



Многоканальный радиофотонный приемный тракт

С. М. Конторов^{1,2,*}, А. В. Шипулин¹, Ф. Кюпперс¹, В. В. Валуев²

¹ Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

* s.kontorov@skoltech.ru

Рассмотрены структурные схемы построения радиофотонного приемного канала. Предложена схема многоканального радиофотонного приемного тракта на основе лазеров с прямой модуляцией, увеличения количества каналов благодаря использованию дополнительного способа уплотнения на основе вихревых и преобразования входных высокочастотных сигналов на разностную частоту с использованием опорного электрооптического модулятора. Также предложен способ формирования радиофотонного АЦП в спектральной области с использованием комб-генератора на основе электрооптического модулятора Маха-Цандера в режиме перемодуляции. Для входных сигналов с ограниченной спектральной шириной может быть применен метод разделения сигнала на спектральные полосы с последующей обработкой в собственном канале, где ширина полосы подстраивается при помощи электронного АЦП, использующегося для оцифровки. В большинстве случаев выходной сигнал электронного АЦП позволяет получить необходимую информацию о входном сигнале без совместной обработки выходных сигналов со всех каналов; в противном случае к выходным сигналам со всех каналов может быть применено преобразование Фурье, и затем спектры выходных сигналов могут быть объединены для получения необходимого полного спектра широкополосного входного СВЧ сигнала. Для реализации данного метода может быть использован непрерывный лазер совместно с рядом электрооптических модуляторов, фильтров и других пассивных оптических компонентов. Использование амплитудных модуляторов совместно с фазовыми в сильно нелинейном режиме при достаточно высокой входной мощности СВЧ сигнала (перемодуляции) делает возможным создание комб-генератора с десятками равноудаленных в спектральной области частот с малой амплитудной неравномерностью, менее 1 дБ. Оценены эффективность метода радиофотонного АЦП с использованием спектральных интервалов. Получены оптимальные параметры системы. Показана возможность достижения 8–10 эффективных бит в цифровом сигнале для современных оптических элементов.

Ключевые слова: радиофотоника, быстрый радиофотонный АЦП, лазер с прямой модуляцией, амплитудные модуляторы, фазовые модуляторы, радиофотонные фильтры, вихревые.

Статья получена: 16.04.2019. Принята к публикации: 29.04.2019.

Multi-channel Radio Photon Receiving Path

S. M. Kontorov^{1,2,*}, A. V. Shipulin¹, F. Kuppers¹, V. V. Valuev¹

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow Region, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

* s.kontorov@skoltech.ru



Different block diagrams of microwave photonics receiver are considered. The scheme of multichannel microwave photonics receiver is proposed based on vertical-cavity surface-emitting lasers, increased number of channels due to additional type of multiplexing based on vortex and received high frequency signals downconverted to intermediate frequency with the use of just one reference electro-optic modulator. For the input signals with limited bandwidth, another approach for photonic ADC can be used, in which every input signal spectral interval is processed by its own channel, and the width of the spectral interval is adjusted with the performance of an electronic ADC used for digitizing. In many cases, joint processing of the output signals of all channels is not necessary; otherwise, outputs of all channels can be Fourier-processed and concatenated to get complete spectrum of a wideband microwave input signal. For realization of this scheme, continuous wave laser, electro-optic modulators, narrow band optical filters and other passive components can be used. The use of amplitude modulators, together with the phase modulators in a strongly nonlinear regime, at sufficiently high input power of the microwave signal (overmodulation) makes it possible to create a comb generator with dozens of equidistant spectral frequencies with a small amplitude flatness less than 1 dB. Performance capabilities for signal ADC using spectral intervals are derived with numerical simulation and compared with experimental results. Parameters for optimal system operation are studied. It is shown that, for modern photonic components, 8–10 effective bits can be achieved in the digitized signal.

Keywords: microwave photonics, fast photonic ADC, VCSEL, narrow band optical filters, amplitude modulators, phase modulators, microwave photonics filters, vortex.

Received: 16.04.2019. Accepted: 29.04.2019.

I. ВВЕДЕНИЕ

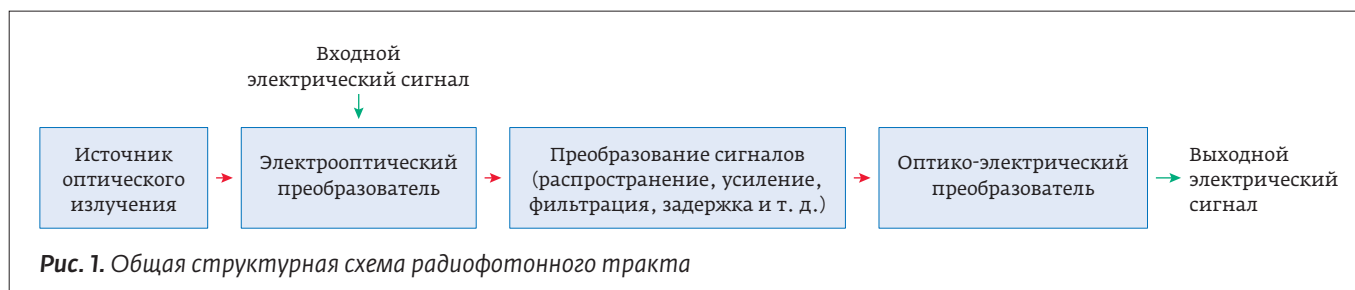
Радиофотоника [1–3] (в зарубежной литературе – микроволновая фотоника) изучает взаимодействие между оптическими и радиочастотными электромагнитными полями в различных нелинейных средах и устройствах для создания новых методов генерации, управления, приема, обработки и анализа СВЧ-сигналов средствами фотоники (рис. 1).

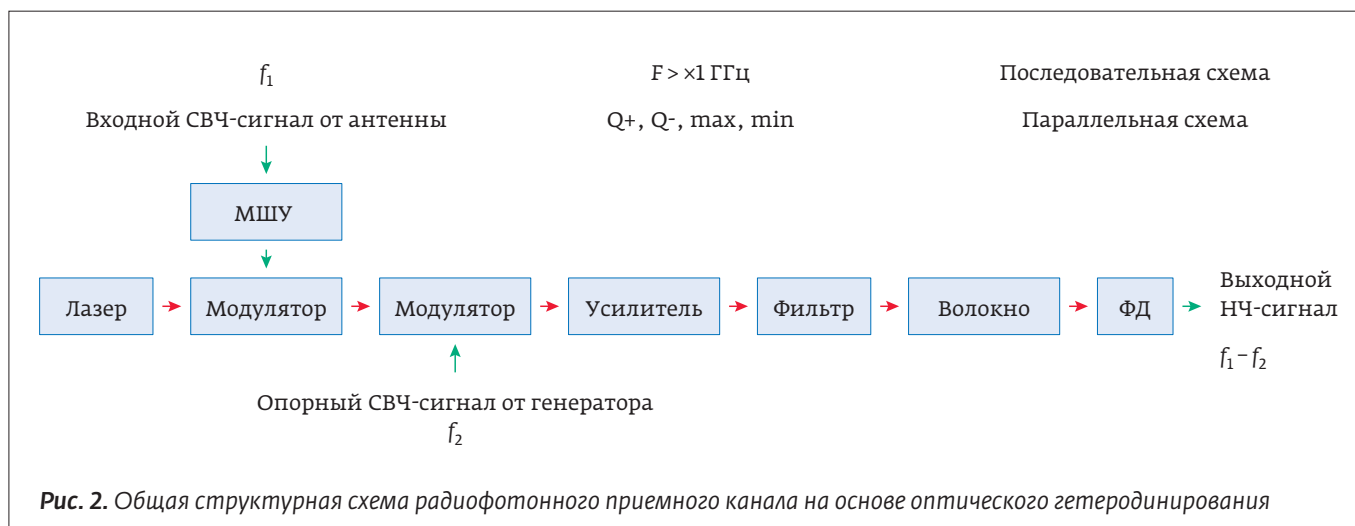
Важное место занимают исследования новых приемных устройств, построенных на принципах радиофотоники, которые развиваются быстрыми темпами и имеют широкие перспективы. Очевидные преимущества радиофотонных приемников СВЧ-сигналов – чрезвычайно широкая полоса, которая может составлять 100 ГГц и более, возможность программного управления

режимами работы, гибкость формирования новых устройств, выполняющих те или иные функции, защищенность от электромагнитных помех, масштабируемость характеристики и низкая стоимость при массовом производстве.

II. РАДИОФОТОННЫЙ ПРИЕМНЫЙ КАНАЛ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ

Одним из решений при создании радиофотонного приемного канала является использование метода оптического гетеродинамирования [4]. В этом случае (рис. 2) источник оптического излучения (лазер) формирует непрерывный сигнал, который поступает на оптический вход модулятора. С другой стороны на электрический вход модулятора поступает СВЧ-сигнал (с частотой f_1) с выхода антенны,





проходя через малошумящий усилитель (МШУ), и преобразуется в оптическую область. Далее этот сигнал поступает на вход второго модулятора, на электрический вход которого поступает опорный СВЧ-сигнал с частотой f_2 . С выхода второго модулятора промодулированный СВЧ оптический сигнал дополнительно усиливается, фильтруется (с целью выделения необходимых частот f_1 и f_2) и поступает на фотодетектор (ФД), где преобразуется в низкочастотный электрический сигнал на промежуточной частоте ($f_1 - f_2$), который далее может быть оцифрован стандартным электронным АЦП. Стоит отметить, что возможны как последовательная, так и параллельная схемы расположения модуляторов [5], позволяющие оптимальным образом сформировать архитектуру радиофотонного приемного канала и улучшить технические характеристики. Так, например, использование последовательной схемы возможно в дискретном исполнении радиофотонных компонентов, однако при этом возникают дополнительные нелинейные искажения из-за двойной перемодуляции СВЧ-сигналов на втором опорном модуляторе, что, в свою очередь, значительно снижает динамический диапазон всей системы. Параллельное расположение модуляторов позволяет избежать этой проблемы, однако для реализации этой схемы необходимо интегральное исполнение модуляторов, т.к. при сложении сигналов с их оптических выходов в дискретном варианте любые (температурные, вибрационные и др.) внешние воздействия на оптическое волокно вызывают смещение фазы оптических сигналов, что, в свою очередь, приводит к значительному (до 20 дБ и более) изменению амплитуды выходного РЧ сигнала. Выбор рабочей точки модуляторов также оказывает значимый эффект

на выходные характеристики радиофотонного устройства. Так, например, перемещение рабочей точки в минимум передаточной характеристики модулятора позволяет дополнительно подавить оптическую несущую (до 30 дБ и более) и увеличить динамический диапазон всего устройства до 120 дБ·Гц^{2/3} и более [6,7].

При построении многоканальных приемных трактов (например, в фазированных антенных решетках – ФАР) помимо преобразования СВЧ-сигнала в низкочастотную область для облегчения электронной обработки необходимо осуществить диаграммообразование (например, вместо физического перемещения антенны). Существующие электрические фазовращатели позволяют качественно работать с узкополосными сигналами (в противном случае возникает расширение диаграммы направленности и ухудшение качества сигналов). Решением этой проблемы может являться применение радиофотонного диаграммообразующего устройства на основе линий задержек, что позволяет управлять широкополосными СВЧ-сигналами в оптическом диапазоне и значительно снизить требования к вычислительной электронной аппаратуре на выходе фотодетекторов [8,9].

В работе [10] предложена и реализована схема 16-ти канального радиофотонного приемного тракта в интегральном исполнении на основе одного лазера и множества модуляторов (рис. 3), а в работе [21] впервые коммерчески реализовано радиофотонное диаграммообразующее устройство в интегральном исполнении для сетей 5G нового поколения.

Дальнейшее увеличение количества модуляторов, усилителей, линий задержек и других эле-

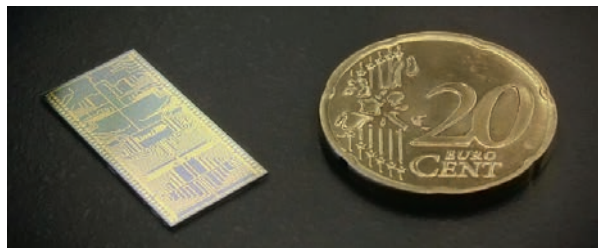


Рис. 3. Реализация 16-ти канального радиофотонного приемного тракта в интегральном исполнении [10]

ментов приводит к значительным потерям, нелинейностям и шумам и, соответственно, ухудшает параметры всей системы в целом (динамический диапазон, отношение сигнал/шум и т. д.). В реальных ФАР и активных ФАР возможно одновременное использование сотен и тысяч каналов, что вызывает некоторые трудности даже при применении существующих радиофотонных технологий:

- суммирование в подсистемы в СВЧ-диапазоне – в перспективе переход на полностью радиофотонные системы в интегральном исполнении;
- использование одного лазера (даже в интегральном исполнении) – много других компонентов – большие потери – много усилителей – большие шумы – низкое качество сигналов;
- использование множества лазеров и модуляторов – технологически сложно и дорого;
- желательно уплотнение всех каналов в одно волокно – применение вращающегося сочленения, использование одного опорного модулятора, повышение стабильности;
- ключевая проблема – ограничение по количеству каналов – длин волн;
- наиболее распространен оптический диапазон С (1530–1565 нм) – возможно применение высоколинейных и малошумящих эрбиевых усилителей, малые оптические потери – WDM сетка 50 ГГц ~100 каналов – дополнительное уплотнение по поляризации ~200 каналов – для многоканальных систем необходимы новые способы уплотнения каналов!

В области телекоммуникаций в последние годы активно разрабатываются [12, 13] дополнительные способы увеличения количества оптических каналов (помимо спектрального, временного и поляризационного способов уплотнения), а соответственно и увеличения пропускной способности системы на основе вортиксов – способа уплотнения каналов по угловому моменту [11]. Данный способ позволяет использовать еще одну степень свободы

и в перспективе на порядок увеличить количество каналов в современных высокоскоростных системах.

В настоящее время [14–16] также активно развиваются лазеры с прямой модуляцией (вертикально-излучающие лазеры), являющиеся по сути комбинацией источника оптического излучения и электрооптического преобразователя, на сегодняшний день позволяющих модулировать оптические сигналы из С-диапазона длин волн с частотами в десятки ГГц [17, 18]. Особенностью таких лазеров также является их интегральное исполнение (типичные размеры порядка 200x200 мкм), что позволяет создавать массивы лазеров на единой подложке совместно с другими фотонными и микроэлектронными интегральными компонентами. Так, например, в работах [19, 20] показана возможность интеграции вортиксов с вертикально-излучающими лазерами для дополнительного уплотнения каналов при мультиплексировании, и соответственно увеличения скорости передачи информации.

На рис. 4 предлагается способ построения многоканального радиофотонного приемного тракта [22] на основе оптического гетеродинамирования, при этом в качестве источника оптического излучения и модулятора предлагается использовать вертикально-излучающие лазеры, совмещенные с вортиксами и с малошумящими усилителями на единой интегральной платформе.

В этом случае N лазеров с прямой модуляцией формируют непрерывные сигналы, которые непосредственно модулируются СВЧ сигналами (с частотой f_1 , но с разными фазами), принимаемыми с антенных элементов и усиленными с помощью МШУ. Далее промодулированные СВЧ-оптические сигналы проходят через соответствующие оптические линии задержки ($\tau_1 - \tau_N$) для формирования диаграмм направленности и объединяются на оптическом мультиплексоре (стоит отметить, что мультиплексирование одновременно возможно по длине волны, по поляризации, по угловому моменту и т. д., при этом каждый способ увеличивает количество используемых каналов всей системы). С выхода мультиплексора СВЧ-сигналы со всех N каналов передаются по одному оптическому волокну на требуемое расстояние (стоит отметить, что все радиофотонные элементы до оптического волокна могут быть выполнены в интегральном исполнении на единой подложке, например, на InP). На приемной стороне оптические сигналы дополнительно усиливаются и поступают на вход модулятора, на

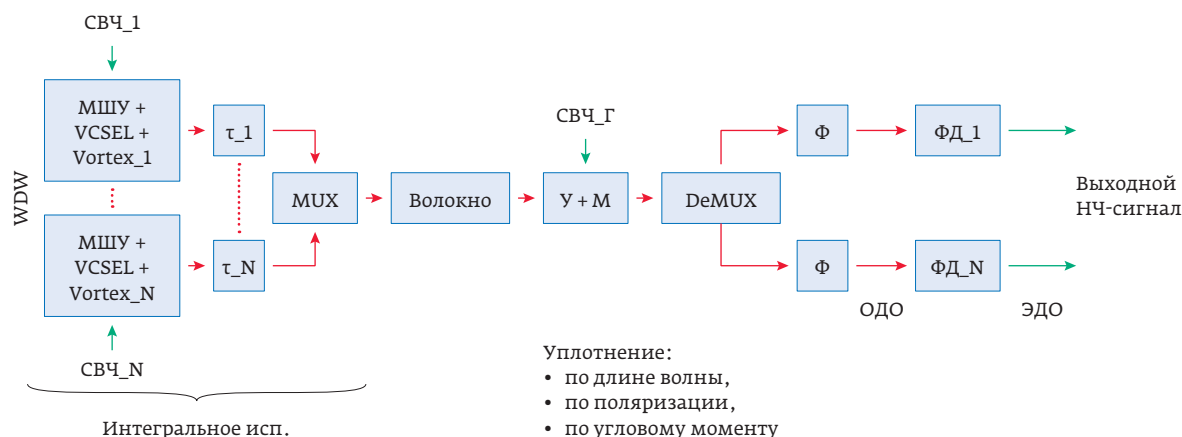


Рис. 4. Возможная реализация многоканального радиофотонного приемного тракта на основе оптического гетеродинамирования, вертикально-излучающих лазеров (VCSEL) и дополнительного способа мультиплексирования на основе вихревых (Vortex) [22]

электрический вход которого поступает опорный СВЧ-сигнал с частотой f_2 , который одновременно модулирует все входные оптические сигналы. С выхода опорного модулятора оптические сигналы поступают на демультиплексор, где они фильтруются и распределяются в исходные N каналов (возможно использование оптических фильтров на выходе демультиплексора – Φ – для дополнительного выделения СВЧ-сигналов и увеличения динамического диапазона всей системы). Далее каждый оптический сигнал (промодулированный СВЧ-сигналами f_1 , f_2 и со своей фазой) поступает на свой низкочастотный фотодетектор. С выходов фотодетекторов РЧ сигналы на одинаковых частотах ($f_1 - f_2$) могут быть оцифрованы стандартными АЦП и далее обработаны в цифровой форме. Следует отметить, что у данного способа существуют как достоинства, так и недостатки.

Достоинства:

- возможное интегральное исполнение лазеров, модуляторов, МШУ и т.д. на единой технологической платформе (уменьшает массогабаритные характеристики, энергопотребление, стоимость);
- один опорный модулятор на приемной стороне (может быть в дискретном исполнении);
- один оптический усилитель (может быть в дискретном исполнении);
- одинаковые низкочастотные фотодетекторы и АЦП во всех каналах;
- возможно использование одного фотодетектора для всех каналов (нет необходимости применения демультиплексора);

- одновременное применение нескольких способов уплотнения каналов.

Недостатки:

- существующие вертикально-излучающие лазеры ограничены полосой модуляции до ~ 10 ГГц;
- меньший динамический диапазон всей системы по сравнению с оптическим гетеродинамированием, выполненным по параллельной схеме;
- сложность реализации мультиплексоров (особенно в интегральном исполнении) и демультиплексоров, позволяющих одновременно работать для всех вышеперечисленных способов уплотнения каналов – необходимы дополнительные исследования;
- остается необходимость разработки антенных элементов, позволяющих работать во всем требуемом СВЧ-диапазоне, в том числе в интегральном исполнении.

III. РАДИОФОТОННЫЙ ПРИЕМНЫЙ КАНАЛ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО АЦП В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Другим решением при создании радиофотонных приемных устройств является использование радиофотонных АЦП для преобразования входного СВЧ-сигнала в цифровой вид уже в первых каскадах, причем дальнейшая обработка осуществляется только для цифрового сигнала. В этом случае для обработки оказывается доступной вся информация, имеющаяся во входном сигнале от нулевой до максимальной частоты приемника. Однако

для многих практических приложений требуется решение более простой задачи – приема сигнала с относительно небольшим диапазоном частот огибающей по сравнению с частотой несущей. В частности, такие СВЧ-сигналы, с явно выраженной несущей частотой, широко используются в радиолокации. При традиционном подходе в этом случае необходимо использовать радиофотонный АЦП с высокими частотами дискретизации, что приводит к существенным трудностям при увеличении несущей частоты. Действительно, при несущей частоте входного сигнала около 30–40 ГГц частота оцифровки оказывается около 100 ГГц.

В последнее десятилетие в мире интенсивно изучались фотонные АЦП с частотой дискретизации в несколько десятков гигагерц [23, 24]. В то же время при проектировании конкретных устройств следует иметь в виду возможности компьютерной обработки сигнала, оцифрованного с помощью такого АЦП. Выходной сигнал от быстрого фотонного АЦП направляется во многие каналы. Данные в каждом канале будут обрабатываться отдельно и будут объединены только в конце вычислительного цикла, и эта процедура не зависит от типа сигнала. Используя исходную информацию о сигнале, реализация фотонного АЦП с оптимальной методикой распараллеливания на уровне схемы может существенно улучшить характеристики всей системы (источник сигнала – АЦП-вычислительное устройство) и уменьшить ее вес и размеры. Для входных сигналов с ограниченной пропускной способностью нет смысла создавать фотонный АЦП обычным способом, когда каждый соседний сигнал обрабатывается собственным каналом (см., например, обзоры [25, 26] и ссылки в них). Лучший результат может быть получен с использованием подхода, основанного на измерении входного СВЧ-сигнала в отдельных спектральных интервалах, в совокупности составляющих полный спектр входящего сигнала. Мотивация этого подхода заключается в следующем: переключиться с обработки каждой временной выборки собственным каналом на обработку каждого спектрального интервала по собственному каналу. В этом случае входной сигнал делится на несколько спектральных интервалов; в каждом интервале может использоваться относительно медленный электронный АЦП. Во многих случаях отдельные выходные сигналы этих АЦП достаточны для приема необходимой информации, то есть совместная обработка выходных сигналов со всех каналов не требуется. В противном случае выходы всех каналов могут быть обработаны

и объединены при помощи преобразования Фурье, чтобы получить полный спектр широкополосного входного сигнала СВЧ. Ниже мы рассмотрим некоторые возможные реализации этого подхода.

А. Фотонный АЦП во временной области:

- даже в случае узкополосного сигнала требуется полное количество каналов, которое определяется максимальной частотой модуляции;
- существуют жесткие требования к модуляторам, поскольку оптический сигнал является широкополосным (большое количество мод);
- требуется совместная обработка выходных данных со всех каналов;
- используется линия дисперсии – элемент, который усложняет интегральную реализацию;
- сложное масштабирование системы – требуются существенные модификации программного и аппаратного обеспечения.

В. Фотонный АЦП в спектральной области:

- для узкополосных сигналов можно использовать только один канал;
- требования к модуляторам не такие жесткие, поскольку оптический сигнал является узкополосным (один режим);
- в большинстве случаев совместная обработка выходных данных со всех каналов не требуется;
- линия дисперсии не используется;
- масштабирование системы выполняется путем простого добавления каналов.

Фотонная реализация АЦП на основе измерения входного СВЧ сигнала в отдельных спектральных интервалах была нами ранее продемонстрирована в работах [27, 28]. Здесь применялся непрерывный лазер, а также для обеспечения опорных оптических сигналов для гетеродинирования использовался ряд оптических модуляторов. Эта схема эффективна для умеренного числа спектральных интервалов, например, 5–10, которые могут содержать в себе полосу частот в 10–20 ГГц с использованием современных электронных АЦП. Необходимо отметить, что эта схема требует соответствующего количества СВЧ-опорных сигналов с разными частотами, что становится значительной технической нагрузкой при увеличении количества каналов. Одним из решений данной проблемы может быть использование отфильтрованных СВЧ-частот радиофотонного комб-генератора в качестве опорных сигналов. На рис. 5 продемонстрирована схема построения такого комб-генератора на основе модулятора в сильно нелинейном режиме

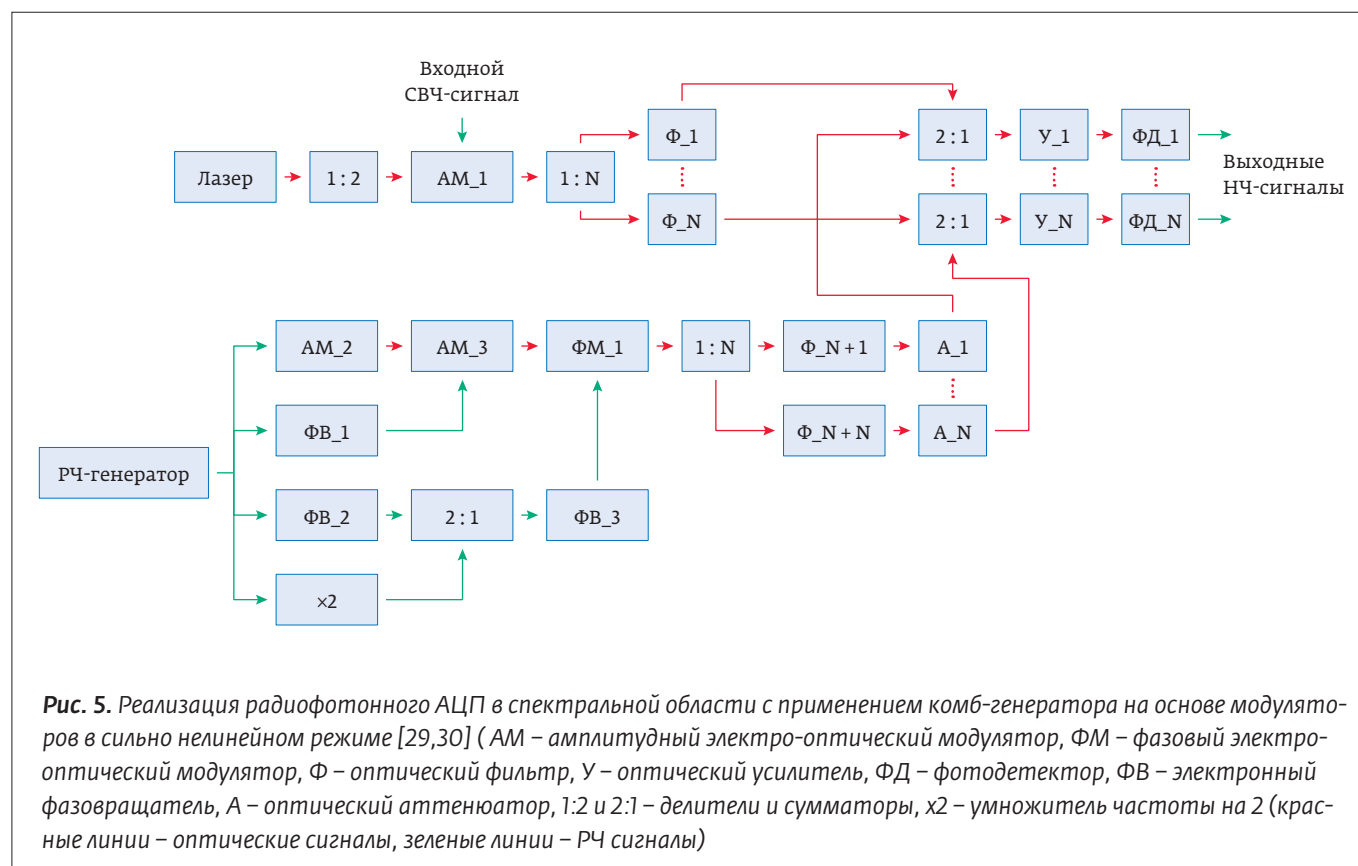
(в режиме перемодуляции) [29, 30], а также ее применение для построения радиофотонного АЦП в спектральной области без применения дополнительных модуляторов.

В этом случае лазер генерирует непрерывный оптический сигнал, который разделяется на два сигнала. Один сигнал поступает на вход амплитудного модулятора (АМ_1), на электрический вход которого приходит широкополосный СВЧ-сигнал от антенны (предварительно усиленный МШУ). С выхода АМ_1 промодулированный СВЧ-оптический сигнал разделяется на N каналов, в каждом из которых стоит оптический фильтр ($\Phi_1 - \Phi_N$) на свой длине волны для выделения требуемой части входного широкополосного СВЧ-сигнала в оптической области [27, 28]. С выходов фильтров сигналы поступают на соответствующие входы оптических сумматоров.

РЧ генератор формирует низкочастотный сигнал высокой мощности, который разделяется на 4 равные части. Один сигнал поступает на РЧ вход амплитудного модулятора АМ_2 для модуляции оптического второй части сигнала с лазера. Второй сигнал поступает на вход электронного фазовращателя (ФВ_1) для смещения фазы РЧ, далее этот

сигнал поступает на РЧ вход амплитудного модулятора АМ_3 для модуляции оптического сигнала с выхода АМ_2. Третий сигнал поступает на электронный фазовращатель ФВ_2 для смещения РЧ и объединения с удвоенным РЧ сигналом ($\times 2$, четвертый сигнал РЧ генератора) на 2:1 электронном сумматоре. Далее этот сигнал поступает на вход ФВ_3, где смещается по фазе и поступает на вход фазового модулятора ФМ_1 для модуляции оптического сигнала с выхода АМ_3.

Оптический сигнал комб-генератора с выхода ФМ_1, содержащий десятки равноудаленных и синфазных РЧ сигналов в оптической области, разделяется на N каналов (аттенюаторы $A_1 - A_N$ используются для выравнивания амплитуд оптических сигналов во всех каналах). Далее эти сигналы фильтруются оптическими фильтрами ($\Phi_{N+1} - \Phi_{N+N}$) на соответствующих длинах волн для выделения в каждом канале своей гармонике исходного РЧ сигнала, которые затем суммируются в оптической области с соответствующими частями исходного широкополосного СВЧ сигнала для оптического гетеродинамирования и получения на выходе каждого фотодетектора (ФД_1 - ФД_N) своей части исходного СВЧ сигнала



на одной и той же промежуточной низкой частоте. Далее эти сигналы могут быть оцифрованы и обработаны с помощью стандартных электронных АЦП. Оптические усилители ($Y_1 - Y_N$) используются для дополнительного усиления сигналов в каждом канале с целью повышения динамического диапазона всей системы.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 6 представлена математическая модель 4-х канального радиофотонного АЦП в спектральной области с применением комб-генератора на основе модуляторов в сильно нелинейном режиме, выполненная в программе VPIphotonics Transmission Maker.

Лазер генерирует сигнал с частотой $193,1 \cdot 10^{12}$ Гц, который далее разделяется на две части на оптическом сплиттере. Один сигнал поступает на вход амплитудного модулятора (AM_1), на электрический вход которого приходит широкополосный СВЧ сигнал от генератора гребенки СВЧ сигналов в диапазоне от 14 до 18 ГГц и мощностью -40 дБм. С выхода AM_1 промодулированный СВЧ оптический сигнал разделяется на 4 канала, в каждом из которых оптические фильтры ($\Phi_1 -$

центральная частота $193,0855 \cdot 10^{12}$ Гц, Φ_2 – центральная частота $193,0845 \cdot 10^{12}$ Гц, Φ_3 – центральная частота $193,0835 \cdot 10^{12}$ Гц, Φ_4 – центральная частота $193,0825 \cdot 10^{12}$ Гц) вырезают сигналы с шириной полосы 1 ГГц. С выходов фильтров сигналы поступают на соответствующие входы оптических сумматоров.

РЧ генератор формирует низкочастотный сигнал (1 ГГц, мощность 1 Вт), который разделяется на 4 равные части. Один сигнал поступает на РЧ вход амплитудного модулятора AM_2 для модуляции второго оптического сигнала с выхода лазера. Второй РЧ сигнал поступает на вход электронного фазовращателя (ΦB_1) для смещения фазы сигнала на 45° , далее этот сигнал поступает на РЧ вход амплитудного модулятора AM_3 для модуляции оптического сигнала с выхода AM_2 . Третий сигнал поступает на электронный фазовращатель ΦB_2 для смещения РЧ сигнала на 45° и объединения с удвоенным РЧ сигналом ($\times 2$, четвертый сигнал РЧ генератора) на 2:1 электронном сумматоре. Затем этот сигнал поступает на вход ΦB_3 , где смещается по фазе на 45° и поступает на вход фазового модулятора ΦM_1 для модуляции оптического сигнала с выхода AM_3 .

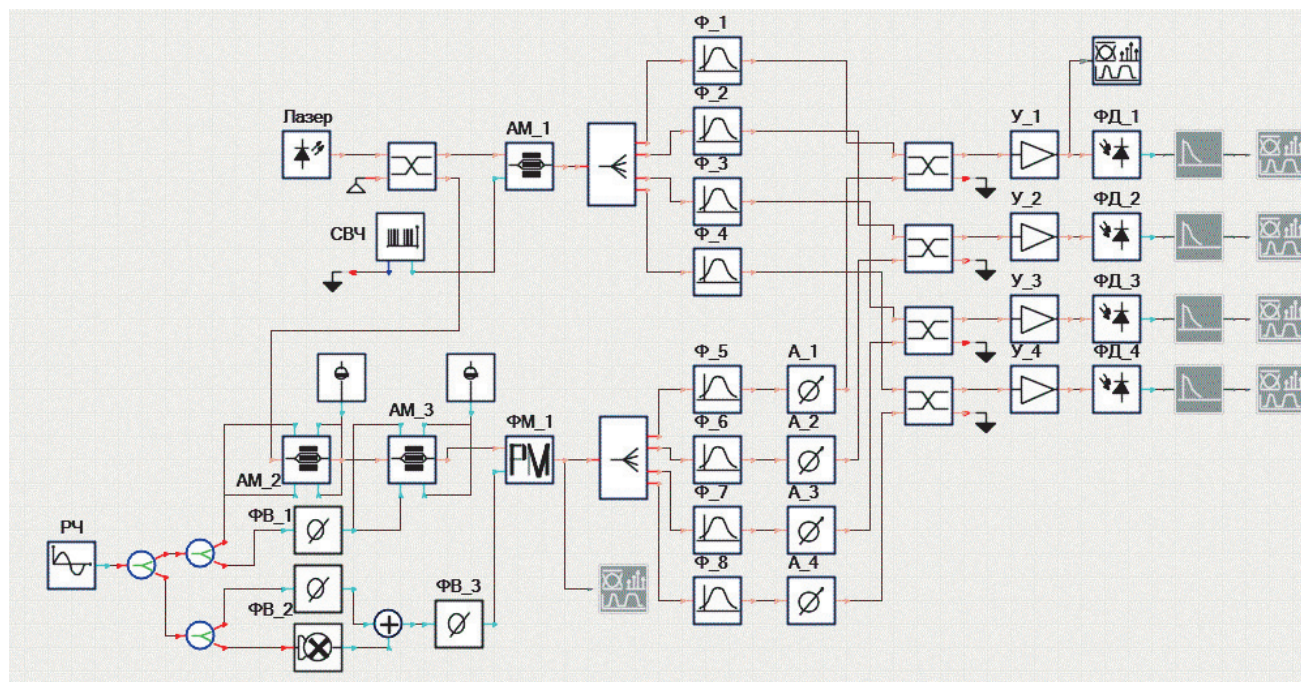


Рис. 6. Математическая модель радиофотонного АЦП в спектральной области с применением комб-генератора на основе модуляторов в сильно нелинейном режиме, выполненная в программе VPIphotonics Transmission Maker

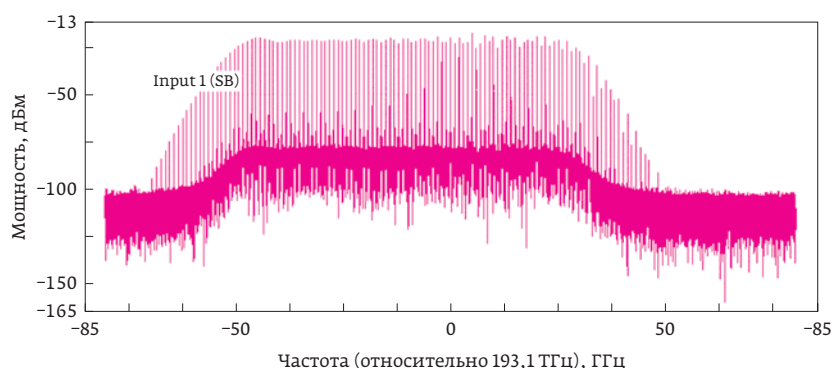


Рис. 7. Спектр оптического сигнала на выходе радиофотонного комб-генератора. Неравномерность АЧХ в левой части спектра менее 1 дБ

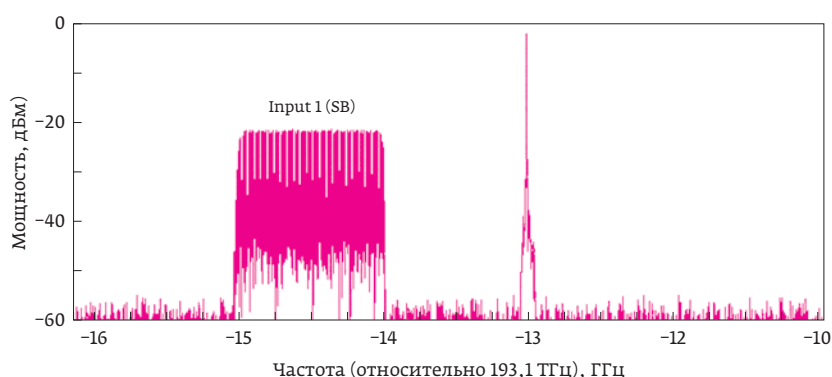


Рис. 8. Спектр оптического сигнала перед фотодетектором ФД_1, предварительно усиленный с помощью оптического усилителя

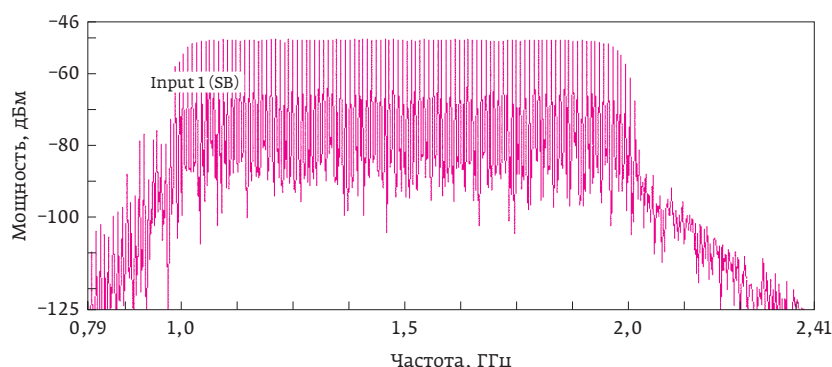


Рис. 9. Часть спектра исходного широкополосного СВЧ сигнала на выходе ФД_1, сдвинутая в область низких частот на промежуточную частоту 1.5 ГГц

Оптический сигнал комб-генератора с выхода ФМ_1, содержащий десятки равноудаленных (с интервалом в 1 ГГц) и синфазных РЧ сигналов в оптической области (рис. 7), разделяется на 4 канала (аттенюаторы А_1 – А_4 используются для выравнивания амплитуд оптических сигналов во всех каналах).

Далее эти сигналы фильтруются оптическими фильтрами (Ф_5 – центральная частота $193,087 \cdot 10^{12}$ Гц, Ф_6 – центральная частота $193,086 \cdot 10^{12}$ Гц, Ф_7 – центральная частота $193,085 \cdot 10^{12}$ Гц, Ф_8 – центральная частота $193,084 \cdot 10^{12}$ Гц), которые затем суммируются в оптической области с соответствующими частями исходного широкополосного СВЧ сигнала (рис. 8) для оптического гетеродинирования и получения на выходе каждого фотодетектора (ФД_1 – ФД_4) своей части исходного СВЧ сигнала на одной и той же промежуточной низкой частоте (рис. 9). Коэффициент усиления оптических усилителей (У_1 – У_4) составляет около 30 дБ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены схемотехнические решения для построения многоканального радиофотонного приемного тракта на основе оптического гетеродинирования с применением лазеров с прямой модуляцией и с дополнительным уплотнением каналов на основе вортковсов в интегральном исполнении, а также с применением радиофотонного АЦП в спектральной области на основе комб-генератора и модуляторов в сильно нелинейном режиме.

Показана возможность использования одного опорного модулятора в схеме с вертикально-излучающими лазерами, а также двух ампли-



тудных и одного фазового опорного модулятора в схеме с радиофотонным АЦП не зависящих от количества каналов приемного радиофотонного тракта.

Приведены результаты моделирования фотонной реализации АЦП в спектральной области на основе комб-генератора и модуляторов в сильно нелинейном режиме. Метод спектрально-интервального измерения сигнала показывает хорошую гибкость и частотное масштабирование. Легко изменить как несущую частоту, так и пропускную способность каждого канала, изменив частоту РЧ генератора и центральную частоту оптических фильтров. Высокочастотная полоса пропускания фотонного АЦП ограничена полосой пропускания одного приемного модулятора (на сегодняшний день более 100 ГГц), тогда как другие компоненты (фотодетекторы и электронные АЦП) могут иметь более узкую полосу пропускания. Другим преимуществом является то, что данный метод может быть полезен для любых аналоговых и цифровых широкополосных входных сигналов.

VI. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Центру фотоники и квантовых материалов Сколковского института науки и технологий (Сколтех) за предоставленное программное обеспечение (VPIphotonics Transmission Maker) для моделирования радиофотонных устройств.

Авторы также выражают благодарность НИЯУ МИФИ за предоставленные комплектующие и измерительное оборудование для проведения испытаний радиофотонных устройств.

VII. ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI58117X0026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Capmany J., Novak D. *Nature Photonics*. 2007; 1(6): 319.
2. Seeds A. J., Williams K. J. *J. Lightwave Technol.* 2006; 24(12): 4628.
3. Yao J. P. *J. Lightwave Technol.* 2009; 27(3):314.
4. V. V. Valuev, Yu. V. Gulyaev, S. M. Kontorov et al. A Universal Microwave Photonic Receiving Channel. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018 63(9): 1080–1088. September.
5. V. V. Valuev, S. M. Kontorov, V. V. Kulagin, D. A. Prokhorov, V. A. Cherepenin, A. N. Shulunov. Microwave photonics frequency conversion of microwave signals. *Proceedings – International Conference Laser Optics*. 2018; ICLO 2018. DOI: 10.1109 / LO.2018.8435452.
6. Shilong Pan, Zhenzhou Tang. A highly reconfigurable photonic microwave frequency mixer. *SPIE Newsroom*. February 2015. DOI: 10.1117 / 2.1201501.005736.
7. Ali Altaqui, Erwin H. W. Chan and Robert A. Minasian. Microwave photonic mixer with high spurious-free dynamic range. 2014 Optical Society of America. *APPLIED OPTICS*. 2014; 53(17): 10 June.
8. Weiwen Zou. A Multi-Channel Multi-Bit Programmable Photonic Beamformer Based on Cascaded DWDM. *IEEE.1943–0655*, 2014. DOI: 10.1109 / JPHOT.2014.2344007.
9. M. Belkin et al. Comparison of RF Photonics-Based Beamformers for SuperWide Bandwidth Phased Array Antennas. *IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 198 (2017) 012010 doi: 10.1088 / 1757–899X / 198 / 1 / 012010.
10. Maurizio Burla. *Microwave photonics activities in the University of Twente: research, development and valorization*. Enschede, Netherlands: Telecommunication engineering group University of Twente. 2014.
11. Nenad Bozinovic et al. Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers. *SCIENCE*. 2013; 340: 28 JUNE.
12. Yao A. M., and Padgett M. J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications. *Advances in Optics and Photonics*. 2011; 3 (2):161. ISSN1943–8206.
13. Arkadi V. Chipouline et al. Optical Vortex Propagation In Few-mode Rectangular Polymer Waveguides. *Conference: Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim)*. 2017; Singapore Volume: P3–018.
14. F. Kupperts et al. Surface micromachined tunable 1.55 μm -VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning. 2011 Optical Society of America. *OPTICS EXPRESS*. 2011; 19(18): 29 August 17336.
15. Fumio Koyama. Advances and New Functions of VCSEL Photonics. *OPTICAL REVIEW*. 2014; 21 (6): 893–904.
16. М.Белкин и др. Вискелоника – новое направление оптоэлектронной обработки радиосигналов. *Элементная база Электроники. ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес*. 2015; 3: 143.
17. Joris Van Kerrebrouck et al. 10 Gb / s Radio-Over-Fiber at 28 GHz Carrier Frequency Link Based on 1550 nm VCSEL Chirp Enhanced Intensity Modulation after 2 km Fiber. 2018. *Optical Society of America*.
18. Yun-Chieh Wang et al. A High-Speed 84 Gb / s VSB-PAM8 VCSEL Transmitter-Based Fiber–IVLLC Integration. *IEEE*. 2018; 10(5): September.
19. Franko Kupperts et al. 10-Gb / s Direct Modulation of Widely Tunable 1550-nm MEMS VCSEL. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2015; 21(Issue 6, Nov.-Dec).
20. Arkadi Chipouline et al. MEMS-based wavelength and orbital angular momentum demultiplexer for on-chip applications. 2017 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO / Europe-EQEC)*.
21. URL: <https://photonics.lionix-international.com/worlds-first-integrated-optical-beamforming-network/>.
22. Michael E Manka. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications. 2008 *International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference*. DOI: 10.1109 / MWP.2008.4666690.
23. Khilo A., S. J. Spector and M. E. Grein. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter. *Optics Express*. 2012; 20(4): February.
24. Alves T. and A. Cartaxo. Photonic analogue-to-digital converter based on wavelength division multiplexing technique. *Proceedings of the International Conference on Data Communication Networking and Optical Communication system (OPTICS-2011)*. 2011; 111–120.
25. Callahan P. T. Photonic analog-to-digital conversion. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 2012; 30(4): 202.
26. G. C. Valley. Photonic analog-to-digital converters. *Optics Express*. 2007; 15(March):1955–1982.
27. S. M. Kontorov, V. A. Cherepenin, V. V. Kulagin, D. A. Prokhorov, A. N. Shulunov and V. V. Valuev. Signal Spectral-Interval Estimation in Fast Photonic Analog-to-Digital Convertors. *PIERS2018 Toyama: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM*. Abstracts. – ELECTROMAGNETICS ACADEMY CAMBRIDGE, MA USA. p. 727.
28. V. A. Cherepenin, S. M. Kontorov, V. V. Kulagin, D. A. Prokhorov, A. N. Shulunov, V. V. Valuev. Photonic Analog-to-Digital Conversion of Microwave signals Using Spectral-Interval Estimation. in *European Microwave Week*. 2018 Madrid: Abstracts, 10.23919 / EuMC.2018.8541512.
29. Atsushi Ishizawa et al. Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase- and intensity-modulated laser. *OPTICS EXPRESS*. 2013; 21(24): 2 December. DOI:10.1364 / OE.21.029186. | 29186.
30. Adrien Aubourg et al. Generation of picosecond laser pulses at 1030 nm with gigahertz range continuously tunable repetition rate. *Optics Letters*. 2015; 40(23): December 1.