microwave band radioelectronic devices design with the use of microwave photonics technology," *Russ. Technol. J.*, no. 1, pp. 4–20, 2016. (In Russ.).
- [3] I. L. Newberg, C. M. Gee, G. D. Thurmond, and H. W. Yen, "Long Microwave Delay Fiber-Optic Link for Radar Testing," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 664–666, 1990.
- [4] M. E. Belkin and L. M. Belkin, "Research of Semicondurtor Laser Productivity for Microwave-band Subcarrier Multiplexed Analog Signal Transmission," *J. nano Microsyst. Tech.*, no. 11, pp. 32–37, 2009. (In Russ.).
- [5] O. K. Sklyarov, *Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi* [Fiber optic networks and communication systems]. Moscow: SOLON-Press, 2004. (In Russ.).
- [6] L. T. Wurtz and W. P. Wheless, "Design of a programmable 2–18 GHz microwave fiber-optic delay line," in *IEEE Southeastcon'97 Conference Proceedings*, 1997, pp. 11–19.
- [7] T. Kawanishi, T. Sakamoto, S. Shinada, et al., "Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation," *IEICE Electron. Express*, vol. 1, no. 8, pp. 217–221, 2004.
- [8] J. F. Diehl, "Microwave photonic delay line signal processing," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, pp. F35–F41, 2015.
- [9] V. Urick, J. Singley, C. Sunderman, J. Diehl, and K. Williams, "Design and performance of Ka-band fiber-optic delay lines. NRL Memorandum Report, NRL/MR/5650–12-9456," 2012.
- [10] J. Singley, J. Diehl, C. McDermitt, C. Sunderman, and V. Urick, "Design and performance of a 560-microsecond Ku-band binary fiber-optic delay line. NRL Memorandum Report, NRL/MR/5650–14-9545," 2014.
- [11] M. Koshiba et al., "Multi-core fiber design and analysis," *ECOC Tech. Dig.*, pp. 1–3, 2011.