Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 05. С. 41–65.

DOI: **10.7463/0516.0840246**

Представлена в редакцию: 15.04.2016
Исправлена: 29.04.2016

УДК 621.37, 535.8

Концепция построения радиолокационной станции на основе элементов радиофотоники

Шумов А. В.[1,*], Нефедов С. И.[1], Бикметов А. Р.[1]

[*]shum_ov@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В данной статья проведен обзор и анализ современной отечественной и зарубежной литературы в области применения элементов радиофотоники в средствах радиолокации. Обоснованы причины перехода к новой элементной базе, показаны преимущества подобного перехода. Данная статья посвящена структурной проработке радиолокационной станции (РЛС) на основе элементов радиофотоники, выбору и обоснованию конкретных технических решений по всем ключевым узлам, формирующим систему в целом, и обоснованию основных тактико-технических характеристик подобных систем. На основании проведеннного расчет тактико-технических характеристик РЛС типа Воронеж-М на основе узлов радиофотоники показано резкое повышение разрешающей способности, увеличение дальности обнаружения, снижение массогабаритных характеристик изделия.

Ключевые слова: радиофотоника, радиолокационная станция, активная фазированная антенная решетка, фотонный аналого-цифровой преобразователь, сверхширокополосный сигнал

Введение

В последние годы для радиолокационных станций (РЛС) становятся все более актуальными требования реализации режима радиовидения и автоматического распознавания целей в реальном масштабе времени, обеспечения многофункциональности и помехозащищенности работы при одновременном повышении общей надежности и уменьшении массогабаритных характеристик [1 - 3].

Одновременное выполнение всех вышеперечисленных требований оказалось практически невозможным для современных антенных решеток на основе традиционной радиоэлектронной аппаратуры. Основной причиной этого является тот факт, что традиционная радиоэлектронная аппаратура не может обеспечить полноценное функционирование широкополосных и особенно сверхширокополосных (СШП) сканирующих антенных решеток из-за технических ограничений рабочей полосы пропускания, значительной инерционности, высоких частотно-зависимых потерь и недостаточной стабильности.

Одним из перспективных направлений создания альтернативной аппаратуры является использование оптических методов синтеза, преобразования, передачи и обработки радиочастотных сигналов, а именно использование радиофотоники в РЛС [3].

Применение элементов радиофотоники обеспечит значительное улучшение следующих основных тактико-технических характеристик РЛС:

- резко повысит разрешающую способность по дальности и информативность – за счет возможности значительного (на несколько порядков) расширения эффективной полосы сигнала;

- увеличит дальность обнаружения – за счет снижения потерь в длинных линиях при использовании оптического волокна и соответствующей коммутационной аппаратуры;

- обеспечит стабильность характеристик при изменяющихся климатических, прежде всего температурных, условиях за счет применения термостабильного оптического волокна;

- обеспечит высокую помехозащищенность – за счет значительно более слабой чувствительности оптико-электронной аппаратуры и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) к внешним электромагнитным воздействиям;

- уменьшит массо-габаритные характеристики антенного полотна РЛС с ФАР/АФАР, что особенно заметно для крупноапертурных антенных систем (типа ДОН-2Н, Воронеж и т.п.);

- в перспективе – снизит стоимость РЛС – за счет перехода к крупносерийному производству радиофотонной элементной базы и меньшей материалоемкости изделий, а также планируемого в дальнейшем перехода к высокопроизводительным фотонным АЦП (ФАЦП).

Реализация перечисленных преимуществ достигается внедрением элементов, функциональных узлов и составных частей подсистем АФАР на основе электрооптических модуляторов (ЭОМ) и демодуляторов, источников и приемников оптического излучения, усилителей оптического сигнала, оптических линий задержки (ОЛЗ) и/или фазовращателей, ВОЛС и оптических пассивных элементов.

Большинство статей по применению радиофотоники в системах радиолокации ограничивается обзором отдельных узлов и элементной базы. В [2, 3] приведены примеры реализации различных радиофотонных устройств: радиофотонные аналоговые тракты, радиофотонные аналоговые процессоры, радиофотонные автогенераторы гармонических сигналов, ФАЦП и т.д.

В работах [3, 6] приведен обзор иностранных достижений в области радиофотонных РЛС, достаточно подробно описана физика процессов в радиофотонных элементах, детально проработан многоканальный приемопередающий модуль, показаны отдельные варианты технических решений по созданию узлов РЛС.

В работах [6, 7] подробно описаны основные типовые схемы реализации ФАЦП, приведены как практически достигнутые, так и перспективные технические характеристики, предложены варианты реализации приема с оптической предобработкой сигнала, применимые в радиофотонной РЛС.

В ряде работ описаны созданные на основе элементов радиофотоники отдельные функциональные узлы. Например, в работах [8 - 10] показана техническая реализация волоконно-оптического лазерного модуля, волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигналов, фазостабильной многоканальной разводки синхросигналов от 2 до 20 ГГц между 64 элементами [11 - 14].

Созданы экспериментальные стенды [15, 16] оптического широкополосного адаптивного радара, демонстрирующего возможности сопряжения всей цепочки радиофотонных элементов для одноканальной системы. Проработаны математические модели отдельных узлов [17, 18].

В литературе приведены также отдельные попытки синтеза структурных схем многоканальной радиолокационной станции с АФАР на основе радиофотоники. Например, в работе [19] предложен вариант блок-схемы крупноапертурной АФАР, приведены предложения по возможностям использования отдельных элементов радиофотоники для ее технической реализации, сформулированы общие требования к ее характеристикам.

Предложенная в работе [20] структурная схема РЛС с использованием ВОЛС содержит лишь приемопередающий тракт на основе радиофотонных элементов, однако такое решение не позволяет реализовать все преимущества радиофотонных РЛС.

В [21 - 24] предложены схемы АФАР с фотонным диаграммообразованием на ОЛЗ с излучателями в виде антенны Вивальди.

В [25] описаны технические достижения в области применения радиофотоники за ближайшие несколько лет. Предложены блок-схемы оптоэлектронных генераторов (ОЭГ), оптического фазо-кодового модулятора, оптического фильтра, схема оптического диограммообразования для антенной решетки и принцип аналого-цифрового преобразования в радиофотонных системах.

Новизна настоящей работы обусловлена тем, что, несмотря на достаточно большое количество статей, посвященных элементной базе радиофотоники, схемной проработки и созданию отдельных узлов радиофотонного радара, отсутствует проработанное схемотехническое решение РЛС на основе АФАР, реализующего все основные преимущества применения радиофотонных элементов. Данная статья посвящена структурной проработке такой РЛС, выбору и обоснованию конкретных технических решений по всем ее ключевым узлам, формирующим систему в целом, и обоснованию ее основных тактико-технических характеристик.

1. Структурная схема РЛС с АФАР на элементной базе радиофотоники

Для реализации указанных выше преимуществ радиофотонной АФАР предлагается использовать следующую структурную схему радиолокатора (рисунок 1).

Наиболее информативным вариантом реализации РЛС является импульсная система. Импульсные РЛС обладают следующими преимуществами:

- возможность построения РЛС с одной антенной;
- удобство измерения дальности нескольких целей;
- построение РЛС с селекцией движущихся целей (СДЦ).

Применение радиофотоники позволит сформировать как сверхкороткие импульсы (до десятых долей нс), так и импульсы со сверхбольшой базой, что приведет к увеличению разрешающей способности по дальности предлагаемой РЛС на несколько порядков.

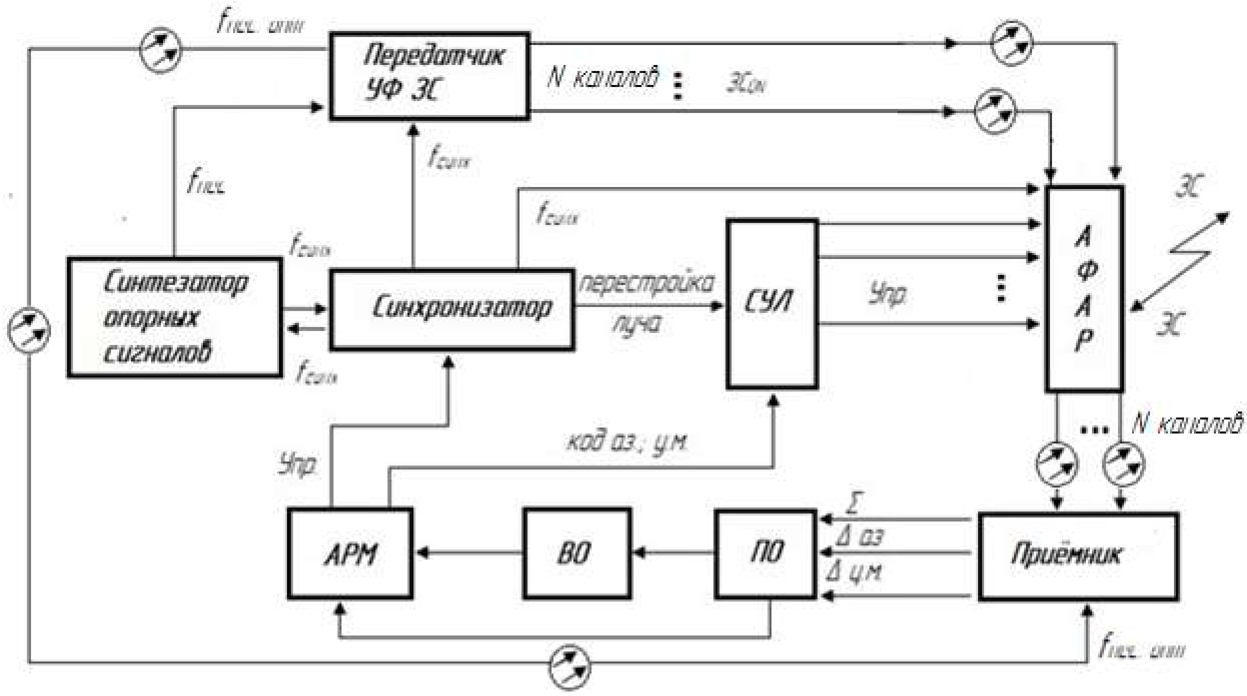

Рисунок 1 – Структурная схема РЛС

Импульсная РЛС включает в себя следующие основные блоки: синтезатор опорных частот, синхронизатор, устройство формирования зондирующего сигнала (УФЗС), система управления лучом (СУЛ), АФАР, оптический цифровой приёмник, устройства первичной (ПО) и вторичной (ВО) обработки и автоматизированное рабочее место (АРМ).

Оператор с АРМ дает команду синхронизатору о начале работы станции (*Упр. 0*). Синхронизатор обеспечивает временную синхронизацию системы, вырабатывая тактовые импульсы с частотой синхронизации ($f_{синх}$), полученной от синтезатора опорных частот.

Синтезатор опорных частот – устройство, вырабатывающее сетку рабочих частот, обеспечивая синфазность работы системы. Радиофотонные опорные синтезаторы имеют более чем на порядок лучшие характеристики по шумам и стабильности при одновременном уменьшении на два порядка габаритов и энергопотребления [26].

Синхронизатор посылает стартовый импульс ($S_{старт}$) на УФЗС. УФЗС генерирует зондирующие сигналы (ЗС) на оптической несущей, которые подводятся к антенной системе по многомодовому оптическому волокну. На рисунке 2 показана структурная схема УФЗС для формирования сигнала на оптической несущей.

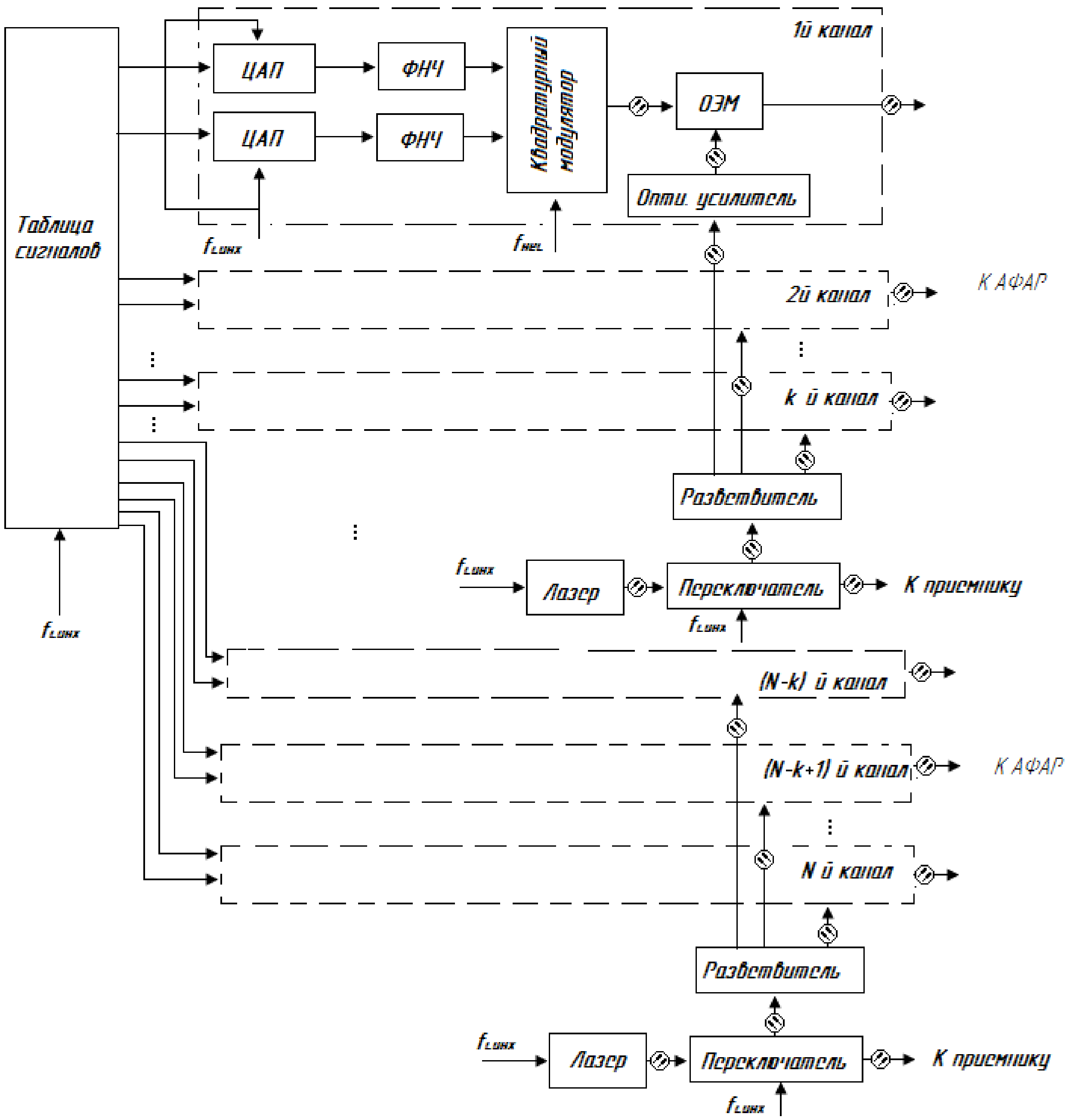

Рисунок 2– Структурная схема УФЗС

Подобная структура УФЗС позволит сформировать ЗС и передавать его к АФАР по ВОЛС, что значительно снизит потери в тракте передачи и чувствительность к внешнему электромагнитному воздействию.

Предлагаемая схема разводки оптического сигнала позволит увеличить стабильность и идентичность оптических характеристик, выделенных групп приемо-передающих каналов.

На рисунке 3 представлена структурная схема АФАР на базе фотоники.

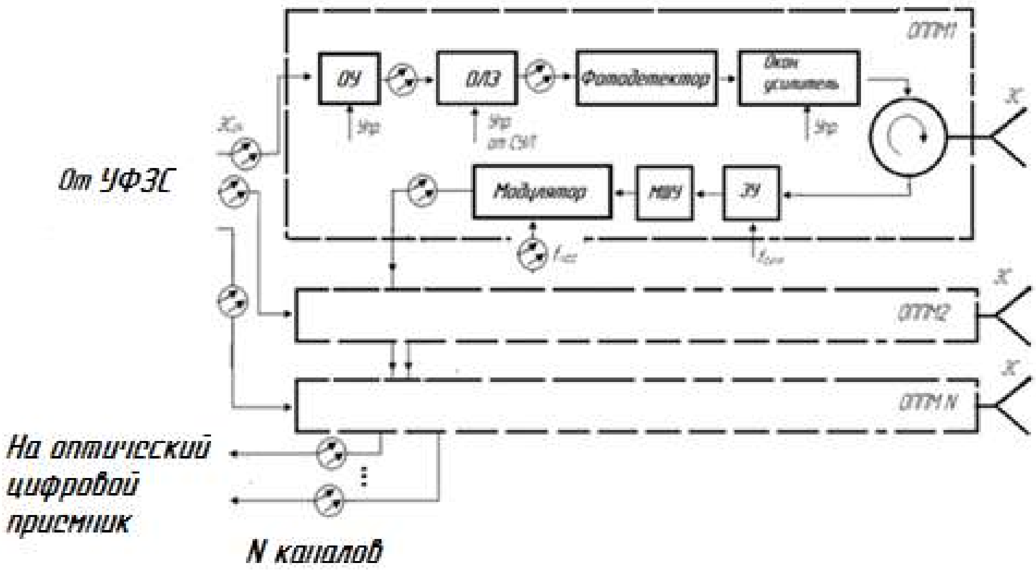

Рисунок 3 – Структура АФАР на базе радиофотоники

Формируемые оптические импульсы усиливаются в оптическом усилителе (ОУ) оптического приемо-передающего модуля (ОППМ) АФАР (при необходимости), после чего, попадают на перестраиваемую ОЛЗ, обеспечивающую угол поворота фазы радиочастотной составляющей для формирования диаграммы направленности АФАР в нужном направлении, как показано на рисунке 4. Перестраиваемая ОЛЗ управляется сигналами, поступающими от СУЛ.

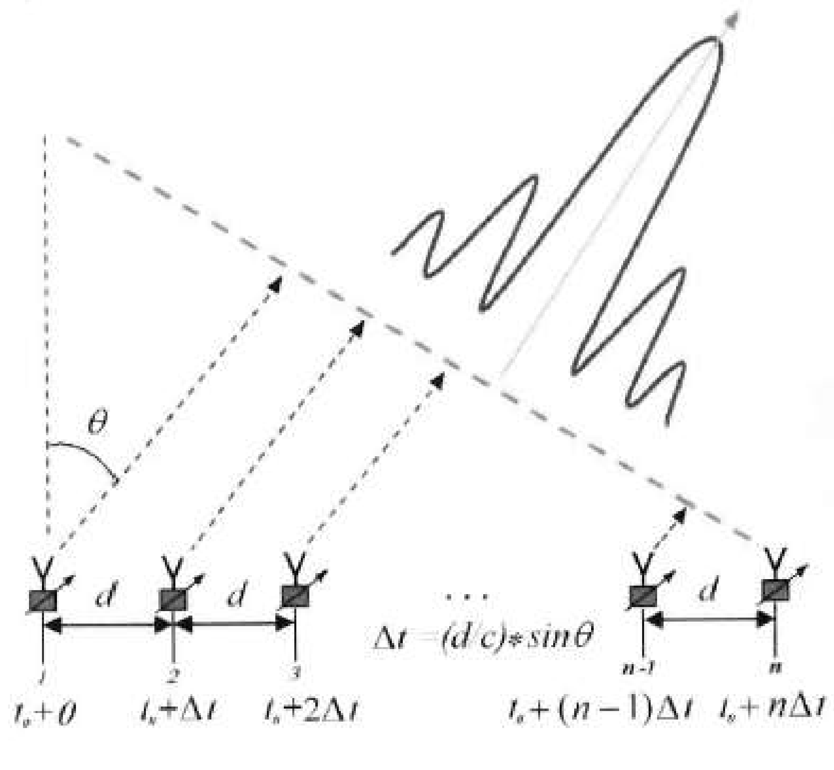

Рисунок 4 – Временной способ сканирования для эквидистантной антенной решетки, t_0 –временная задержка управляемых ОЛЗ от 1 до n-й [3]

После попадания оптического импульса на фотодетектор выделяется радиочастотная компонента на выходе фотоприемника, которая поступает на вход цепочки усилителей. После оконечного усилительного каскада радиосигнал через циркулятор попадает на излучатель антенны.

В тракте приема АФАР, принятая смесь сигнала и шума через циркулятор попадает на защитное устройство (ЗУ), предотвращающее перегрузку приёмного тракта. В малошумящем усилителе (МШУ) эхо-сигнал (ЭС) усиливается и передается на электрооптический модулятор (ЭОМ) приемного тракта, на который в паузах между передаваемыми сигналами на излучение подается когерентная оптическая несущая. Оптическая несущая модулируется принятым сигналом и по ОВ поступает на вход оптического цифрового приёмника.

Оптический цифровой приёмник разнесен с антенным полотном. Это позволяет уменьшить массо-габаритные параметры антенного полотна РЛС и за счет использования ВОЛС снизить энергетические потери в тракте приема.

Концепция разделения приемо-передающей аппаратуры и антенного полотна АФАР позволяет снизить воздействия климатических условий, вследствие чего, увеличить стабильность характеристик.

На рисунке 5 представлена структурная схема оптического цифрового приемника.

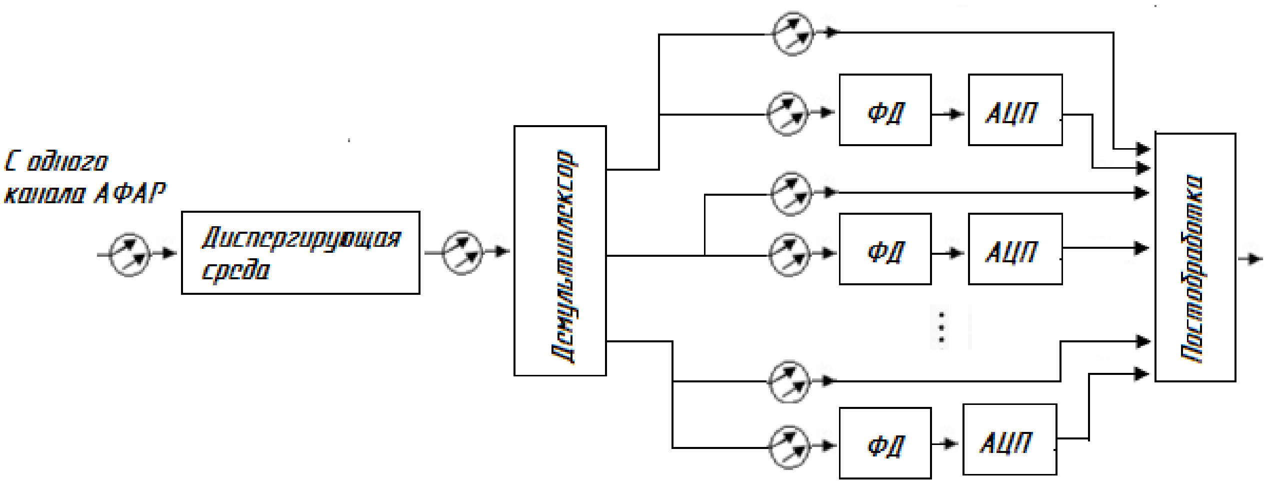

Рисунок 5 – Структурная схема приёмника

В оптическом цифровом приемнике сигналы из N каналов АФАР оцифровываются и поступают на блок постобработки, в котором формируется суммарная и разностные приемные диаграммы.

Приемник является одним из самых уязвимых узлов проектируемой системы, т.к. на сегодняшний день отсутствуют серийные ФАЦП, способные оцифровать СШП сигнал.

Предложенная структура с применением оптической предобработки сигнала позволяет производить аналого-цифровое преобразование коротких и быстрых сигналов, используя АЦП с малой частотой выборки. Что позволяет реализовать уже на существующей элементной базе прием и оцифровку СШП сигналов.

Существенным недостатком предложенной схемы является ее высокая цена. Однако, эта проблема может быть в скором времени решена, с появлением серийных ФАЦП с приемлемыми характеристиками.

Далее оцифрованные ЭС поступают на устройство первичной обработки, в котором выполняется обнаружение сигнала на фоне помех и формируются единичные отметки о цели (пороговая обработка, измерение параметров сигнала).

Обнаружение траекторий цели в зоне ответственности РЛС и оценка параметров обнаруженных траекторий производится в устройстве вторичной обработки. Информация от устройств первичной и вторичной обработки поступает на АРМ.

2 Предложения по технической реализации ключевых узлов радиофотонной АФАР

2.1 Выбор длины волны оптической несущей

На рисунке 6 показаны три окна прозрачности оптических волокон, в которых затухание имеет наименьшее значение. Именно под эти диапазоны длин волн (850, 1300, 1550 нм) разработаны устройства излучения, преобразования и обработки оптического сигнала.

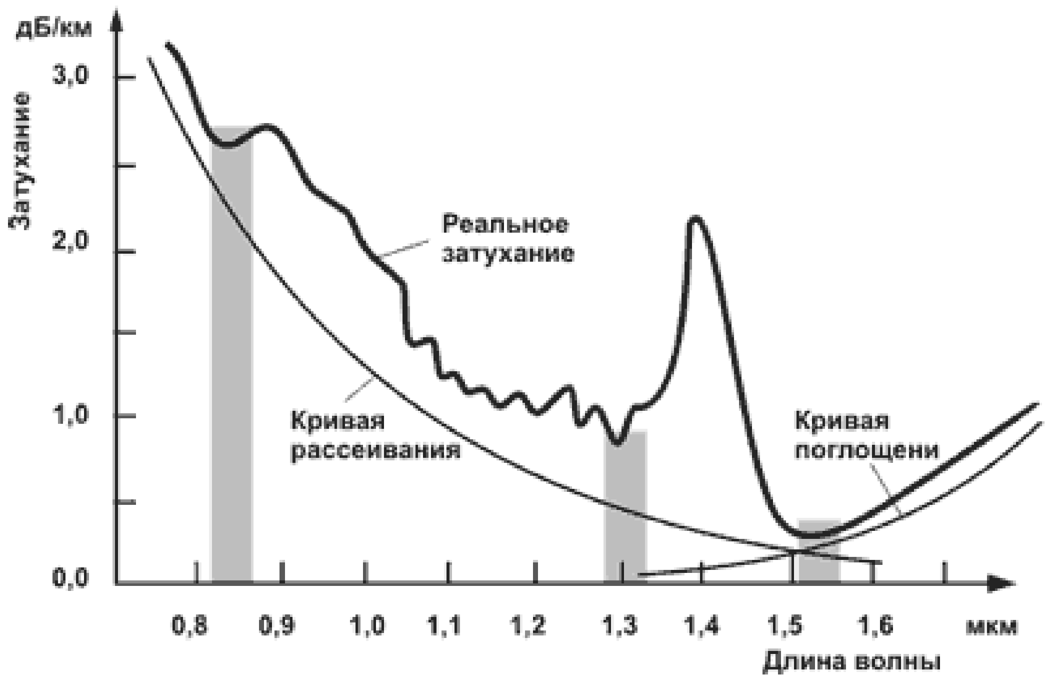

Рисунок 6 – Окна прозрачности оптических волокон [27]

В разрабатываемой радиофотонной РЛС предлагается использовать элементную базу на оптической длине волны 1550 нм. Выбор длины волны связан с наименьшим затуханием и наиболее полном комплекте компонентов с удовлетворяющими характеристиками.

2.1 Радиофотонные генераторы

Для высокопроизводительных радарных систем требуются генераторы с очень низким фазовым шумом для выделения слабых сигналов на фоне шумного окружения.

Перспективные проекты на основе мод шепчущих галерей (МШГ):

– оптоэлектронный генератор на основе модулятора на модах шепчущих галерей (ММШГ);

– оптические гребёнки на основе ММШГ с керровской нелинейностью.

В работе [28] предложен и изготовлен ОЭГ с резонансным ММШГ (рисунок 7, 8). Устройство характеризуется малым порогом и низким потреблением энергии. К недостаткам устройства можно отнести низкий порог насыщения и малую выходную мощность, а также возможность переноса шумов света на микроволновый сигнал.

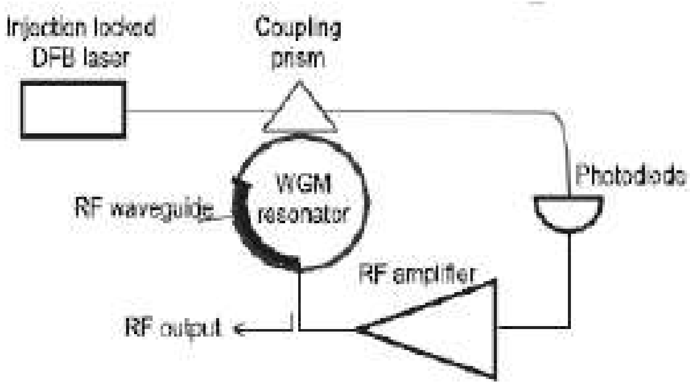

Рисунок 7 – ОЭГ на основе нелинейного ММШГ [29]

Коммерчески производимые фирмой OEwaves микрооптоэлектронные осцилляторы работают на частоте 35 ГГц и обеспечивают очень низкий уровень фазовых шумов -108 дБн/Гц на отстройке 10 кГц [30]. Стационарные оптоэлекторнные осцилляторы этой компании на частоте 8…10 ГГц обеспечивают уровень фазового шума -163 дБн/Гц на отстройке 10 кГц, а в компактном исполнении -140 дБн/Гц [31] .

Рисунок 8 – Вид ОЭГ на основе нелинейного ММШГ [30]

В работах [32 - 35] представлены экспериментальные фотонные СВЧ генераторы, основанные на эффекте мод шепчущей галереи. Актуальный обзор работ по оптическим гребенкам в МШГ представлен в [36 - 38].

2.2 Источники оптического когерентного излучения

Источник оптического когерентного излучения является функциональным узлом УФЗС радиофотонной АФАР. Существуют различные проекты в области высокоэффективных перспективных источников оптического когерентного излучения широкого диапазона мощности, которые представлены в работах [39, 40].

Для реализации УФЗС радиофотонной АФАР хорошо применимы DFB лазеры.Компании Emcore, CNI LASER, PRINCETON LIGHTWAVE, GOOCH & HOUSEGO, WAVESPECTRUM LASER предоставляют широкий выбор лазерных фотодиодов и DFB лазеров (таблица 1).

Таблица 1 – характеристики лазеров [41]

Производитель/наименование	Длина волны, нм	Выходная оптическая мощность, мВт	Тип волокна	Темновой ток фотодиода, мкА	Диапазон рабочих температур, °C
EMCORE / 2522C-SF-DC-SA лазерный диод	1310 /1550	10	Одномод.	0,005	-40…+85
EMCORE / Лазер 1782 DWDM High Power CW Source Laser	1550	100	Одномод.	< 0,1	-20…+65
EMCORE / 1782 - DFB лазерный диод	1528 – 1560	40 -100	Одномод.	–	-20… +65
CNI LASER / SLDP-1550-2-SM – лазерный диод	1550	2	Одномод.	< 0,1	-40…+85
CNI LASER / MLDP-1550-8-62.5μm - лазерный диод	1550	8	Многомод.	–	-10… +85
PRINCETON LIGHTWAVE/ PSL-450 - лазерный диод высокой мощности	1550±20	400	Одномод.	–	0… +65
GOOCH & HOUSEGO / AA1406 - DFB лазерный диод	1529,5 – 1563,4	До 100	Одномод.	< 0,1	-20… +70
WAVESPECTRUM LASER / WSLX-1550-650m-H - лазерный диод	1550±20	600…650	Многомод.	–	-40… +60

В таблице 2 приведены характеристики отечественных источников оптического излучения производства НПФ ДИЛАЗ г. Москва.

Таблица 2 – характеристики лазеров НПФ ДИЛАЗ [42]

Производи-тель/наименование	Длина волны, нм	Выходная оптическая мощность, мВт	Тип во-локна	Темновой ток фото-диода, мкА	Диапазон ра-бочих темпе-ратур, °C
НПФ ДИЛАЗ / ДМПО131Н-14	1270…1350	5	Одномод.	10	-20… +55
НПФ ДИЛАЗ / ДМПО155-21	1310 /1550	5	Одномод.	10	-20… +60

2.3 Модуляторы

Современные ЭОМ создаются на основе кристаллов ниабата лития ($LiNbO_3$) или танталата лития ($LiTaO_3$), а также на основе полупроводниковых материалов $A^{III}B^{V}$. В настоящее время ЭОМ представляет собой интерферометр Маха-Цендера на базе интегрально-оптических волноводных модуляторов с использованием электрооптических эффектов.

В сводной таблице 3 представлены характеристики модуляторов интенсивности следующих производителей: Oclaro inc. (США), Thorelabs inc. (США), Jenoptic Ag (Германия), Photline (Франция), JDSU (США).

Таблица 3 – Характеристики модуляторов

Характери-стики /Производитель	JDSU AM-1500	Jenoptic AM-1500	Oclaro AM-20/40	PhotoLine MXAN-LN-10/20	MXDO-LN-20	Thorelabs LN63/56/81/82/83S	Thorelabs LN58S
Длина вол-ны, нм	1550±10	1550±100	1570±45	1555±25	1555±25	1565±40	1565±40
Макс. опт. мощность, мВт	200	300	100	100	100	-	-
Раб. темпе-ратура, °C	0-70	-0-70	0-70	0-70	0-70	0-70	0-70
Габариты, мм		96x19x10		110x15x9.5	110x15x9.5	65x11.4x5.2	120x11.4x9.6

Подробные технические характеристики можно найти в технической документации от производителей, находящейся в открытом доступе на сайтах компаний [43 - 46].

Наиболее перспективными являются модуляторы на МШГ. В работах [47 - 48] приведено сравнение обычного электрооптического модулятора Маха-Цендера (ММЦ) бегущей волны с модулятором на МШГ.

2.4 Фотоприемники

Основным элементом оптического приёмника чаще всего является PIN фотодиод с широкой полосой пропускания от 18 ГГц и шире. Диапазон рабочих длин волн чаще всего от 900 до 1680 нм, что позволяет использовать оптический приёмник в ВОЛС, имеющих разные длины волн оптической несущей. В последнее время, чаще используются приёмники построенные на интегральных компонентах, что позволило существенно снизить размеры приемников и увеличить надёжность.

В таблице 4 приведены основные характеристики фотодетекторов зарубежных и отечественных производителей.

Таблица 4 – Характеристики фотоприемников [41,42]

Производитель/наименование	**Диапазон оптических длин волн, нм**	**Рабочая полоса, ГГц**	**Чувствительность А/Вт**	**Диапазон рабочих температур, °С**
EMCORE / Фотодиод 2522C-SF-DC-FA	1280…1580	22	0,6	-40…+85
EMCORE / SIRU3022 .05–22 GHz оптический 22 ГГц приемник	1310 / 1550	0,05 – 22	0,5	-40…+70
Picometrix / Балансый фотоприемник 43 GHz BPDV2150R	1480…1620	22	0,6	0… +75
Picometrix/ Когерентный фотоприемник CR-100D/VOA	1550	20	0,04	-40…+70
Picometrix/ P-50A - фотодиод	1200 …1650	50	0,5	-40…+85
Picometrix/ AT-12A - фотоприемник на лавинном фотодиоде	1250 …1650	10	0,8	0…+70
GOOCH & HOUSEGO / EM169 - фотодиод	1280 …1620	20	0,8	-40…+85
НПФ ДИЛАЗ / PIN фото-приёмник ДФДМШ70-16	1300/1550	16	0,8	-20…+55
НПФ ДИЛАЗ / InGaAs PIN фотодиоды ДФД300ТО	1300/1550	6	0,75/0,85	-60…+55

2.5 Оптические усилители

Эрбиевые ОУ EDFA являются наиболее распространенным видом усилителя в сфере волоконно-оптических коммуникаций.

Основной составляющей ОУ EDFA является легированное ионами эрбия ОВ. В таблице 5 приведены основные характеристики ОУ зарубежных и отечественных производителей.

Таблица 5 – Характеристики ОУ [41,49]

Производитель / наименование	**Диапазон оптических длин волн, нм**	**Средняя входная мощность, мкВт**	**Средняя выходная мощность, мВт**	**Диапазон рабочих температур, ^{o}C**
KEOPSYS/ PEFA-LP-C - эрбиевый усилитель импульсных сигналов	1535 – 1565	16	До 2200	-10…+65
EMCORE / OTS-2OP	1532 – 1565	0,03	25	0…+50
ЗАО НОЛАТЕХ/ Оптический усилитель с драйвером ПОУ-1550	1510 – 1550	10	2	-10…+65

2.6 Оптические линии задержки

ОЛЗ обеспечивают угол поворота фазы радиочастотной составляющей для формирования диаграммы направленности АФАР в нужном направлении, как показано на рисунке 4.

В таблице 6 приведены основные характеристики ОЛЗ.

Таблица 6 – Характеристики ОЛЗ [41]

Производитель/наименование	**Диапазон оптических длин волн, нм**	**Время задержки**	**Дискрет**	**Диапазон рабочих температур, ^{o}C**
Photonics/Линия задержки MDL-002-I-15-1-FC/APC-PP	1260…1650	0…1120 пс	1 фс	-20…+60
Photonics/ VDL-001 - оптическая линия задержки	1260…1650	0…1120 пс	10 пс	0…+40
ALNAIR LABS / ADL-100 - программируемая оптическая линия задержки	800 до 1700	До 2,5нс	10 фс	0…+40

2.7 ФАЦП

Обсуждению возможных характеристик ФАЦП посвящён ряд исследований, в частности [50 - 52]. В статье [6] проведён обзор работ в области фотонных методов выполнения преобразования электрических аналоговых сигналов в электрические цифровые сигналы, рассмотрен текущий мировой уровень ФАЦП.

К настоящему времени технологии электронных АЦП обеспечивают возможности выполнения серийными устройствами преобразования со скоростями дискретизации свыше 60 Гвыб/с для сигналов с шириной полосы частот более 15 ГГц при достижении эффективного числа бит (ЭЧБ) около 8 [53 - 55]; имеются также сведения о новейших экспериментальных устройствах с еще более высокими характеристиками.

В таблице 7 приведены некоторые примеры практически достигнутых характеристик ФАЦП.

Таблица 7 – Примеры практически достигнутых характеристик ФАЦП [6]

Характеристики	**Тип системы**			
	Электронный АЦП с оптическим тактовым управлением	ФАЦП с оптической дискретизацией и электронным квантованием	ФАЦП с оптическим квантованием	АЦП с оптической предобработкой
Максимальная скорость и/или полоса преобразования (при ЭЧБ)	Полоса сигнала 40 ГГц (3,5 бит), 2003 г.	81 Гвыб/с в полосе 10 ГГц (2,1 бита), 2005 г.	40 Гвыб/с (3,45 бит для тона *2,5* ГГц), 2009 г.,	10 Твыб/с (4 бита), 2007 г.
Максимальная ЭЧБ (при скорости преобразования и/или полосе преобразования)	11,8 бит (1,003Гвыб/с), 2004 г.	8,0 и 7,4 для тонов 39,49 ГГц и 49,49 ГГц соотв., в полосе 1 ГГц, 2014 г.	Разрешение 7 бит (10 Гвыб/с, ?), 2013 г.	8,27 бит (в полосе 10 ГГц) 2012 г.

Для реализации РЛС с АФАР на основе элементной базы радиофотоники предлагается использовать аналого-цифровую преобразовательную систему с оптической предобработкой: «быстрые» АЦП на основе «медленных», предложенную в [6].

Результаты расчета

На основе доступных исходных данных [56, 57] для современной РЛС типа Воронеж-М метрового диапазона длин волн с помощью пакета MatLab был проведен сравнительный анализ основных тактико-технических характеристик, при реализации ее основных узлов на классической элементной базе и с учетом применения элементов радиофотоники.

Значительно увеличилась дальность обнаружения: для воздушных целей с ЭПР 10 м^2 при вероятности правильного обнаружения 0,95 и вероятности ложной тревоги 10^{-4} расчетная дальность обнаружения составила не менее 6700 км при той же потребляемой мощности за счет снижения суммарных потерь в тракте вплоть до 0,1 дБ. Также увеличились не менее чем в 1,5 раза дальности обнаружения малогабаритных и малозаметных целей.

Разрешающая способность по дальности резко увеличилась вплоть до единиц сантиметров за счет расширения полосы сигнала до 3 ГГц.

Применение ВОЛС вместо классических для станций типа Воронеж-М коаксиальных линий передачи приведет к снижению массы антенной системы не менее чем в 2 раза.

Заключение

В статье представлены результаты структурной проработки РЛС с АФАР со следующими ключевыми узлами на элементах радиофотоники: устройство формирование зондирующего сигнала, оптический приемопередающий модуль, оптический цифровой приемник и волоконные оптические линии связи.

Проведен выбор и обоснование конкретной элементной базы, формирующей систему и доступной в настоящее время на мировом рынке, в результате которого показана техническая возможность реализации РЛС с АФАР на элементах радиофотоники уже в настоящее время.

В результате проведенного расчета тактико-технических характеристик РЛС типа Воронеж-М на основе узлов радиофотоники показано резкое повышение разрешающей способности, увеличение дальности обнаружения, снижение массогабаритных характеристик изделия.

Список литературы

1. Лоскутов В. Ю., Чапурский В. В., Крючков И. В., Нефедов С.И., Нониашвили М.И. Анализ влияния конфигурации приемо-передающих позиций распределенной антенной системы со слабонаправленными антеннами на потенциальную точность измерения параметров цели // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 05. С. 68–78. DOI: 10.7463/rdopt.0515.0777801
2. Верба В.С., Меркулов В.И., Садовский П.А. Многодиапазонные радиолокационные системы. Проблемы многоцелевого сопровождения // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 5. С. 37-51. DOI: 10.7463/rdopt.0515.0817948
3. Зайцев Д.Ф. Нанофотоника и ее применение. М.: Фирма «АКТЕОН», 2012. 445 с.
4. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А., Тихонов Е.В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника. 2014. №1. С. 65-86.
5. Гамиловская А.В., Белоусов А.А., Тихонов Е.В., Дубровская А.А., Вольхин Ю.Н. Обзор и исследование возможных вариантов реализация сверхширокополосных аналоговых процессоров диапазона СВЧ с использованием методов и средств радиофотоники // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2015. № 5 (239). С. 4-11.
6. Стариков Р.С. Фотонные АЦП. // Успехи современной радиоэлектроники. Выпуск 2. М.: Радиотехника. 2015 г.
7. Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В. О возможности реализации сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ с положительными коэффициен-

тами передачи // XVIII координационный научно-технический семинар по СВЧ технике: материалы. Нижегородская область, п. Хахалы, 2013.

8. Малышев С.А., Чиж А.Л., Микитчук К.Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе // Электроника и микроэлектроника СВЧ: Всероссийская конференция. Пленарные доклады. 2015. С. 10-18. Режим доступа: http://www.mwelectronics.ru/2015/Papers/O00_01_Malyshev_Volokno-opticheskie_lazery.pdf (дата обращения 01.05 2016).
9. Малышев С.А., Чиж А.Л. Волоконно-оптические линии передачи СВЧ-сигналов для приемо-передающих систем космических аппаратов // Пятый Белорусский космический конгресс: материалы. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. Т. 1. С.192-197.
10. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier // Proceedings of 44th European Microwave Conference (EuMC). Rome, Italy. 6-9 October 2014. P. 679-683.
11. Chizh A., Malyshev S.,. Tepteev A, Andrievski V., Guszhinskaya E., Romanova L. Beam-lead partially-depleted-absorber photodiode // Proceedings of International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Noordwijk, The Netherlands. 2012. P. 1–4.
12. Малышев С.А., Чиж А.Л., Тептеев А.А., Шуленков А.С. Мощный InAlAs/InGaAs/InP СВЧ-фотодиод Шоттки // Третья Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»: материалы. Санкт-Петербург, Россия. 2014. С. 76-80.
13. Chizh A., Malyshev S., Jefremov S., Levitas B., Naidionova I. Impulse transmitting photonic antenna for ultra-wideband applications // Proceedings of 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON). Vilnius, Lithuania. 14–16 June 2010. P. 346-348.
14. Levitas B., Drozdov M., Naidionova I., Jefremov S., Malyshev S., Chizh A. UWB system for time-domain near-field antenna measurement // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. Nurnberg, Germany. 2013. P. 388-391.
15. Weiwen Zou, Hao Zhang, Xin Long, Siteng Zhang, Yuanjun Cui1, Jianping Chen All-optical bandwidth-tailorable radar // ResearchGate: сайт. 17 с. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/281227313 (дата обращения 01.05.2016).
16. PHODIR: Photonics-Based Fully Digital Radar System: сайт. Режим доступа http://www.phodir.eu/phodir/pubs.php (дата обращения 01.05.2016).
17. Ticonderoga Class AEGIS Cruisers // Naval-technology: сайт. Режим доступа http://www.naval-technology.com/projects/ticonderoga/ (дата обращения 01.05.2016).
18. Riza N. A. Photonic Information Processing System (PIPS) Lab. // Photonic Signal Processing for Antennas. DARPA AOSP Study Group. 2000.
19. Митяшев М.Б. К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2 С. 178-190.

20. Белоусов А.А., Дубровская А.А. Применение методов и средств радиофотоники в системах связи, РЛС и системах РЭБ и РЭП // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 1. С. 181-184.
21. Аглиуллин Т.А., Морозов О.Г. Фазированная антенная решетка с фотонным диаграммообразованием // Международная молодежная научная конференция «XXII туполевские чтения (школа молодых ученых)»: сборник докладов. РФФИ, КНИТУ-КАИ. 2015. С. 486-491.
22. Lee J. J., Loo R. Y., Livingston S., Lewis J. B., Yen Huan-Wun, Tangonan G.L., Wechsberg M. Photonic Wideband Array Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1995. V. 43. Iss. 9. P. 966 - 982. DOI: 10.1109/8.410214
23. Lee J. J. RF Photonics for Beamforming and Array Applications // Presentation on Optics Microwave Interactions. 2002. EN-028-04. P. 4.1–4.31.
24. Goutzoulis A., Davies K., Zomp J., Hrycak P., Johnson A. Developmentand field demonstration of a hardware - compressive fiber - optic true-time-delay steering system for phased-array antennas // Selected Papers on Photonic Control Systems for Phased-Array Antennas. Florida, USA: CREOL & Dept, 1997. P. 593–600.
25. Pan Shilong, Zhu Dan, Zhang Fangzheng Microwave Photonics for Modern Radar Systems // Transactions of Nanjing of Aeronautics and Astronautics. 2014. Vol. 3. P. 219-240
26. PHODIR: Photonics-Based Fully Digital Radar System // CORDIS: Community Research and Development Information Service: сайт. Режим доступа: http://cordis.europa.eu/project/rcn/92836_en.html (дата обращения 01.05.2016).
27. Преимущества использования ВОЛС // В1 электроникс. Системы передачи сигналов: сайт. Режим доступа: http://www.v1electronics.ru/img/articles/vols/06.gif php (дата обращения 01.05.2016).
28. Savchenkov A., Ilchenko V. S., Byrd J., Liang W., Eliyahu D., Matsko A. B., Seidel M.L. Whispering-gallery mode based optoelectronic oscillators. Newport Beach, CA. J. Mod. Opt., 2003. vol.50. P.2523-2542.
29. Compact Opto-Electronic Oscillator (OEO). Low Phase Noise Microwave Signal Source Module // Oewave: сайт. Режим доступа: http://www.oewaves.com/compact-oeo-sp-1149514981 (дата обращения 01.05.2016).
30. Advanced Opto-Electronic Oscillator (OEO). Ultra-Low Phase Noise Microwave Signal Source Module. // Oewaves: сайт. Режим доступа: http://www.oewaves.com/advanced-oeo-sp-1171610647 (дата обращения 01.05.2016).
31. Kossakovski D., Solomatine I., Morozov N., Ilchenko V. Multi-wavelength optical source at 12.5 GHz optical spacing based on a coupled optoelectronic oscillator with a whispering gallery mode resonator // Proceedings of SPIE. Laser Resonators and Beam Control VII. 2004. Vol. 5333. P. 167–173. DOI:10.1117/12.537910

32. Del'Haye P., Herr T., Gavartin E., Gorodetsky M.L., Holzwarth R., Kippenberg T.J. Octave Spanning Tunable Frequency Comb from a Microresonator // Physical Review Letters. 2011. vol. 107.
33. Del`Haye P., Arcizet O., Schliesser A., Holzwarth R., Kippenberg T.J. Full Stabilization of a Microresonator based Optical Frequency Comb // Physical Review Letters. 2008. vol. 101.
34. Agha I.H., Okawachi Y., Gaeta A.L. Theoretical and experimental investigation of broad-band cascaded four-wave mixing in high-Q microspheres // Optics Express. 2009. vol. 17. no. 18. P.16209-16215.
35. Savchenkov A., Matsko A.B., Ilchenko V S., Solomatine I., Seidel D., Maleki L. Tunable Optical Frequency Comb with a Crystalline Whispering Gallery Mode Resonator // Physical Review Letters. 2008. vol. 101. no. 9.
36. Herr T., Hartinger K., Riemensberger J., Wang C.Y., Gavartin E., Holzwarth R., Gorodetsky M. L., Kippenberg T.J. Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators // Nature Photonics. 2012. vol. 6. P. 480-487.
37. Kippenberg T. J., Holzwarth R., Diddams S.A. Microresonator-Based Optical Frequency Combs // Science. 2011. vol. 332. no. 6029. pp. 555-559.
38. Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Maleki L. Nonlinear optics and crystalline whispering gallery mode cavities // Physical Review Letters. 2004. vol. 92.
39. Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L. Monolithic and multi-gigahertz mode-locked semi-conductor lasers: constructions, experiments, models and applications // IEE Proceedings-Optoelectronics. 2000. vol.147. no.4. P.251-278.
40. Hou L., Haji M., Marsh J.H. Monolithic Mode-Locked Laser With an Integrated Optical Amplifier for Low-Noise and High-Power Operation // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. 2013. vol.19. no.4. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2238508
41. Каталог // Специальные Системы. Фотоника: сайт. Режим доступа: http://sphotonics.ru/catalog/ (дата обращения 01.05.16).
42. Передающие оптические модули // ДИЛАЗ: сайт. Режим доступа: http://www.dilas.ru/pom/ (дата обращения 01.05.16).
43. MXAN-LN series. 1550 nm band Analog Intensity Modulator / Photline Technologies: сайт. Режим доступа: http://www.qubig.com/datasheets/photline/MXAN-LN-series.pdf (дата обращения 01.05.16).
44. MXDO-LN-20. 1550 nm band Analog Dual Outputs Modulator Preliminary data-sheet / Photline Technologies: сайт. Режим доступа: http://www.symphotony.com/wp-content/uploads/MXDO-LN-20.pdf (дата обращения 01.05.16).
45. Thorelabs inc.: сайт. Режим доступа: http://www.thorlabs.de/navigation (дата обращения 01.05.16).
46. Электрооптические модуляторы // Специальные Системы: фотоника. Режим доступа: http://sphotonics.ru/catalog/eo-modulator/ (дата обращения 01.05.16).

47. Abies J. H. Resonant enhanced modulator development // R-FLICS Program Review Presentation., Sarnoff Co. 2001. Aug., P.1-31.
48. Cox C., Ackerman E. Steps to the Photonic Antenna // Analog Optical Signal Processing (AOSP) Study Group (DARPA/MTO). December 6, 2000. p. 1-30.
49. Nolatech: сайт. Режим доступа: http://nolatech.ru/ (дата обращения 01.05.16).
50. The New IEEE-Std-1241-2010 for Analog-to-Digital Converters Steven J. Tilden, Solomon M. Max. 2011 International Workshop on ADC Modelling // Testing and Data Converter Analysis and Design and IEEE 2011 ADC Forum, 2011. Orvieto, Italy
51. Valley G.C. Photonic analog-to-digital converters // Optics Express. Vol.15. Iss. 5. P.1955-1982. DOI: 10.1364/OE.15.001955
52. Khilo A., Spector S.J., Grein M.E., Nejadmalayeri A.H., Holzwarth C.W, Sander M.Y., Dahlem M.S., Peng M.Y., Geis M.W., DiLello N.A., Yoon J.U., Motamedi A., Orcutt J.S., Wang J.P., Sorace-Agaskar Ch.M., Popovic M.A., Sun J., Zhou G.-R., Byun H., Chen J., Hoyt J.L., Smith H.I., Ram R.J., Perrott M., Lyszczarz T.M., Ippen E.P., Kärtner F.X. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter // Optics Express. 2012. Vol. 20. Iss. 4. P.4454-4469. DOI: 10.1364/OE.20.004454
53. Greshishchev Y., Aguirre J., Besson M., Gibbins R., Fait C., Flemke P., Ben-Hamida N., Pollex D., Schvan P., Wang S. A 40 GS/s6b ADC in 65 nm CMOS // International Solid State Circuits Conference (ISSCC). 2010 paper 21.7.
54. Chu M., Jacob P., Kim J., LeRoy M., Kraft R., McDonald J. A 40 GS/s time interleaved ADC using SiGe BiCMOS technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2010. V. 45. P. 380-390.
55. Valley G., Hurrell J., Sefler G. Photonic analog-to-digital converters: fundamental and practical limits // Proc. SPIE. 2004. V. 5618. P. 96-106.
56. РЛС Воронеж-М/ДМ // Военные новости: сайт. Режим доступа: http://dokwar.ru/publ/vooruzhenie/pvo_i_rvsn/rls_voronezh_m_dm/16-1-0-628 (дата обращения 01.05.16).
57. На опытно-боевое дежурство заступит очередная РЛС "Воронеж-ДМ" // Оружие России: сайт. Режим доступа: http://www.arms-expo.ru/news/armed_forces/na_opytno_boevoe_dezhurstvo_zastupit_ocherednaya_rls_voronezh_dm/ (дата обращения 01.05.16).

Science & Education of the Bauman MSTU Electronic journal ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 05, pp. 41–65.

DOI: **10.7463/0516.0840246**

Received: 15.04.2016
Revised: 29.04.2016

The Concept of Building a Radar Station Based on the Microwave Photonics Components

A.V. Shumov[1,*], **S.I. Nefedov**[1], **A.R. Bikmetov**[1]

*shum_ov@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: microwave photonics, radar station, active phased array antenna, photonic analog-to-digital converter, ultra-wideband signal

The microwave photonics is one of the most promising directions in modern radar engineering. Application of microwave photonics components provides a significant improvement in certain characteristics of radar:

- dramatically improving informational content and resolution range of radar;
- increasing range of target detection;
- high noise immunity;
- performance stability under changing climate, primarily, temperature conditions;
- lessened weight and size parameters of antenna systems;
- lessened cost.

The article reviews and analyses modern domestic and foreign publications concerning the application of microwave photonics components in radar engineering.

There is a lack of the deep-laid circuit solution of radar based on the active phased array antenna (APAA) realizing all the major advantages of using microwave photonics components despite the fairly large number of articles concerned with hardware components of microwave photonics, circuit design, and creating the separate units of radio-photon radar.

The article presents the elaboration results of a radar station (RS) structure based on the components of microwave photonics, shows the selection and justifies the specific technical solutions for all the key units making the system as a whole: a device to form a sound signal, an optical transceiver unit, an optical digital receiver, and the fiber optic lines.

The paper makes selection and justification of the specific hardware components (both domestic and foreign) currently available at the world market to create the system thereby showing that now in engineering point of view it is already possible to implement a radar based on the components of microwave photonics.

The calculation of tactical and technical characteristics of radar type "Voronezh-M" using microwave photonics components has shown a dramatically increased resolution and detection range, as well as, at least, 2 times reduced weight and size parameters of the product.

References

1. Loskutov1 V.Yu., Chapurskiy1 V.V., Kryuchkov1 I.V., Nefedov1 S.I., Noniashvili M.I. Influence of Transceiver Positions Configuration of MIMO Radar System with Wide Beam Antennas on Potential Measurement Accuracy. *Radiooptika. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn.= Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2015, no. 05, pp. 68–78. (in Russian). DOI: 10.7463/rdopt.0515.0777801
2. Verba V. S., Merkulov V. I., Sadovskiy P. A. Multiband radars. Multitarget tracking challenges. *Radiooptika. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn.= Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2015, no. 05, pp. 37–51. (in Russian). DOI: 10.7463/rdopt.0515.0817948
3. Zaitsev D.F. *Nanofotonika i ee primenenie* [Nanophotonics and its application]. Moscow, Firma «AKTEON», 2012. 445 p. (in Russian).
4. Belousov A.A., Volkhin Iu.N. Gamilovskaia A.V., Dubrovskaia A.A., Tikhonov E.V. Radiophotonical methods and tools used for microwave analog and digital signal processing. *Prikladnaya fotonika = Applied photonics*, 2014, No.1, pp. 65-86. (in Russian).
5. Gamilovskaya A.V., Belousov A. A., Tikhonov E. V., Dubrovskaya A. A. Volkhi Yu. N. Overview And The Study Of Possible Methods Of Ultra-Wideband Microwave Analog Processors Implementation Using Radio-Photonic Techniques *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory= Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices.* 2015, Iss.5 (239), pp.4-11. (in Russian).
6. Starikov R.S. *Fotonnye ATsP* [Photonic ADC] *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. Vypusk 2.* [Successes of modern radio electronics. Issue 2]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. (in Russian).
7. Vol'khin Yu. N., Gamilovskaya A. V. *O vozmozhnosti realizatsii sverkhshirokopolosnykh analogovykh radiofotonnykh traktov diapazona SVCh s polozhitel'nymi koeffitsientami peredachi* [The possibility of realizing ultra-wideband analog circuits radiophonic range microwave with positive coefficients of transmission]. *XVIII koordinatsionnyi nauchno-tekhnicheskii seminar po SVCh tekhnike* [XVIII of the coordination scientific-technical seminar on microwave technique]. Khakhaly, 2013 (in Russian).
8. Malyshev S.A., Chizh A.L., Mikitchuk K.B. *Volokonno-opticheskie lazernye i fotodiodnye moduli SVCh-diapazona i sistemy radiofotoniki na ikh osnove* [Fiber-optic laser and photodiode modules, microwave range and system of radio photons based on them]. *Elektronika i mikroelektronika SVCh: Vserossiiskaya konferentsiya. Plenarnye doklady* [Electronics and microelectronics microwave: all-Russian conference. Plenary reports]. 2015. pp.10. Available at: http://www.mwelectronics.ru/2015/Papers/O00_01_Malyshev_Volokno-opticheskie_lazery.pdf, accessed 01.05.2016. (in Russian).

9. Malyshev C.A., Chizh A.L. *Volokonno-opticheskie linii peredachi SVCh-signalov dlya priemo-peredayushchikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Fiber-optic transmission of microwave signals for transmitter-receiver systems of space vehicles]. *Pyatyi Belorusskii kosmicheskii kongress: materialy* [Fifth Belarusian space Congress: proceedings]. Minsk, OIPI NAN Belarusi, 2011, Vol.1, pp. 192-197. (in Russian).
10. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier. *Proceedings of 44th European Microwave Conference (EuMC)*. Rome, Italy. 6-9 October 2014. pp. 679-683.
11. Chizh A., Malyshev S.,. Tepteev A, Andrievski V., Guszhinskaya E., Romanova L. Beam-lead partially-depleted-absorber photodiode. *Proceedings of International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Noordwijk, The Netherlands. 2012. pp. 1–4.
12. Malyshev S.A., Chizh A.L., Tepteev A.A., Shulenkov A.S. *Moshchnyi InAlAs/InGaAs/InP SVCh-fotodiod Shottki* [High-power microwave photodiode Schottky] *Tret'ya Vserossiiskaya konferentsiya «Elektronika i mikroelektronika SVCh»: materialy* [The third all-Russian conference "electronics and microelectronics microwave: materials]. Sankt-Peterburg, Russia, 2014. pp. 76-80. (in Russian).
13. Chizh A., Malyshev S., Jefremov S., Levitas B., Naidionova I. Impulse transmitting photonic antenna for ultra-wideband applications. *Proceedings of 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*. Vilnius, Lithuania. 14–16 June 2010. pp. 346-348.
14. Levitas B., Drozdov M., Naidionova I., Jefremov S., Malyshev S., Chizh A. UWB system for time-domain near-field antenna measurement. *Proceedings of the 43rd European Microwave Conference*. Nurnberg, Germany. 2013. pp. 388-391.
15. Weiwen Zou, Hao Zhang, Xin Long, Siteng Zhang, Yuanjun Cui1, Jianping Chen All-optical bandwidth-tailorable radar. *ResearchGate*: website. 17 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281227313, accessed 01.05.2016.
16. PHODIR: Photonics-Based Fully Digital Radar System: website. Available at: http://www.phodir.eu/phodir/pubs.php, accessed 01.05.2016.
17. Ticonderoga Class AEGIS Cruisers. *Naval-technology: website*. Available at: http://www.naval-technology.com/projects/ticonderoga/, accessed 01.05.2016.
18. Riza N. A. Photonic Information Processing System (PIPS) Lab. *Photonic Signal Processing for Antennas*. DARPA AOSP Study Group. 2000.
19. Mityashev M.B. On the implementation of radio photonic technologies in APAA of radar systems *Vestnik SibGUTI = The Herald of SibSUTIS*, 2015, no.2, pp.178-190. (in Russian).
20. Belousov A.A., Dubrovskaya A.A. The use of methods and means of radio photons in communication systems, radar and electronic warfare systems and REP. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost' = Young Russia: advanced technologies in the industry*. 2013. No. 1. pp. 181-184. (in Russian).

21. Agliullin T.A., Morozov O.G. *Fazirovannaya antennaya reshetka s fotonnym diagrammoobrazovaniem* [Phased antenna array with photonic diagrammatical]. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «XXII tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh)»: sbornik dokladov* [International youth scientific conference "XXII Tupolev reading (school of young scientists)": collection of papers]. RFFI, KNITU-KAI. 2015. pp. 486-491. (in Russian).
22. Lee J. J., Loo R. Y., Livingston S., Lewis J. B., Yen Huan-Wun, Tangonan G.L., Wechsberg M. Photonic Wideband Array Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995. V. 43, Iss. 9, pp. 966 - 982. DOI: 10.1109/8.410214
23. Lee J.J. RF Photonics for Beamforming and Array Applications. *Presentation on Optics Microwave Interactions*. 2002. EN-028-04. pp. 4.1–4.31.
24. Goutzoulis A., Davies K., Zomp J., Hrycak P., Johnson A. Developmentand field demonstration of a hardware - compressive fiber - optic true-time-delay steering system for phased-array antennas. *Selected Papers on Photonic Control Systems for Phased-Array Antennas*. Florida, USA: CREOL & Dept, 1997. pp. 593–600.
25. Pan Shilong, Zhu Dan, Zhang Fangzheng Microwave Photonics for Modern Radar Systems. *Transactions of Nanjing of Aeronautics and Astronautics*. 2014. Vol. 3. pp. 219-240.
26. PHODIR: Photonics-Based Fully Digital Radar System. *CORDIS: Community Research and Development Information Service: website.* Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/92836_en.html, accessed 01.05.2016.
27. *Preimushchestva ispol'zovaniya VOLS* [The benefits of using VOLS]. *V1 elektroniks. Sistemy peredachi signalov: sait* [B1 electronics. System of signal transmission: website]. Available at: http://www.v1electronics.ru/img/articles/vols/06.gif php, accessed 01.05.2016. (in Russian).
28. Savchenkov A., Ilchenko V. S., Byrd J., Liang W., Eliyahu D., Matsko A. B., Seidel M.L. Whispering-gallery mode based optoelectronic oscillators. Newport Beach, CA, J. Mod. Opt., 2003, vol.50, pp.2523-2542.
29. Compact Opto-Electronic Oscillator (OEO). Low Phase Noise Microwave Signal Source Module. *Oewave: website*. Available at: http://www.oewaves.com/compact-oeo-sp-1149514981, accessed 01.05.2016.
30. Advanced Opto-Electronic Oscillator (OEO). Ultra-Low Phase Noise Microwave Signal Source Module. *Oewaves: website*. Available at: http://www.oewaves.com/advanced-oeo-sp-1171610647, accessed 01.05.2016.
31. Kossakovski D., Solomatine I., Morozov N., Ilchenko V. Multi-wavelength optical source at 12.5 GHz optical spacing based on a coupled optoelectronic oscillator with a whispering gallery mode resonator/ *Proceedings of SPIE. Laser Resonators and Beam Control VII*. 2004. Vol. 5333. P. 167–173. DOI:10.1117/12.537910

32. Del'Haye P., Herr T., Gavartin E., Gorodetsky M.L., Holzwarth R., Kippenberg T.J. Octave Spanning Tunable Frequency Comb from a Microresonator. *Physical Review Letters*. 2011. vol. 107.
33. Del`Haye P., Arcizet O., Schliesser A., Holzwarth R., Kippenberg T.J. Full Stabilization of a Microresonator based Optical Frequency Comb. *Physical Review Letters*. 2008. vol. 101.
34. Agha I.H., Okawachi Y., Gaeta A.L. Theoretical and experimental investigation of broadband cascaded four-wave mixing in high-Q microspheres. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 18, pp.16209-16215.
35. Savchenkov A., Matsko A.B., Ilchenko V S., Solomatine I., Seidel D., Maleki L. Tunable Optical Frequency Comb with a Crystalline Whispering Gallery Mode Resonator. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101, no. 9.
36. Herr T., Hartinger K., Riemensberger J., Wang C.Y., Gavartin E., Holzwarth R., Gorodetsky M. L., Kippenberg T.J. Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators. *Nature Photonics*, 2012, vol. 6, pp. 480-487.
37. Kippenberg T. J., Holzwarth R., Diddams S.A. Microresonator-Based Optical Frequency Combs. *Science*, 2011, vol. 332, no. 6029, pp. 555-559.
38. Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Maleki L. Nonlinear optics and crystalline whispering gallery mode cavities. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 92.
39. Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L. Monolithic and multi-gigahertz mode-locked semiconductor lasers: constructions, experiments, models and applications. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2000, vol.147, no.4, pp.251-278.
40. Hou L., Haji M., Marsh J.H. Monolithic Mode-Locked Laser With an Integrated Optical Amplifier for Low-Noise and High-Power Operation. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, vol.19, no.4. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2238508
41. *Katalog* [Catalog]. *Spetsial'nye Sistemy. Fotonika: сайт* [The Special System. Photonics: website]. Available at: http://sphotonics.ru/catalog/, accessed 01.05.16.
42. Peredayushchie opticheskie moduli [Transmitting optical modules]. *DILAZ*: sait [DILAZ: website]. Available at: http://www.dilas.ru/pom/, accessed 01.05.16.
43. MXAN-LN series. 1550 nm band Analog Intensity Modulator. *Photline Technologies: website.* Available at: http://www.qubig.com/datasheets/photline/MXAN-LN-series.pdf, accessed 01.05.16.
44. MXDO-LN-20. 1550 nm band Analog Dual Outputs Modulator Preliminary data-sheet. *Photline Technologies: website*. Available at: http://www.symphotony.com/wp-content/uploads/MXDO-LN-20.pdf, accessed 01.05.2016.
45. Thorelabs inc.: website. Available at: http://www.thorlabs.de/navigation accessed 01.05.2016.
46. *Elektroopticheskie modulyatory* [Electro-optic modulators]. *Spetsial'nye Sistemy: fotonika: sait* [Special Systems: Photonics: website]. Available at: http://sphotonics.ru/catalog/eo-modulator/, accessed 01.05.2016 (in Russian).

47. Abies J. H. Resonant enhanced modulator development. *R-FLICS Program Review Presentation*, Sarnoff Co, 2001, Aug., pp.1-31.
48. Cox C., Ackerman E. Steps to the Photonic Antenna*.* *Analog Optical Signal Processing (AOSP) Study Group (DARPA/MTO)*. December 6, 2000. pp. 1-30.
49. Nolatech: website. Available at: http://nolatech.ru/, accessed 01.05.16. (in Russian).
50. The New IEEE-Std-1241-2010 for Analog-to-Digital Converters Steven J. Tilden, Solomon M. Max. 2011 International Workshop on ADC Modelling. *Testing and Data Converter Analysis and Design and IEEE 2011 ADC Forum*, 2011. Orvieto, Italy.
51. Valley G.C. Photonic analog-to-digital converters. *Optics Express*, Vol.15, Iss. 5, pp.1955-1982. DOI: 10.1364/OE.15.001955
52. Khilo A., Spector S.J., Grein M.E., Nejadmalayeri A.H., Holzwarth C.W, Sander M.Y., Dahlem M.S., Peng M.Y., Geis M.W., DiLello N.A., Yoon J.U., Motamedi A., Orcutt J.S., Wang J.P., Sorace-Agaskar Ch.M., Popovic M.A., Sun J., Zhou G.-R., Byun H., Chen J., Hoyt J.L., Smith H.I., Ram R.J., Perrott M., Lyszczarz T.M., Ippen E.P., Kärtner F.X. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter. *Optics Express*. 2012. Vol. 20. Iss. 4. pp.4454-4469. DOI: 10.1364/OE.20.004454
53. Greshishchev Y., Aguirre J., Besson M., Gibbins R., Fait C., Flemke P., Ben-Hamida N., Pollex D., Schvan P., Wang S. A 40 GS/s6b ADC in 65 nm CMOS. *International Solid State Circuits Conference (ISSCC)*. 2010 paper 21.7.
54. Chu M., Jacob P., Kim J., LeRoy M., Kraft R., McDonald J. A 40 GS/s time interleaved ADC using SiGe BiCMOS technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, V. 45, pp. 380-390.
55. Valley G., Hurrell J., Sefler G. Photonic analog-to-digital converters: fundamental and practical limits. *Proc. SPIE*, 2004, V. 5618, pp. 96-106.
56. *RLS* Voronezh-*M/DM* [RLS Voronezh-M/DM]. *Voennye novosti: sait* [Military news: website] Available at: http://dokwar.ru/publ/vooruzhenie/pvo_i_rvsn/rls_voronezh_m_dm/16-1-0-628, accessed 01.05.16.
57. *Na opytno-boevoe dezhurstvo zastupit ocherednaya RLS "Voronezh-DM"* [On experimental combat duty to intercede another radar "Voronezh-DM"] *Oruzhie Rossii: sait* [Russian Weapons: website]. Available at: http://www.arms-expo.ru/news/armed_forces/na_opytno_boevoe_dezhurstvo_zastupit_ocherednaya_rls_voronezh_dm/, accessed 01.05.16.