

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ В ОПТОЭЛЕКТРОННОМ ПРОЦЕССОРЕ НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ

А. В. Алешин¹, М. Е. Белкин¹, И. В. Гладышев¹, А. П. Канавин²,
А. С. Сигов¹, Д. А. Фофанов¹

Путем компьютерного моделирования в широко распространенной оптоэлектронной САПР исследовано влияние времени когерентности полупроводникового лазерного излучателя, входящего в состав наиболее часто применяемой в практических разработках схемы оптоэлектронного радиосигнального процессора (ОЭРСП) на базе многоотводной оптической схемы задержки (ОСЗ), на коэффициент передачи и отношение сигнала к шуму на выходе устройства. В результате получено, что для эффективной работы практического устройства его время когерентности должно быть, по крайней мере, на порядок меньше длительности обрабатываемого радиочастотного импульса. Выполненные измерения времени когерентности трех наиболее распространенных типов современных лазеров: с внешним резонатором, с распределенной обратной связью и с резонатором Фабри–Перо – показали, что только последний тип может быть эффективно применен в составе исследованного ОЭРСП с 4-отводной ОСЗ на базе 7-сердцевинного оптического волокна.

Ключевые слова: оптоэлектронный радиосигнальный процессор, полупроводниковый лазерный излучатель, время когерентности, оптическая схема задержки, моделирование.

¹ МИРЭА (Российский технологический университет), 119454 Россия, Москва, пр. Вернадского, 78; e-mail: belkin@mirea.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр, 53.

Введение. Новое физико-техническое и физико-технологическое направление – микроволновая фотоника¹ – возникло в мире во второй половине прошлого века на стыке двух зрелых научных областей: фотоники и радиотехники сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона и благодаря стремительному продолжению развития в текущем столетии [1, 2] на сегодня также может считаться достигающим стадии зрелости. Одно из наиболее значимых свидетельств этому состоит в появлении и развитии аналоговых устройств с полностью оптической обработкой радиотехнических сигналов, которые в недалекой перспективе способны прийти на смену цифровым сигнальным процессорам (ЦСП), получившим повсеместное применение в современных радиоэлектронных системах (РЭС) СВЧ-диапазона гражданского и военного назначений. Данный класс аналоговых сигнальных процессоров (АСП): первоначально оптоэлектронные радиосигнальные процессоры (ОЭРСП) [3], а позже, фотонные (ФРСП) [4] – в отличие от АСП, построенных на чисто радиоэлектронной базе, уже в самом начале разработок обладали важными преимуществами перед ЦСП: на порядки более широкая рабочая полоса частот и мгновенная полоса обработки, значительно больший динамический диапазон, нечувствительность к любым электромагнитным наводкам и т. д., однако значительно уступали в массогабаритных характеристиках. Проблема успешно решается в настоящее время за счет применения фотонных интегральных схем [5], которые в последние годы широко развиваются в мире [6].

Принципиальная схожесть функционирования ОЭРСП и ФРСП состоит в обработке радиосигналов в оптическом диапазоне, а их основное отличие заключается в том, что первые, как правило, имеют более простую схему, ориентированную на решение конкретной задачи, в то время как вторые обычно рассчитаны на универсальное решение целого ряда задач обработки. Кроме того, важной структурной особенностью ОЭРСП является наличие электрооптического преобразователя (ЭОП) на входе, оптико-электрического преобразователя (ОЭП) на выходе и оптического операционного модуля (ООМ) между ними так, чтобы узел был полностью готов для использования в составе РЭС, в то время как для введения ФРСП требуются внешние ЭОП и ОЭП.

В настоящее время уже разработаны как ОЭРСП, так и ФРСП, выполняющие следующие операции обработки радиочастотных (РЧ) сигналов: частотная фильтрация, фазовый сдвиг, временное интегрирование и дифференцирование, прямое и обратное преобразования Гильберта, реконструкция формы импульса, частотная дискриминация, коммутация и маршрутизация радиоканалов, перестраиваемая временная задержка,

¹ Отечественный эквивалент: радиофотоника.

реконфигурируемая память радиосигналов. Причем, наибольшая активность мирового научного сообщества наблюдается в отношении двух последних операций. Участвуя в этом процессе, нами были недавно исследованы три варианта ОЭРСП на волоконных и интегральных линиях задержки. Первые два, для диаграммообразующих устройств сверхширокополосных фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн, основаны на спектральном разделении оптических несущих частот и многоканальном брэгговском зеркале [7] либо на 8×8 -канальной оптической матрице Батлера [8]. Третий вариант ОЭРСП [9, 10], предназначенный для сверхширокополосного устройства памяти РЧ сигналов, построен на базе многосердцевинного оптического волокна и оптической рециркуляционной схемы.

Как отмечено выше, атрибутом любого радиофотонного устройства, включая ОЭРСП, является ЭОП, в качестве которого обычно используется внешний электрооптический модулятор (ЭОМ), источником оптического излучения которого является полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ). Ключевыми параметрами в реальной схеме ОЭРСП с ООМ на базе оптической схемы задержки (ОСЗ), требующими оптимизации, являются: время когерентности ПЛИ, коэффициент передачи радиофотонного тракта, определяемый потерями в ЭОП и ОЭП и потерями в ОСЗ, и отношение сигнала к шуму (ОСШ) на выходе устройства. Тем не менее, в отношении последних двух параметров хорошо известно [2], что их стабильное измерение вызывает значительные трудности в случае, когда на выходе задержанная реплика сохраняет когерентность с репликой без задержки. В соответствии с этим, цель данной статьи состоит в изучении влияния на последние два параметра времени когерентности ПЛИ и выборе оптимального типа лазерного излучателя для наиболее часто применяемой в разработках схемы ОЭРСП на базе многоотводной ОСЗ. Оценка проводится путем компьютерного моделирования в широко распространенной системе автоматизированного проектирования (САПР) VPI Photonics Design Suite при подаче на вход ОЭРСП импульсного РЧ сигнала.

Компьютерное моделирование. В настоящем разделе проводится компьютерное моделирование исследуемого ОЭРСП с помощью САПР VPI Photonics Design Suite для конкретной схемы 4-отводной ОСЗ, построенной на базе 7-сердцевинного одномодового оптического волокна (МСОВ-7). Схема ОСЗ приведена на рис. 1 [10].

Как следует из рис. 1, для разделения и суммирования задержанных оптических сигналов на входе и выходе данной простой и компактной схемы ОСЗ введены оптический разветвитель (ОР) и оптический сумматор (ОС). Между ними сформированы 4

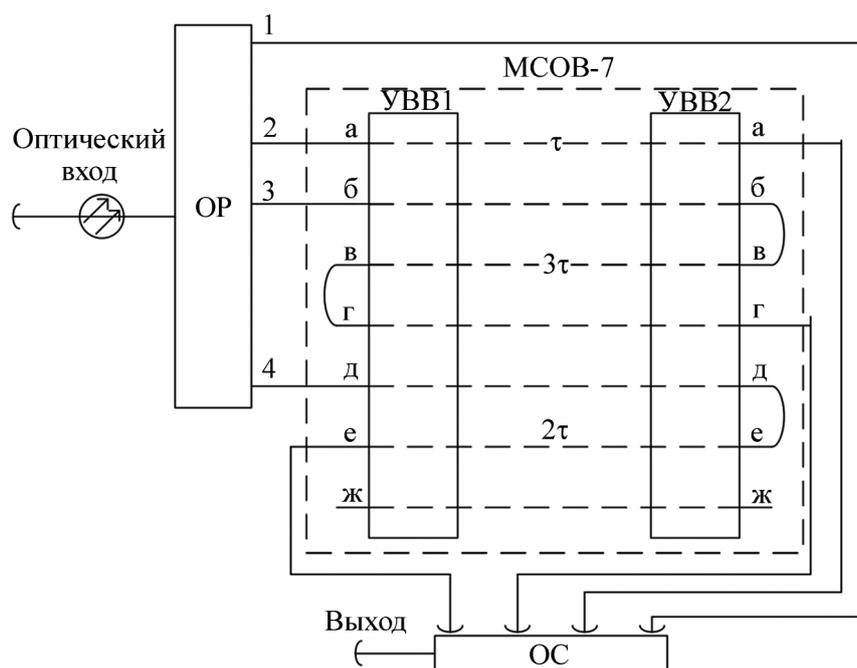


Рис. 1: Исследуемая оптическая схема задержки.

оптических отвода: в первом (от порта 1 ОР) оптический сигнал с выхода ПЛИ передается без задержки, во втором (от порта 2 ОР) – с задержкой на τ , в третьем (от порта 3 ОР) – с задержкой на 2τ , и в четвертом (от порта 4 ОР) – с задержкой на 3τ . На торцах сердцевин МСОВ-7 расположены устройства ввода/вывода (УВВ), с помощью которых осуществляется их соединение и стыковка со стандартным волокном.

Кроме того, для обеспечения практической значимости результатов моделирования в связи с тем, что в спецификациях производителей современных ПЛИ, как правило, не указаны значения его времени когерентности, в ходе подготовки к проведению модельных экспериментов были выполнены измерения обратной величины времени когерентности – полной ширины линии излучения на половине максимального значения (FWHM) – для трех наиболее широко применяемых в ОЭРСИ типов. Измерения проводились с использованием автогетеродинного метода [2]. Объектами исследования были: многочастотный ПЛИ с резонатором Фабри–Перо модели ПОМ-29 производства НПО “Полюс”, Россия и два динамически одночастотных ПЛИ: с распределенной обратной связью модели LDI-DFB-1550 производства фирмы “Laserscom”, Беларусь и с внешним резонатором модели PPCL-300 производства фирмы “Pure Photonics”, США. Количественные значения измеренной ширины линии и расчета времени когерентности при-

ведены в табл. 1. Пример, иллюстрирующий результаты измерения ширины линии для лазера ПОМ-29, показан на рис. 2. Таким образом, с учетом измеренных выше, а также данных из литературных источников время когерентности ПЛИ в ходе модельных экспериментов должно изменяться в диапазоне 0.1 мкс – 100 мкс.

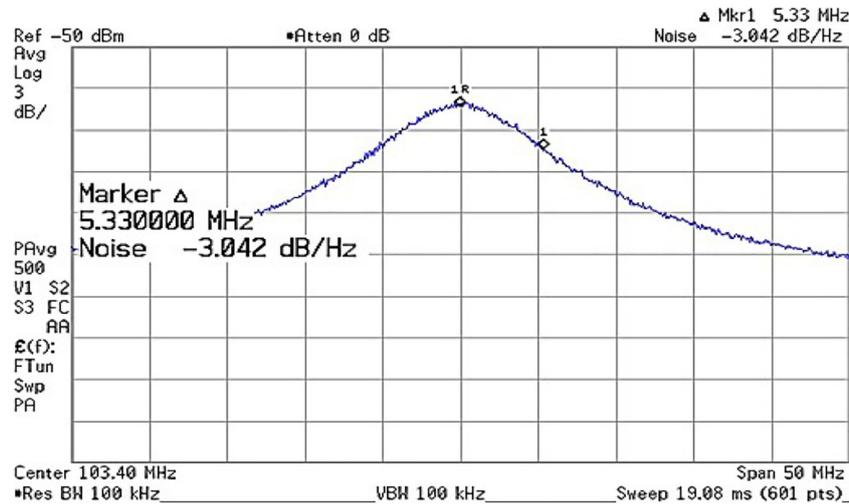


Рис. 2: Измеренная ширина линии ПЛИ ПОМ-29.

Т а б л и ц а 1

Время когерентности τ_c современных ПЛИ

Модель	FWHM, кГц	τ_c , мкс
PurePhotonics PPCL-300	15	67
Laserscom LDI-DFB-1550	130	7.7
Полюс ПОМ-29	5330	0.19

Схема измерительной установки, в состав которой входят: модель ОЭРСП, содержащая библиотечные модели ПЛИ ($\nu = 193.1$ ТГц), ЭОМ, пассивных оптических разветвителей, набора стандартных одномодовых оптических волокон согласно рис. 1 с $\tau = 0.79$ мкс и фотодетектора, а также две инструментальные модели, представлена на рис. 3. Первая из них содержит библиотечные модели импульсного генератора ($T_{imp} = 10$ мкс), генератора непрерывного радиосигнала ($f = 3$ ГГц) с заданным отношением ОСШ выходного сигнала и перемножителя, с помощью которого импульсная последовательность переносится на несущую РЧ. Вторая – включает библиотечные модели измерителя выходного ОСШ и измерителя коэффициента передачи ОЭРСП.

Результаты модельных экспериментов по определению зависимости среднего коэффициента передачи ОЭРСП и выходного отношения сигнала к шуму при входном ОСШ = 30 дБ от времени когерентности лазерного излучателя приведены на рис. 4. На графиках горизонтальные пунктирная и сплошная линии показывают соответственно коэффициент передачи и выходное ОСШ в отсутствие ОСЗ.

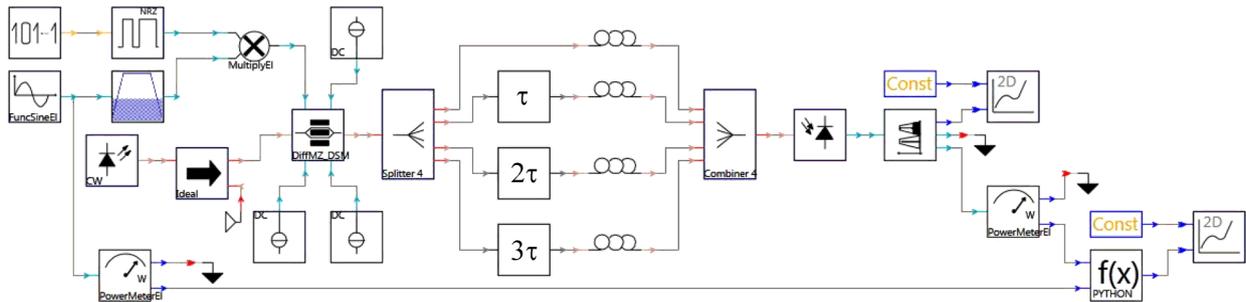


Рис. 3: Схема измерительной установки для проведения модельных экспериментов.

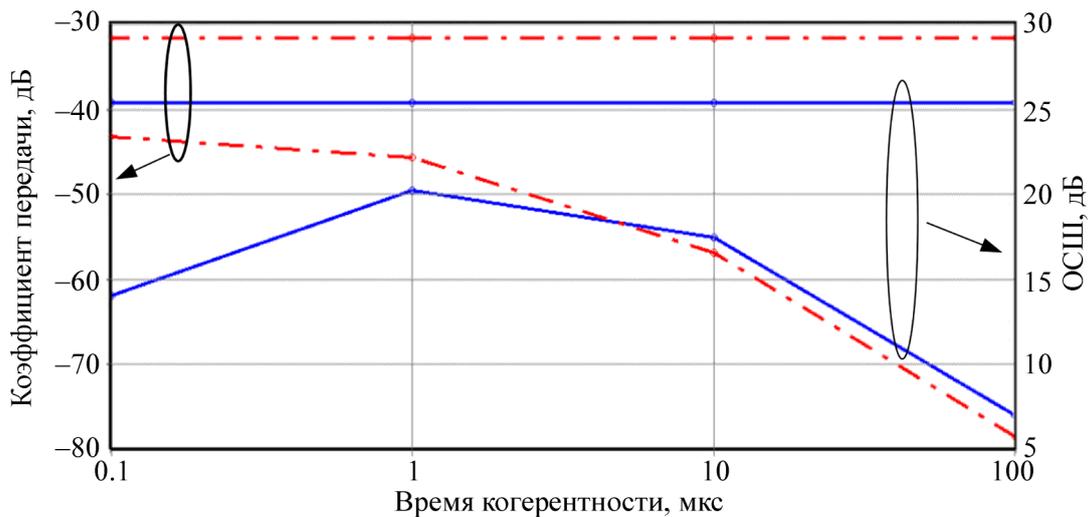


Рис. 4: Влияние времени когерентности ПЛИ на коэффициент передачи и выходное ОСШ ОЭРСП.

Как следует из рис. 4, общая тенденция состоит в значительном уменьшении среднего коэффициента передачи ОЭРСП по мере увеличения времени когерентности ПЛИ. Причем, наблюдаются три участка с возрастающей крутизной спада. На первом, когда время когерентности много меньше длительности РЧ импульса, спад составляет всего лишь 3 дБ. На втором, когда оно сравнимо с длительностью РЧ импульса, из-

менение уже составляет 12 дБ, а на третьем, когда оно много больше длительности РЧ импульса – 20 дБ. Несколько иная картина наблюдается на графике зависимости ОСШ на выходе исследуемого ОЭРСП. В частности, на первом участке, когда время когерентности много меньше длительности РЧ импульса, увеличение составляет 6 дБ. На втором и третьем участках, когда оно сравнимо либо больше длительности радиоимпульса, ОСШ начинает последовательно уменьшаться соответственно со скоростью 3 дБ и 10 дБ на декаду. Сопоставление обоих графиков позволяет сделать вывод, что при относительно малом времени когерентности ПЛИ по сравнению с длительностью РЧ импульса основной вклад в увеличение ОСШ вносится за счет уменьшения уровня выходного шума, влияние которого уменьшается по мере приближения к длительности радиоимпульса и при ее значительном превышении определяется исключительно уменьшением среднего коэффициента передачи ОЭРСП.

Заключение. В данной статье путем компьютерного моделирования исследовано влияние времени когерентности полупроводникового лазерного излучателя на качество обработки радиосигналов в оптоэлектронном процессоре на линиях задержки при подаче на вход ОЭРСП импульсного РЧ сигнала. Из полученных результатов следует, что для эффективной работы практического устройства его время когерентности должно быть, по крайней мере, на порядок меньше длительности обрабатываемого РЧ импульса. Таким образом, из трех испытанных типов современных лазерных излучателей (см. табл. 1) данное условие выполняется только для многочастотного лазера с резонатором Фабри–Перо.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ RFMEFI60719X0319.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. Yao, *IEEE J. of Lightwave Technol* **27**, 314 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2008.2009551.
- [2] В. Д. Урик, Д. Д. МакКинни, К.Д. Вилльямс, *Основы микроволновой фотоники*. Пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева, А. С. Сигова (М., Техносфера, 2016), 376 с. ISBN: 978-5-94836-445-2.
- [3] C. Warde, *Compact Optoelectronic Signal Processors*. In: *Proceedings of IEEE LEOS Annual Meeting Conference “LEOS’99”* (San Francisco, USA, 1999), pp. 325-326. DOI: 10.1109/LEOS.1999.813614.

- [4] J. L. Chen and R. A. Minasian, *IEEE Photonics Technology Letters* **17**(4), 896 (2005). DOI: 10.1109/LPT.2004.843267.
- [5] J. Yao, *Photonic Integrated Circuits for Microwave Photonics*. In: 2017 IEEE Photonics Conference (IPC) Part II – “IPC2017”, (Orlando, USA, 2017), pp. 1-2. DOI: 10.1109/LEOS.1999.813446.
- [6] М. Е. Белкин, С. А. Кудж, А. С. Сигов, *Российский технологический журнал* (2016), № 1, 4 (2016). DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20.
- [7] М. Е. Belkin, D. Fofanov, V. Golovin, et al., Design and optimization of photonics-based beamforming networks for ultra-wide mmWave-band antenna arrays. Chapter in book: *Array Pattern Optimization* (IntechOpen, 2019) Chapter 4, pp. 47-67. <https://www.intechopen.com/online-first/design-and-optimization-of-photonics-based-beamforming-networks-for-ultra-wide-mmwave-band-antenna-a> DOI: 10.5772/intechopen.80899.
- [8] М. Е. Belkin, D. Fofanov, T. Bakhvalova, and A. S. Sigov, Design of Reconfigurable Multiple-Beam Array Feed Network based on Millimeter-Photonics Beamformers. Chapter in book: *Advances in Array Optimization* (IntechOpen, 2019). Chapter 6, pp. 109-132. <https://www.intechopen.com/online-first/design-of-reconfigurable-multiple-beam-array-feed-network-based-on-millimeter-wave-photonics-beamfor> DOI: 10.5772/intechopen.89076.
- [9] Т. Н. Бахвалова, М. Е. Белкин, И. В. Гладышев и др., *Российский технологический журнал* **5**(3), 3 (2017). DOI: 10.32362/2500-316X-2017-5-3-4-21.
- [10] М. Е. Belkin, T. N. Bakhvalova, I. V. Gladyshev, et al., *Continuously Accessible Long-term Fiber Optic Memory of Microwave Signals*. In: 2017 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics – “MWP2017”, (Beijing, China, 2017), DOI: 10.1109/MWP.2017.8168695.

Поступила в редакцию 27 апреля 2020 г.

После доработки 12 августа 2020 г.

Принята к публикации 13 августа 2020 г.