

Радиолокационные системы

УДК 621.396.96; 621.383

Дорожная карта радиофотоники.

Становление и перспективы развития

© Авторы, 2016

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

Н.А. Голов – зам. начальника отдела, МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: golov@bmstu.ru

С.Ф. Боев – д.т.н., д.э.н., профессор, ген. директор ОАО «РТИ» (Москва)

В.П. Савченко – д.т.н., профессор, зам. исполнительного директора ОАО «РТИ» (Москва)

E-mail: Vsavchenko@oaorti.ru

В.А. Усачев – к.т.н., начальник отдела, МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: usachev_va@mail.ru

Ю.Б. Зубарев – д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН, советник, ЗАО «МНИТИ» (Москва)

E-mail: osa@mnniti.ru

А.Н. Шулунов – руководитель направления, ОАО «РТИ» (Москва)

E-mail: A.Shulunov@oaorti.ru

Рассмотрены особенности применения, преимущества и характеристики элементов волоконной и интегральной оптики и оптоэлектронники для применения в сверхширокополосных радиолокаторах. Показана принципиальная возможность достижения в РЛС на основе сверхширокополосных ФАР и АФАР существенно более высоких технических характеристик путем применения элементов радиофотоники.

Ключевые слова: дорожная карта, интегральная оптика, радиофотоника, СВЧ-фотоника, сверхширокополосная радиолокация.

Reviewed the features of the application, advantages and features elements of fiber optics, optoelectronics and integrated optics for use in ultra-wideband radars. Determined the principal possibility of achieving the ultra-wideband radar based on PAR and AESA significantly higher specifications by applying microwave photonic elements.

Keywords: roadmap, integrated optics, radiophotonics, microwave photonics, ultrawideband radar.

Первые идеи о применении технологий оптоэлектронники в радиолокации были высказаны еще в 1978 г. [1]. Тем не менее, первые практические работы, заложившие основы технологий радиофотоники, начались с конца 1980-х годов, когда оптоволоконные технологии достигли технической зрелости и появились первые предложения по их практическому применению в радиолокационных станциях для построения систем управления и распределения сигнала.

Цель работы – рассмотреть особенности применения, преимущества и характеристики элементов волоконной и интегральной оптики и оптоэлектронники для применения в сверхширокополосных радиолокаторах, а также определить перспективные пути развития радиофотоники.

На начальном этапе вопросы как создания отдельных фотонных узлов, так и реализации систем управления лучом в АФАР с помощью оптоэлектронных устройств рассматривались в ряде работ по заказу DARPA и исследовательской лаборатории BBC США [2]. DARPA также финансировала ряд программ в поддержку отдельных направлений радиофотоники [3]. Программы «Ультраширокополосные многофункциональные фотонные приемо-передающие модули» (The Ultra-Wideband Multifunction Photonic Transmit/Receive Module (ULTRA-T/R)) и «Фотонный одновременный прием и передача» (Photonic Simultaneous Transmit and Receive (P-STAR)) были направлены на улучшение параметров электрооптических модуляторов для обеспечения хорошей связности СВЧ-сигналов, распределяемых по апертуре антенны Х-диапазона. Другая программа «Оптимизированная фотонная элементная база для приемников и передатчиков» (The Transmit and Receive Optimized Photonics (TROPHY) program) сфокусирована-

лась на улучшении характеристик модуляторов на основе ниобата лития и фотодиодов высокой мощности для повышения уровня мощности СВЧ-сигнала, передаваемого по оптоволокну. Программа «Технологии линейной фотоники для оконечных высокочастотных каскадов» (The Linear Photonic RF Front-End Technology (PHOR-FRONT) program) была направлена в поддержку реализации оптической системы фазовой автоматической подстройки частоты как средства повышения линейности радиофотонных каналов и исследования оптического преобразования с понижением частоты. Следующая программа «Реконфигурируемый процессор для аналоговой фотонной обработки сигнала» (The Photonic Analog Signal Processing Engines with Reconfigurability (PhASER)) была посвящена вопросам обработки СВЧ-сигнала в оптической области с использованием реконфигурируемых оптических фильтров и линий задержки для улучшения динамического диапазона радиофотонной линии.

DARPA совместно с командованием морской авиации проводилась программа «Фотонная сеть с поддержкой уплотнения и разделением сигналов по длине волны» (The Network Enabled by WDM Highly Integrated Photonics (NEW-HIP)) для реализации сети бортовых коммуникаций в истребителе F-35, в ходе которой были исследованы малошумящие лазерные фотодиоды и мощные фотодетекторы.

Реализация как упомянутых программ DARPA, так и других исследований обусловили планомерное и поэтапное развитие направлений радиофотоники за рубежом. Несмотря на широкий фронт проводимых работ, можно выделить два заложенных этапа.

Первый этап приходился на конец 1980-х – начало 1990-х годов и заключался в концептуальной проработке систем оптоэлектронной разводки сигналов, систем управления с применением элементов оптоэлектроники в антенных решетках и реализации их отдельных узлов.

Было предложено применение оптических элементов для реализации систем управления и распределения сигнала [4], оптоэлектронной системы управления фазированной антенной решеткой (ФАР) [5], а в 1990 г. была опубликована статья [6], в которой рассматривались различные аспекты применения оптоэлектронных технологий в антенных решетках и сформулированы ключевые преимущества оптоэлектронных технологий применительно к существовавшему уровню техники. В качестве преимуществ отмечались: широкополосность системы, возможность улучшения массогабаритных показателей радиолокационных средств, стабильность характеристик, низкие потери в оптоволокне и устойчивость к действию электромагнитного излучения. В 1992 г. в работе [7] была предложена система оптоволоконного распределения сигналов управления и контроля в активной фазированной антенной решетке (АФАР) С-диапазона, концептуальная схема которой представлена на рис. 1, а в 1995 г. была опубликована статья [8], посвященная реализации оптоэлектронной системы управления широкополосной антенной решеткой.

Параллельно с работами за рубежом исследования в области создания оптических систем разводки сигналов по полотну антенных решеток развивались и в нашей стране. Под руководством Л.Д. Бахраха с 1986 г. проводились работы, посвященные реализации оптоволоконной разводки в АФАР [9–12], а, например, в [13] предлагалась схема многолучевой антенной решетки с волоконно-оптической диаграммообразующей схемой (рис. 2).

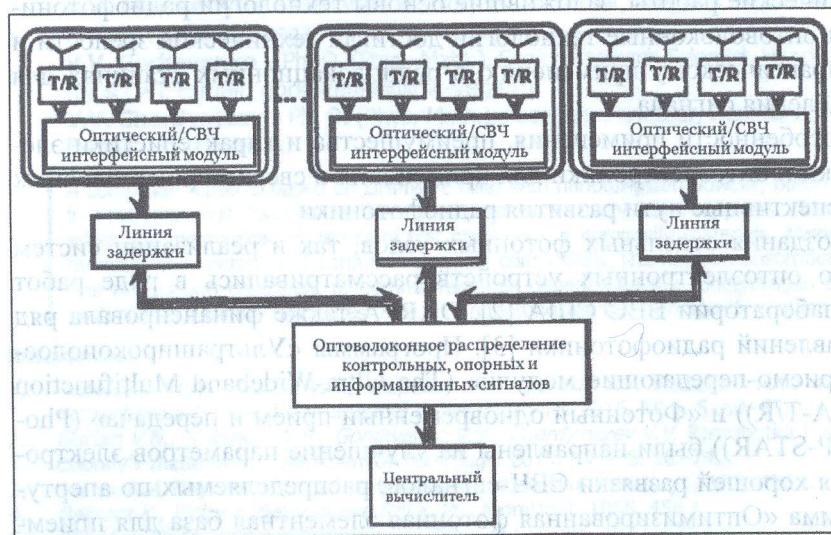


Рис. 1. Схема системы оптической разводки сигналов в АФАР

Братчиковым А.Н. и соавторами с 1989 г. опубликован ряд работ [14–17], в которых рассматриваются вопросы распределения и обработки сигналов в антенных решетках с помощью волоконно-оптических каналов. К 1992 г. были получены авторские свидетельства на волоконно-оптические линии передачи СВЧ-сигнала (рис. 3) [18, 19], включающие сумматор 1, лазер 2, оптический направленный ответвитель 3, оптическое волокно 4, фотодетектор 5, оптический усилитель 6, дополнительный фотодетектор 7 и оптическую неоднородность 8.

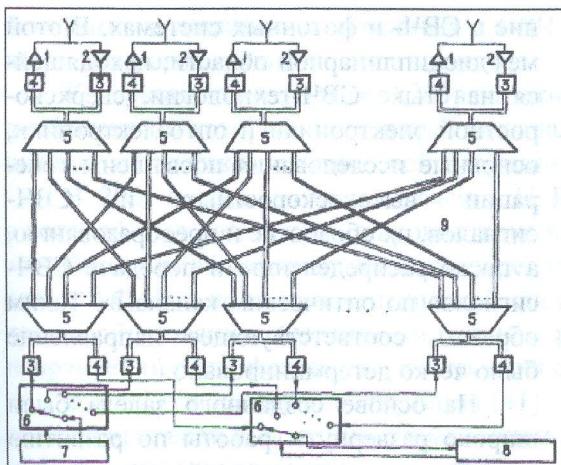


Рис. 2. Схема многолучевой антенной решетки [13]: 1 – усилитель мощности СВЧ; 2 – малошумящий усилитель; 3 – оптический передатчик с СВЧ-модуляцией; 4 – СВЧ-фотоприемник; 5 – оптический делитель/сумматор; 6 – переключатель СВЧ; 7 – блок формирования сигнала и управления в режиме передачи; 8 – блок обработки управляемого сигнала и управления в режиме приема; 9 – волоконно-оптическая диаграммообразующая схема

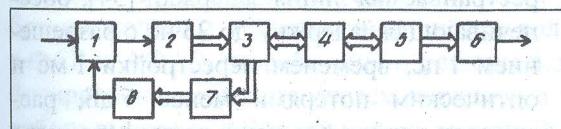


Рис. 3. Схема волоконно-оптической линии передачи оптического сигнала

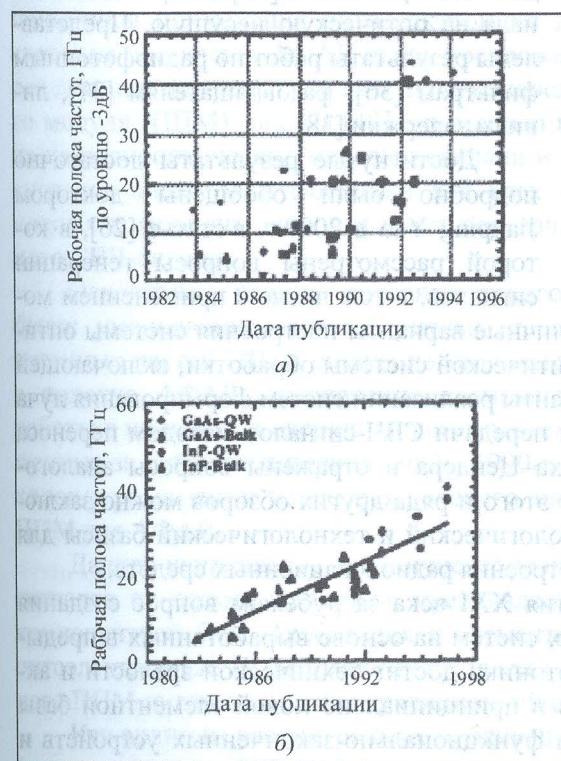


Рис. 4. Эволюция характеристик модуляторов (а) и лазеров (б) для радиофотоники

Второй этап развития радиофотоники, пришедшийся на период с начала 1990-х и приблизительно до 2000 г., характеризовался концентрацией усилий на совершенствовании элементной базы радиофотоники. За рубежом разрабатывались оптоуправляемые фильтры [20], были представлены фазовращатели в диапазоне от 2 ГГц до 18 ГГц с дискретом $7^\circ \dots 10^\circ$ [21], представлены оптические линии задержки с величиной времени задержки 31 нс [22], расширялся частотный диапазон оптических модуляторов и лазеров (рис. 4) [23].

Благодаря низким потерям в оптоволоконном канале передачи одним из очевидных вариантов применения оптоэлектронных технологий является реализация системы удаленного управления антенной в радиолокаторе. В 1998 г. были сообщения о результатах внедрения оптоволоконного канала в корабельный радиолокатор AN/SPQ-9B (рис. 5) [24], в котором сигнал от задающего генератора на оконечные каскады передатчика и от малошумящего усилителя (МШУ) на приемник передавался по оптоволоконному каналу.

В отечественной печати в этот период рассматривались вопросы генерации радиосигналов в системах на основе лазеров и оптической линии задержки [25–27], в частности, в [26] предложена схема формирователя частотно-модулированных сигналов (рис. 6), включающего сумматор напряжений 9, управляемый генератор 10, синхронизатор 11, блоки памяти 12 и 13, счетчик 14. Достижение требуемых характеристик обеспечивается введением прецизионного функционального преобразователя 1, содержащего усилитель 2, приемник 3 и источник 4 светового излучения, световоды 5, 7 и дефлектор 6, а также генератора 8 интерполирующего напряжения.

События начала 1990-х годов значительно замедлили развитие в России радиофотоники, как и большинства перспективных научных направлений. Было опубликовано несколько работ [28–31], в частности, патент [31] с заявкой от 1997 г., описывающий устройство для стабилизации фазы передаваемого по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) высокочастотного аналогового сигнала, обеспечивающего большую дальность передачи высокочастотного сигнала со стабильной фазой по ВОЛС и высокое отношение сигнал/шум на выходе. Однако до начала XXI века в России работы по данной проблематике широко не публиковались.

Фактически, к 2000 г. была создана концептуальная основа, а за рубежом еще и сформирована основная элементная база радиофотоники. В [32] (D. Jäger и A. Stöhr) было сформулировано определение радиофотоники (microwave photonics): «СВЧ-фотоника может быть главным образом определена как область, изучающая высокоскоростные фотонные устройства, работающие на СВЧ и в миллиметровом диапазоне длин волн, и их использова-

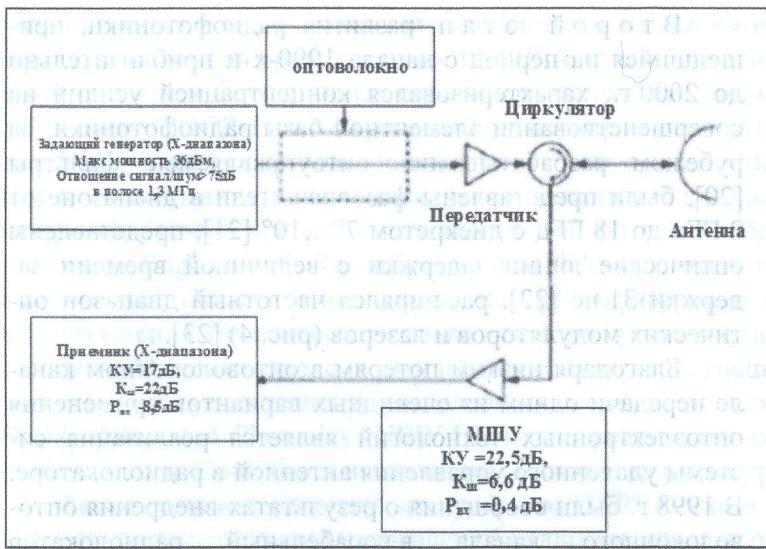


Рис. 5. Схема передачи сигнала от задающего генератора к передатчику и от МШУ к приемнику по оптоволокну в РЛС AN/SPQ-9B

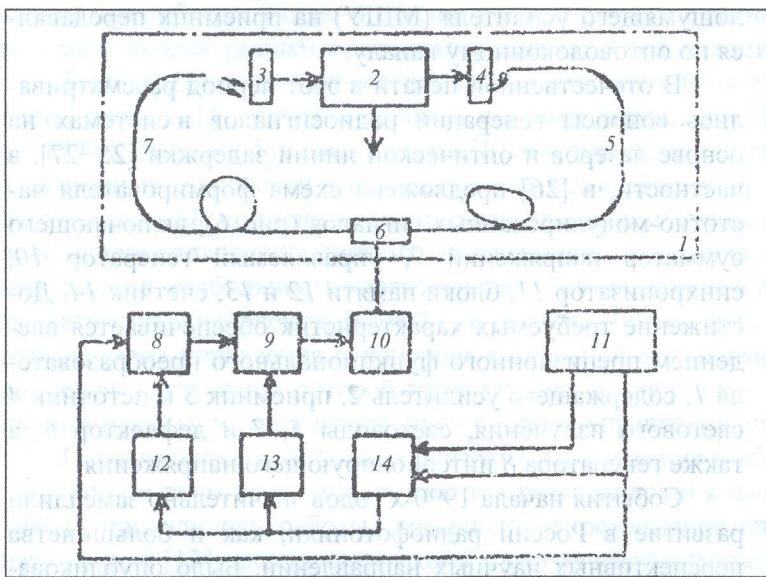


Рис. 6. Схема формирователя частотно-модулированных сигналов [26]

дюлятора Маха–Цендера и фазового модулятора, описаны различные варианты построения системы оптической обработки – от фильтров до архитектуры полностью оптической системы обработки, включающей полосовой фильтр и смеситель. Представлены различные варианты реализации систем формирования луча на основе волоконной решетки Брэгга. Рассмотрены вопросы передачи СВЧ-сигналов методом переноса на оптическую несущую с использованием модулятора Маха–Цендера и отражены вопросы аналого-цифрового преобразования оптическими методами. На основе этого и ряда других обзоров можно заключить, что к 2009 г. появились достаточно проработанные идеологический и технологический базисы для внедрения радиофотоники в рамках, заданных концепцией построения радиолокационных средств.

Можно констатировать, что к концу первого десятилетия XXI века за рубежом вопрос создания элементной базы и принципов построения радиолокационных систем на основе выработанных в предыдущие годы принципов с применением технологий радиофотоники достиг технической зрелости и акцент исследований от разработки теории, общих принципов и принципиально новой элементной базы стал смещаться по направлению к практической реализации функционально-законченных устройств и изделий. Необходимо отметить, что, несмотря на наличие практически полной номенклатуры ключевых элементов радиофотоники, радиофотонные системы, представленные в предшествующий период, были

ние в СВЧ- и фотонных системах. В этой междисциплинарной области, находящейся на стыке СВЧ-технологии, сверхскоростной электроники и оптоэлектроники, основные исследования посвящены генерации высокоскоростных и СВЧ-сигналов, их обработке и преобразованию, а также распределению и передаче СВЧ-сигналов по оптическим каналам». Таким образом, соответствующее направление было четко детерминировано.

На основе созданного задела были широко развернуты работы по развитию разработанных технологий радиофотонных устройств. В начале 2000-х годов за рубежом были достигнуты значительные результаты в области реализации отдельных функционально законченных устройств и совершенствования элементной базы. Предложен радиофотонный генератор [33], представлена гибридная перестраиваемая линия задержки [34], обеспечивающая задержку до 25 нс с разрешением 1 пс, временем перестройки 1 мс и оптическим потерями менее 5 дБ, рассмотрен вопрос создания радиофотонного передатчика и корреляционного гетеродинного приемника [35] с переносом сигнала на оптическую несущую. Представлены результаты работ по радиофотонным фильтрам [36], фазовращателям [37], линиям задержки [38].

Достигнутые результаты достаточно подробно были обобщены доктором Jianping Yao в 2009 г. в статье [26], в которой рассмотрены вопросы генерации сигналов, в том числе с применением

основаны на дискретных фотонных и СВЧ-компонентах, что делало их достаточно громоздкими, тяжелыми и дорогостоящими.

К первому десятилетию XXI века относится и новый этап активного развития отечественной радиофотоники, который приходится на начало 2000-х годов, что, вероятно, связано и с некоторым улучшением экономико-политической ситуации в стране.

В 2001 г. уже упоминавшимся А.Н. Братчиковым была защищена докторская диссертация [40], в которой был рассмотрен широкий круг вопросов, посвященных применению в антенной технике фазостабильных волоконных каналов передачи и распределения СВЧ-сигналов, предложена структурная схема АФАР с волоконно-оптической системой распределения сигналов и принцип оптического диаграммообразования. Фактически, данная работа заложила теоретическую базу одного из основных направлений радиофотоники – построения системы оптической развязки сигналов в антенных системах.

В 2002 г. защищена диссертация [41], посвященная разработке оптоэлектронных модуляторов миллиметровых волн с лазерным управлением, что позволило заложить теоретические основы создания одного из основных элементов радиофотоники – оптоэлектронного модулятора.

С 2002 г. был опубликован ряд работ [42–44], посвященных построению и экспериментальному исследованию макета многоканальной волоконно-оптической фазостабильной разводки СВЧ-сигнала и вопросам создания оптических антенных модулей [45, 46]. В 2005 г. Д.Ф. Зайцевым была защищена диссертация [47], в которой направление, называемое сейчас «радиофотоника», называется аналоговой фотоникой, и приводится следующее определение: «Аналоговая фотоника реализует в оптическом диапазоне физические методы синтеза, передачи и распределения, преобразования, обработки, автоматического регулирования и управления аналоговых радиочастотных сигналов», что в значительной мере совпадает с определением СВЧ-фотоники, уже приведенным выше. По итогам этой работы были разработаны подходы к построению систем волоконно-оптической фазостабильной разводки СВЧ-сигналов в ФАР и АФАР, разработаны и решены задачи по анализу, оценке и расчету точности и стабильности фазирования устройств систем передачи и распределения СВЧ-сигналов по аналоговым ВОЛС. Данная работа вместе с [40] заложила достаточный теоретический фундамент для реализации систем оптического распределения сигналов в антенных решетках.

Логичным развитием приведенных ранее принципов применения оптоэлектронники для построения элементов АФАР стало предложение по реализации оптоэлектронного приемопередающего модуля (ППМ) (рис. 7) [48] с помощью перехода на радиооптические методы передачи и приема сигналов аналоговой фотоники для всех его основных компонент, включая тракт передачи мощного СВЧ-сигнала.

Основными целями создания такого ППМ были: уменьшение массогабаритных параметров антенных частей ППМ; снижение тепловыделения в полотне АФАР; обеспечение возможности ее работы в широкой и сверхширокой мгновенных полосах за рубежом в период 1980...1990-х годов переходов к реализации второго ключевого направления ППМ для АФАР.

Данное направление, в отличие от реализации систем оптического распределения высокочастотных сигналов по полотну антенны, предъявляет повышенные требования к интегральной оптоэлектронной компонентной базе. Требования к элементной базе и анализ характеристик элементов для реализации оптоэлектронных ППМ были представлены в [49], где был рассмотрен вариант реализации оптоэлектронного ППМ путем замещения традиционной радиоэлектронной компонентной базы оптоэлектронной.

Как видно из рассмотренных публикаций, два представленных направления развития радиофотоники (оптоэлектронные ППМ и системы оптической разводки сигналов по антенному полотну) уже к середине 2000-х годов идеологически сформировались, однако ряд нерешенных вопросов технологического и орга-



Рис. 7. Схема оптоэлектронного ППМ [48]

низационного характера не позволял перейти к практической реализации радиоэлектронной аппаратуры с применением технологии радиофотоники. Основной проблемой было отсутствие доступной, функционально законченной линейки элементной базы и даже сформировавшейся программы ее создания.

К началу 2010-х годов из статуса перспективных разработок, спонсируемых структурами Минобороны США, СВЧ-фотоника перешла в область интереса различных высокотехнологичных компаний – разработчиков электронной техники, причем, как правило, к исследованиям активно стали привлекаться институты и независимые исследовательские центры.

В 2009 г. C. Falessi, A.M. Fiorello из концерна SELEX Sistemi Integrati и A. DiCarlo, M.L. Terranova из Римского университета предложили концепцию перспективного радиолокатора с применением нанотехнологий и радиофотоники [50], что позволило открыть перспективное направление работ по созданию опытного образца радиофотонного радиолокатора и послужило стартом очередного этапа развития радиофотоники. В [51] детально рассмотрены вопросы оптической обработки, варианты реализации фильтров, компенсации дисперсионных характеристик антенн, развит математический аппарат для описания радиофотонных преобразований.

В 2010 г. коллектив авторов: Francesco Laghezza, Fabrizio Berizzi, Amerigo Capria, Andrea Cacciamano, Paolo Ghelfi, Giovanni Serafino, Antonella Bogoni, представляющих Национальную лабораторию фотонных сетей в Пизе (Италия) и Департамент информационных технологий Университета Пизы,

в статье [52] предложили реконфигурируемый передатчик для радиолокатора с

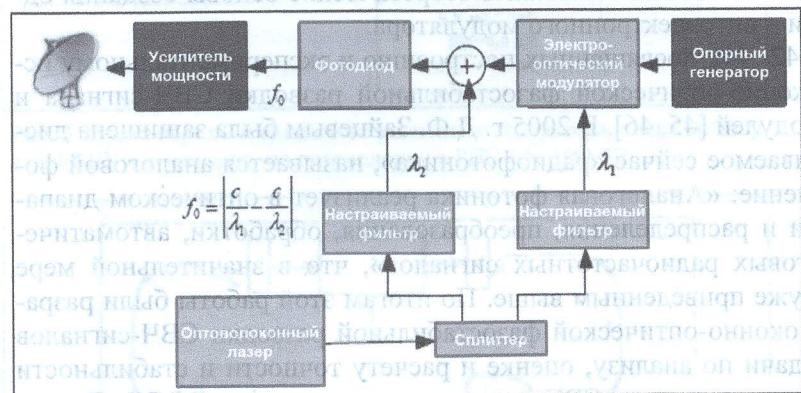


Рис. 8. Архитектура радиофотонного реконфигурируемого передатчика

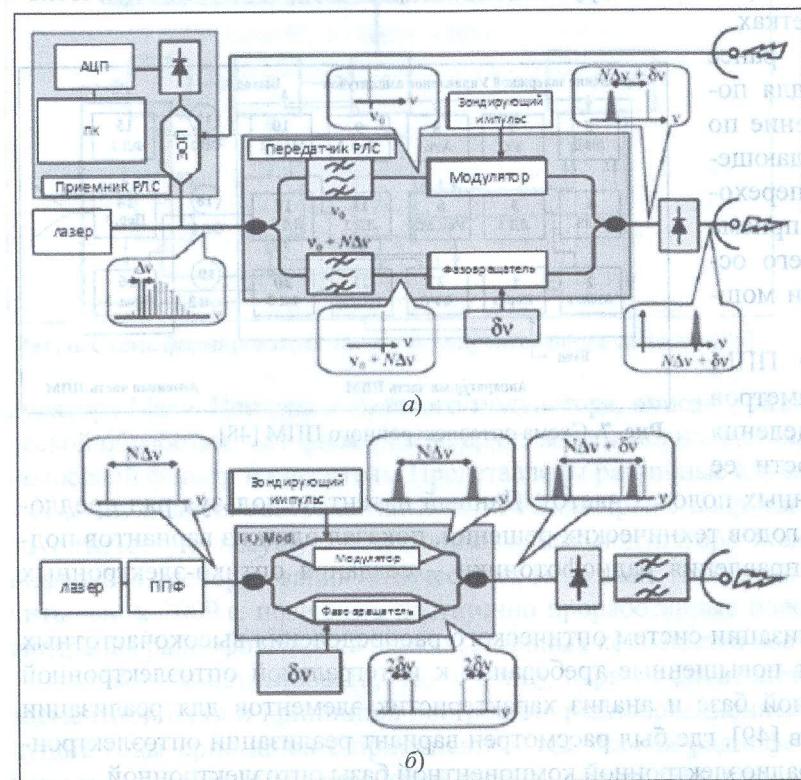


Рис. 9. Базовая схема генерации сигналов (а) и схема ресивера с применением коммерческого оптического I/Q модулятора (б) (ЭОП – электрооптический преобразователь; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь)

развит математический аппарат для описания радиофотонных преобразований.

В 2010 г. коллектив авторов: Francesco Laghezza, Fabrizio Berizzi, Amerigo Capria, Andrea Cacciamano, Paolo Ghelfi, Giovanni Serafino, Antonella Bogoni, представляющих Национальную лабораторию фотонных сетей в Пизе (Италия) и Департамент информационных технологий Университета Пизы, в статье [52] предложили реконфигурируемый передатчик для радиолокатора с элементами радиофотоники на основе волоконного регенеративного лазера с синхронизацией мод и фотодиода (рис. 8).

Далее работы данных коллективов были продолжены и их результаты опубликованы в [53, 54], где рассматривались вопросы создания радиолокационного приемо-передатчика с применением радиофотонных технологий на основе одномодового лазера (рис. 9). В работах [55–57] рассмотрены вопросы генерации ФМ-сигналов, а в 2013 г. должны были быть продолжены работы по созданию концепции полностью цифрового радиофотонного радиолокатора – демонстратора технологий [58], модель генерации импульсов в котором и схемы формирования диаграммы направленности представлена на рис. 10.

Данные работы привели к созданию к 2014 г. опытного образца цифрового радиофотонного радиолокатора (рис. 11), включающего лазер, передающий и приемный модули на основе технологии радиофотоники и оконечные

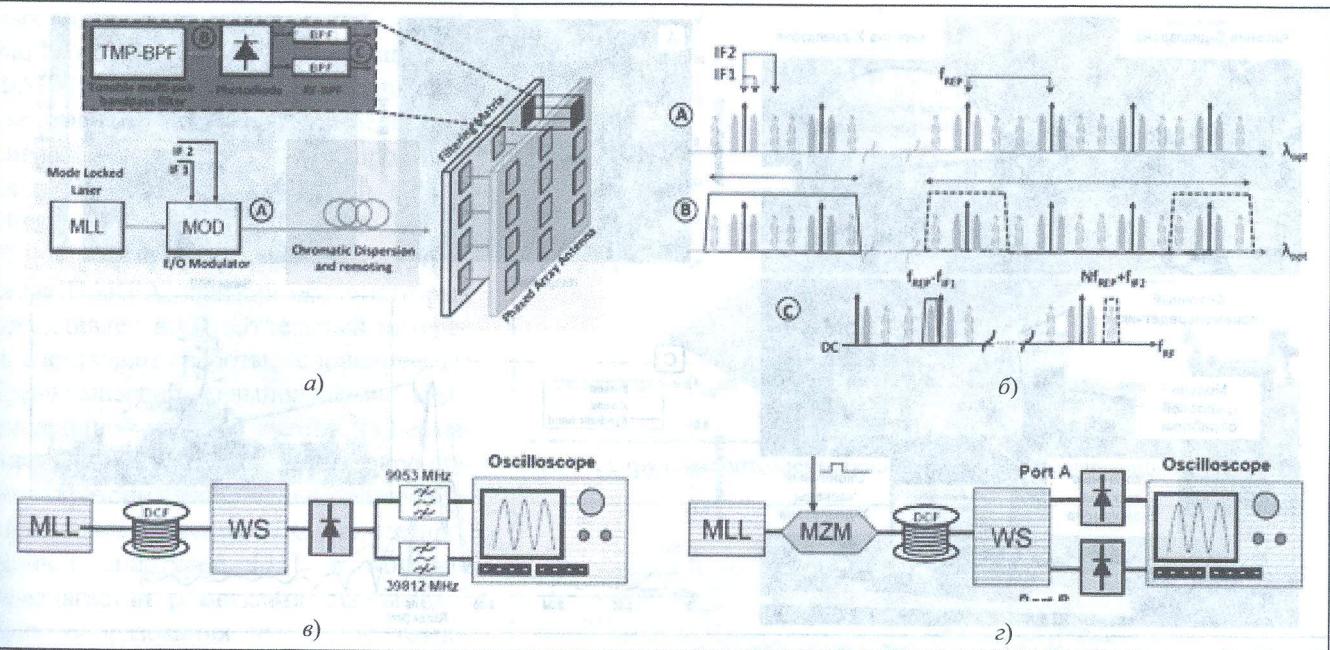


Рис. 10. Схема диаграммоформирования (а), оптический и электрический спектры на различных участках схемы (б), экспериментальные установки, используемые для широкополосного диаграммоформирования (с) и моделирования многоэлементной антенны (д): TMP-BPF – ППФ; MLL – лазер; MOD – модулятор; WS – формирователь; Oscilloscope – осциллограф; MZM – ММЦ

СВЧ-каскады. Результаты испытаний данного локатора в качестве аэродромного и берегового представлены в [35, 36] (рис. 12).

Таким образом, можно констатировать, что к 2015 г. в результате выполненных «итальянским кластером» работ состоялся опытный образец современного двухдиапазонного радиофотонного радиолокатора, способного работать одновременно в S- и X-диапазоне. Представленные результаты экспериментов показали, с одной стороны, принципиальные преимущества радиофотонных технологий, позволяющих благодаря широкополосности радиофотонных элементов реализовать двухдиапазонный режим, а с другой стороны, что для достижения реального высокого превосходства радиофотонных радиолокаторов над традиционными предстоит пройти значительный путь.

Необходимо отметить, что, хотя рассмотренный выше образец радиофотонного радиолокатора является наиболее технически завершенным и показательным, исследования и работы по созданию как отдельных элементов, так и в целом радиофотонных систем интенсивно велись в целом ряде организаций в различных странах мира.

В 2011 г. Thomas R. Clark из Университета Джона Хопкинса и Rodney Waterhouse из Pharad, Nanover, Maryland (США) [59] представили обзор радиофотонных технологий, в котором рассмотрены варианты реализации окончательных каскадов РЛС на основе радиофотоники, варианты реализации амплитудной или фазовой модуляции, различные схемы реализации приемного тракта. Представлен образец

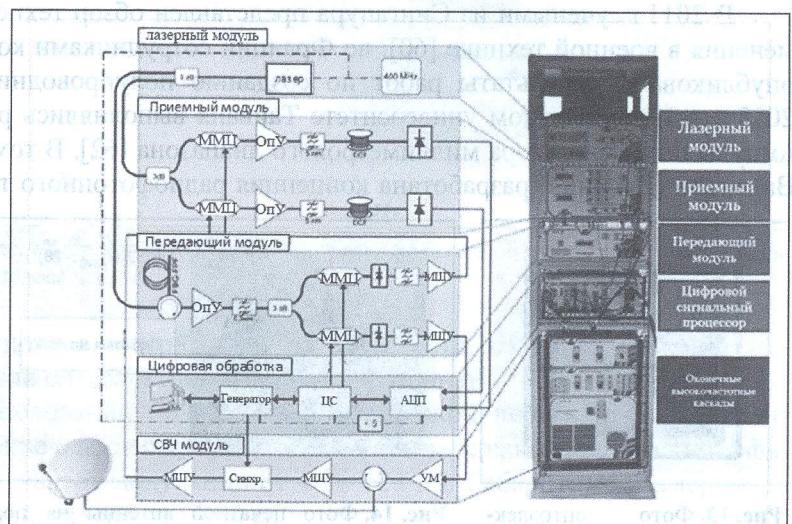


Рис. 11. Схема и внешний вид аппаратуры радиофотонного радиолокатора – демонстратора технологий: ММЦ – модулятор Маха–Цендера; ОпУ – оптический усилитель; ЦС – цифровой синтезатор; УМ – усилитель мощности

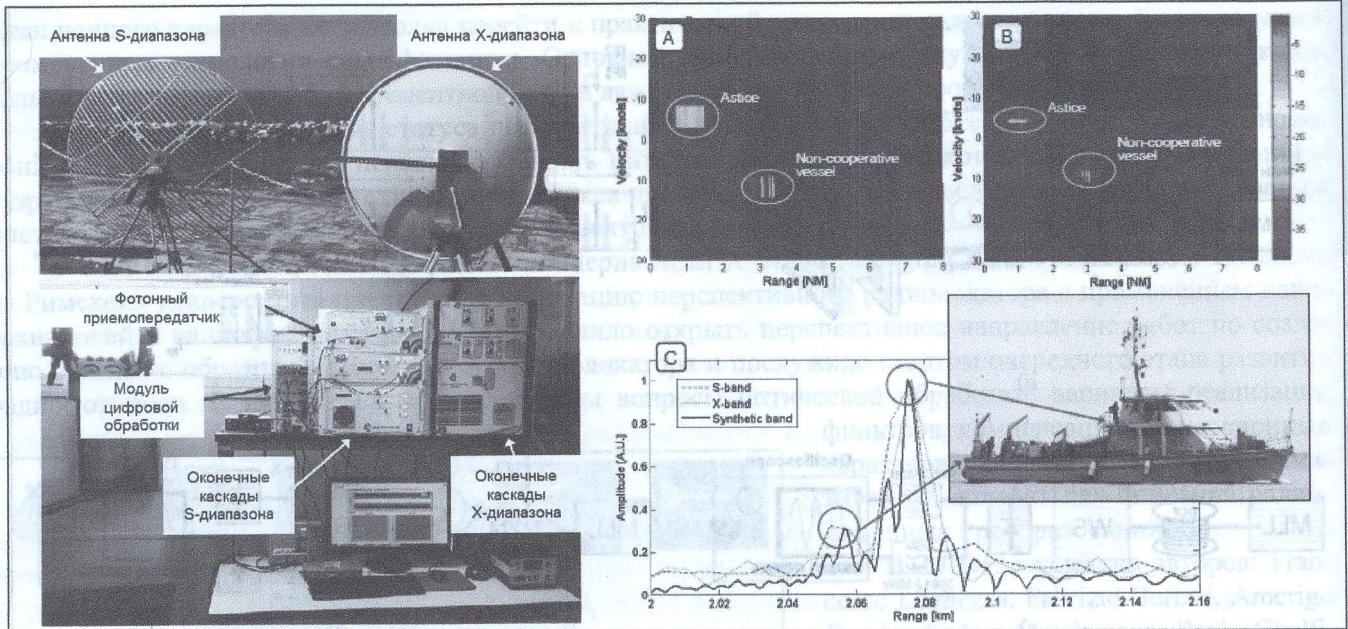


Рис. 12. Испытания образца цифрового радиофотонного радиолокатора

оптоэлектронного генератора Ка-диапазона с размерами $1,6 \times 16 \times 3,0$ см (рис. 13) и печатной антенны на подложке из ниобата лития (рис. 14)

В 2011 г. учеными из Сингапура представлен обзор технологий радиофотоники с точки зрения применения в военной технике [60]; во Франции сотрудниками концерна Thales и Парижского Университета опубликованы результаты работ по созданию полупроводниковых радиофотонных усилителей [61]; в 2013 г. в Национальном университете Тайваня выполнялись разработки с применением радиофотонного импульсного генератора миллиметрового диапазона [62]. В том же году в Политехническом университете Валенсии (Испания) разработана концепция радиофотонного транзистора (рис. 15) [63], а в Университете Сиднея (Австралия) предложена концепция нелинейного радиофотонного устройства для обработки сигнала (рис. 16) [64].

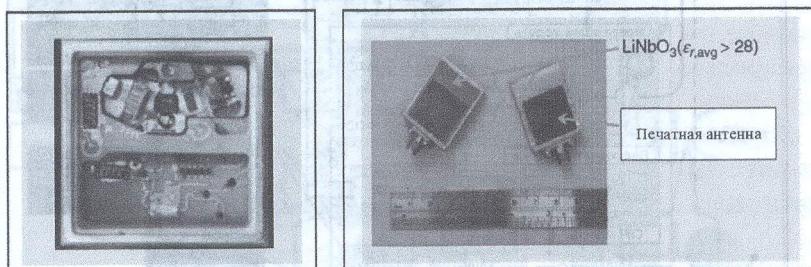


Рис. 13. Фото оптоэлектронного генератора

Рис. 14. Фото печатной антенны на подложке из ниобата лития

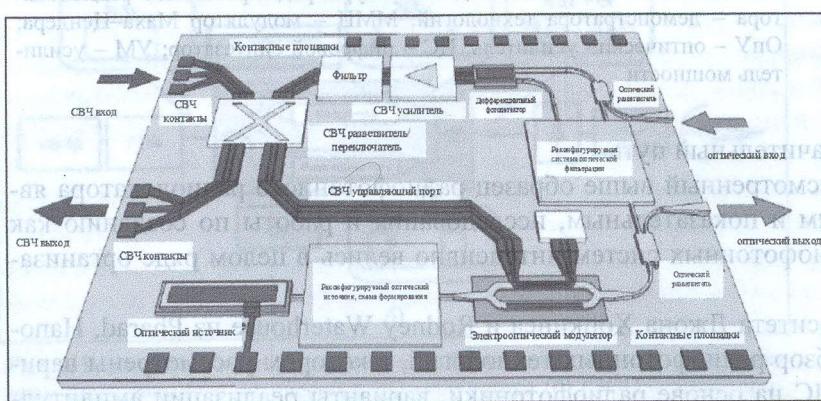


Рис. 15. Схема радиофотонного транзистора

Представителями компаний Локхид-Мартин (США) исследовались вопросы применения радиофотоники в сверхширокополосных системах и рассмотрены варианты реализации модуляторов, сравнительные показатели качества которых представлены на рис. 17 [65]. Особо отмечена необходимость создания модуляторов с высокими характеристиками, способных работать в диапазоне 10...100 ГГц.

По результатам работ в лаборатории радиолокации и радиофотоники Университета Космонавтики и аэронавтики (Nanjing, КНР) в 2014 г. опубликованы научные статьи по созданию радиофотонных устройств, исследованию построения радиофотонных систем на базе каскадов поляризацион-

ных модуляторов и результаты реализации оптических систем управления ФАР [66–69]. Работы по реализации системы оптического распределения сигналов по полотну АФАР проводятся в Bharat Electronics Ltd и Школе Инженерии и Технологии в Индии [70]. Продолжаются и работы, курируемые DARPA, краткий обзор которых представлен в [3]. Отдельный интерес представляют работы, спонсируемые Еврокомиссией и выполняемые международной группой ученых из Германии, Италии и Испании, по внедрению радиофотонных технологий в перспективных космических РЛС с синтезированной апертурой [71], в которых предлагается реализация схемы диаграммообразования на основе технологии радиофотоники.

В отличие от зарубежных исследований, которые велись в русле сформировавшегося к окончанию 1990-х годов научного направления СВЧ-фотоники (microwave photonic), поддерживаемого Министерством обороны США и DARPA, отечественные работы в данной области проводились не системно, а представляли собой скорее отдельные исследования различных научных групп. Тем не менее, ряд работ в последнее десятилетие позволил достигнуть некоторых ментов и устройств с применением тех

В [72] представлены результаты исследований по созданию оптической линии задержки СВЧ сигналов на одномодовом оптическом волокне с достигнутыми значениями задержки 2 мкс при коэффициенте передачи от -36 до -24 дБ в полосе частот модуляции от 4 до 12 ГГц. Габаритные размеры при этом составили $230 \times 100 \times 25$ мм, а длина линии задержки – 400 м.

Сообщается о разработке в рамках работ по созданию научно-технологической базы интегрально-и волоконной оптики СВЧ электрооптического модулятора [73].

Опубликован патент, в котором предложен вариант реализации оптического генератора СВЧ-импульсов [74] для решения задачи создания оптического СВЧ-генератора импульсов фототока, позволяющего осуществлять генерацию СВЧ-импульсов и оптическое и электрическое управление параметрами генерируемых колебаний при различных режимах генерации, а также повышать частоту оптических генерируемых колебаний. В [75] предложен иной вариант оптоэлектронного генератора сигналов СВЧ-диапазона, обеспечивающий возможность монолитного интегрального исполнения оптоэлектронного генератора, упрощение требований к величине коэффициента усиления радиотехнического узла и расширение функциональных возможностей.

В состав этого генератора (рис. 18) входит оптический узел 1 и радиотехнический узел 2. Основными элементами радиотехнического узла являются электрический усилитель 7 (ПЭУ), полосно пропускающий фильтр 8 (ППФ), усилитель мощности 9 (УМ), делитель мощности 10 (ДМ). В состав оптического узла входят: опорный лазерный излучатель 11 (ОЛИ), синхронизируемый лазерный излучатель

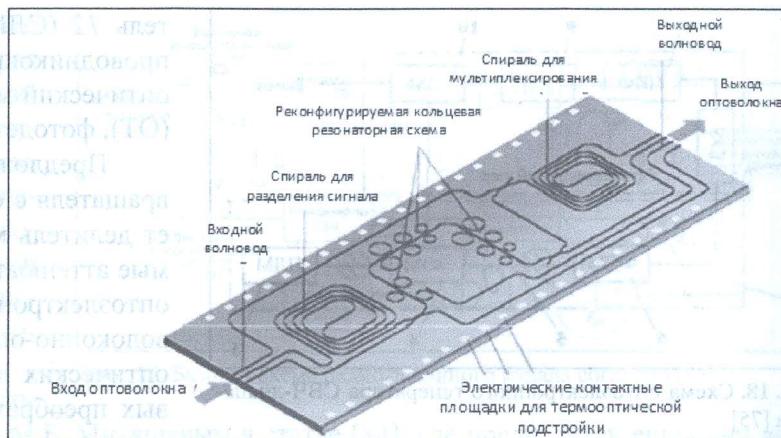


Рис. 16. Структура оптоэлектронного аналогового сигнального процессора

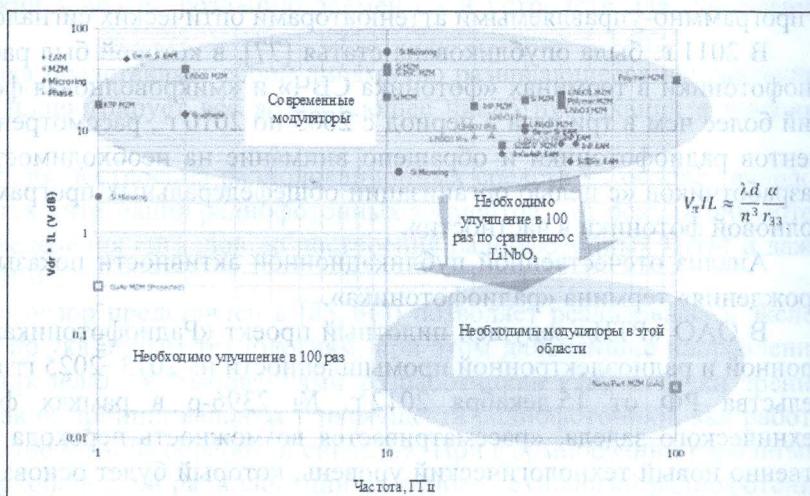


Рис. 17. Графическое представление показателей качества модулятора в полосе частот

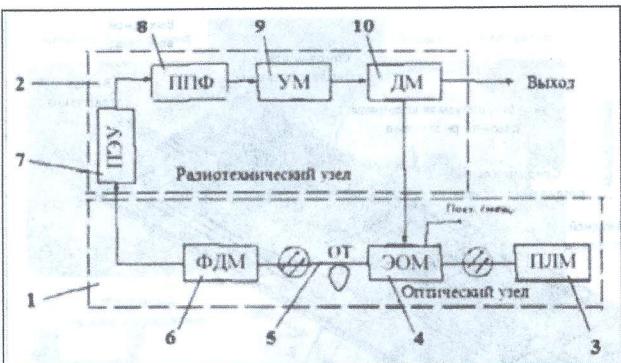


Рис. 18. Схема оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона [75]

сдвигом СВЧ-сигналов реализовано в оптическом диапазоне волоконно-оптическими линиями задержки и программно-управляемыми аттенюаторами оптических сигналов.

В 2011 г. была опубликована статья [77], в которой был рассмотрен ряд проблемных вопросов радиофotonики в терминах «фотоника СВЧ» и «микроволновая фотоника». Отмечен рост числа публикаций более чем в три раза в период с 2003 по 2010 г., рассмотрены различные варианты реализации элементов радиофotonики и обращено внимание на необходимость координации усилий предприятий и разработчиков «с целью организации общефедеральных программ развития фотоники вообще и микроволновой фотоники в частности».

Анализ отечественной публикационной активности показывает, что 2012 г. можно считать годом «рождения» термина «радиофотоника».

В ОАО «РТИ» запущен пилотный проект «Радиофотоника» [78]. В госпрограмме «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 15 декабря 2012 г. № 2396-р в рамках формирования перспективного научно-технического задела, «рассматривается возможность перехода радиоэлектроники в будущем на качественно новый технологический уровень, который будет основан на малоизученных в настоящее время взаимодействиях (спинtronика, квантовые вычисления, радиофотоника и т.п.)». Несмотря на то, что распоряжение об утверждении госпрограммы было отменено в 2014 г., а «Радиофотоника» была заявлена в ней как перспективное научное направление наряду со спинtronикой и квантовыми вычислениями, по факту дальше под этот «флаг» стали подтягиваться исследования в области оптики, фотоники и оптоэлектроники для применения этих классических и сформировавшихся направлений в радиотехнике.

Термин радиофотоника стал распространяться все более широко. В 2013 г. в рамках школы-семинара МГУ «Волны-2013» была создана секция «Радиофотоника», в Казанском техническом университете (КНИТУ-КАИ) сформирована кафедра «Радиофотоники и микроволновых технологий», с 2014 г. термин «радиофотоника», оставаясь до конца не детерминированным, прочно входит в оборот, а число публикаций, посвященных данной проблематике, резко растет.

В 2014 г. в г. Омске в рамках V Всероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных систем» опубликован ряд научных статей, посвященных проблемам радиофотоники от радиофотонных трактов до радиофотонных АЦП, с которыми можно ознакомиться в трудах конференции [79]. На конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» в г. Санкт-Петербург представлен доклад [80], посвященный обзору вариантов реализации диаграммообразующих схем АФАР с применением аналоговых волоконно-оптических элементов. В продолжение предшествующих работ опубликована диссертация, посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию оптоэлектронного автогенератора [81], представлены результаты исследований по применению технологий радиофотоники для обеспечения измерения мгновенной частоты радиосигнала с улучшенными метрологическими характеристиками в различных системах [82].

Первые результаты формирования комплексной программы развития радиофотоники приведены в докладе А.Н. Шулунова [83], там же предложена концепция построения классификатора радиофотонных устройств на основе базовой структуры радиофотонного канала (рис. 19).

тель 12 (СЛИ), схема согласования 13 (СС), полупроводниковый лазерный модуль 3 (ПЛМ), электрооптический модулятор 4 (ЭОМ), оптический тракт 5 (ОТ), фотодетекторный модуль 6 (ФДМ).

Предложенный в [76] вариант реализации фазовращателя с оптоэлектронным управлением включает делитель мощности, «фазосдвигатель», управляемые аттенюаторы, сумматор мощности, передающий оптоэлектронный модуль, управляемый драйвером, волоконно-оптические тракты, четыре волоконно-оптических линии задержки, четыре цифроаналоговых преобразователя и приемный оптоэлектронный модуль, — микроконтроллер. Управление фазовым

Таким образом, можно отметить, что только к 2014 г. произошла некоторая формализация направления радиофотоники в России. В 2015 г. радиофотоника стала еще более популярным направлением. Если, например, в 2013 г. в рамках школы-семинара «Волны-2013» в соответствующем разделе было опубликовано всего три работы, то в 2015 г. – уже 16, а общее число работ по данной проблематике превысило несколько десятков.

Ряд подходов к применению технологий радиофотоники в АФАР предложен М.Б. Митяшевым в статье [84], где представлен еще один вариант реализации схемы СВЧ-разводки АФАР и показано, что на отечественных предприятиях имеется идеологический и некоторый технический задел по созданию элементов и устройств для построения АФАР на базе радиофотоники.

На сегодняшний день радиофотоника представляет собой динамично развивающееся направление, продолжительный интерес к которому иллюстрирует все возрастающее число публикаций в научной печати (рис. 20).

Полностью сформировалась концепция построения радиолокационных средств на основе технологии радиофотоники в различных вариантах интеграции радиофотонных элементов – от реализации оптоэлектронных систем управления и распределения сигналов до построения радиофотонных ППМ и даже полнофункциональных радиофотонных РЛС.

Существующая элементная база (ее обзор представлен в [85, 86]) позволяет реализовывать экспериментальные образцы радиолокаторов по указанным технологиям, при этом дальнейшие направления технологических разработок должны определяться требованиями разработчиков РЛС с точки зрения обеспечения возможности реализации таких принципиальных преимуществ радиофотоники, как работа в сверхширокой полосе частот и оптические методы обработки сигналов. При формировании парадигмы развития нового направления сверхширокополосной радиолокации на основе технологий радиофотоники ключевыми позициями в области элементной базы и технологий являются:

1) активные элементы: ультралинейные высокостабильные лазерные диоды опорных частот; активные функциональные оптроны; широкодиапазонные высокостабильные оптоэлектронные генераторы и синтезаторы частоты СВЧ-диапазона; аналоговые и цифроаналоговые оптоэлектронные процессы.

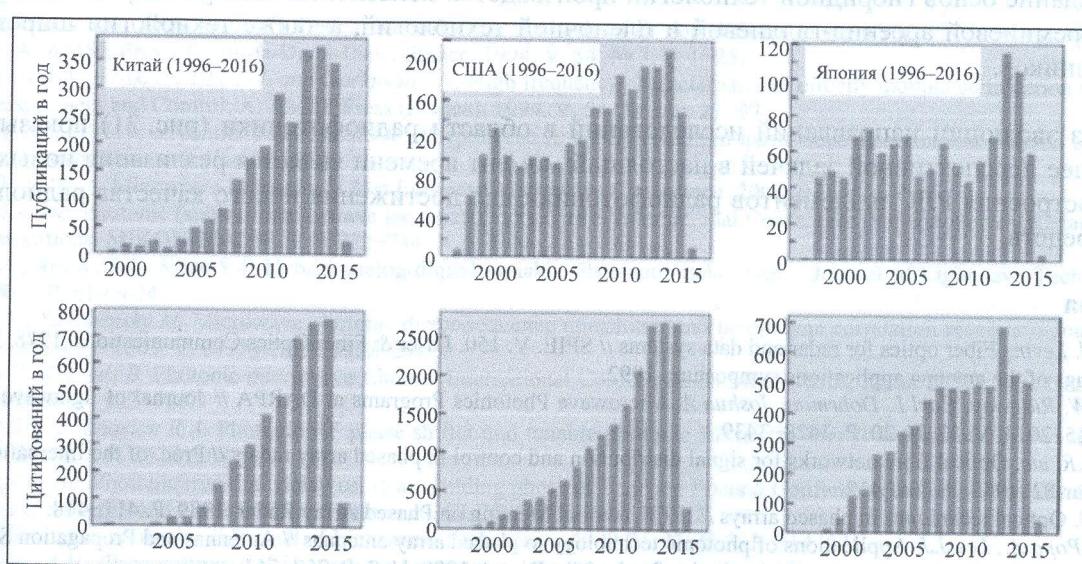


Рис. 20. Графическое представление динамики числа публикаций по направлению радиофотоники в КНР, США и Японии по данным Web of Science

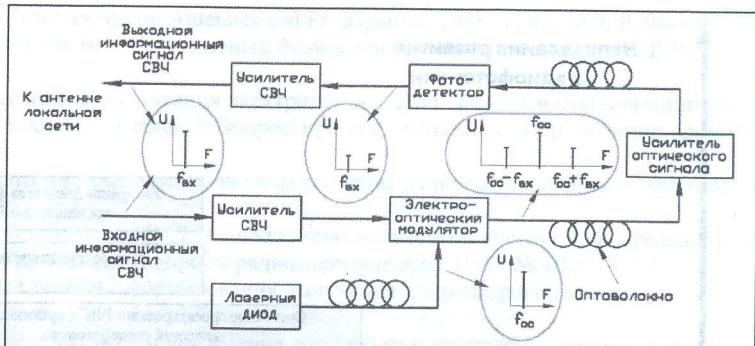


Рис. 19. Базовая схема радиофотонного канала согласно [83]

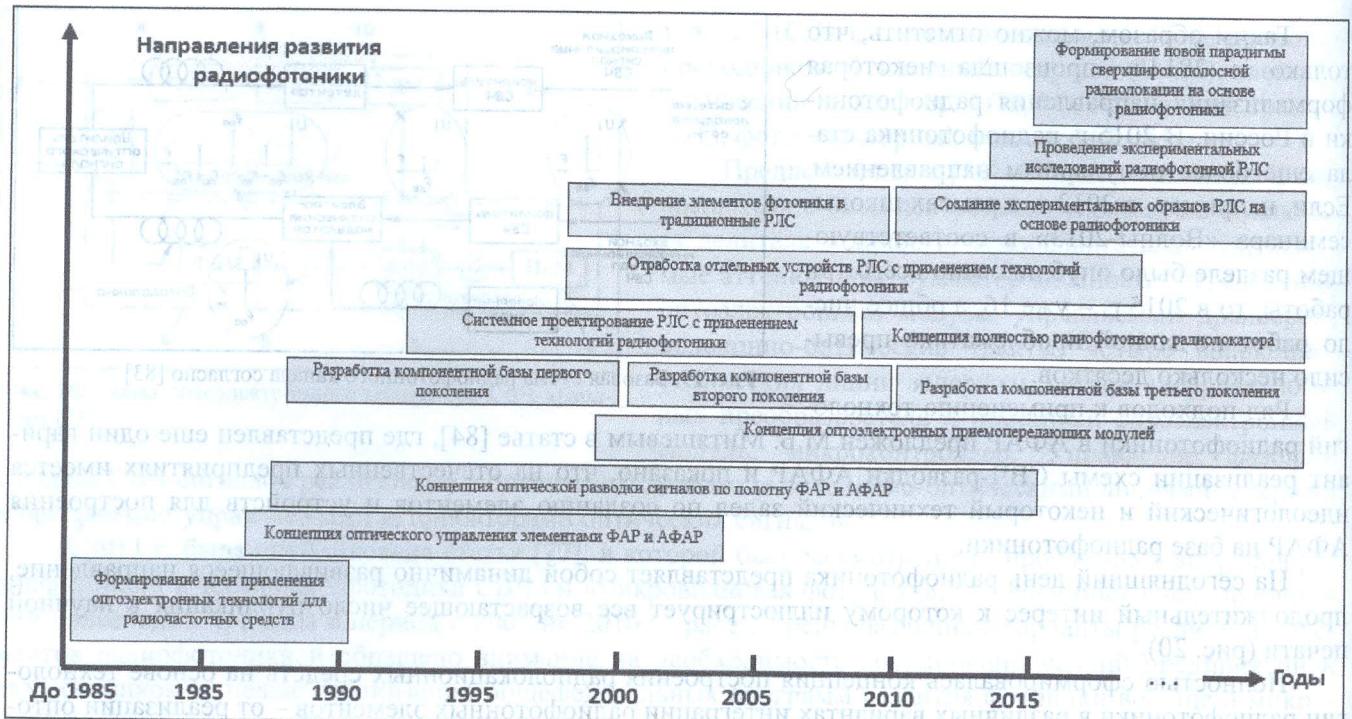


Рис. 21. Графическое представление направлений исследований в области радиофотоники

ры; преобразователи на основе механо-оптических эффектов;

2) пассивные элементы: высокоэффективные фотодетекторы опорных диапазонов с высокой нелинейностью и большим динамическим диапазоном; фотодетекторы для регистрации изображений; управляемые оптоэлектронные линии задержки и фазовращатели на основе комбинации кремниевых, арсенид-галлиевых и пленочных технологий; управляемые транспаранты; высокоэффективные модуляторы и регистраторы оптических сигналов;

3) материалы и технологии: базовые волноводные элементы интегральной фотоники на основе кремниевой микроэлектронной технологии; элементы дифракционной оптики на основе комбинации кремниевой и пленочной технологий; системообразующие материалы; особо чистые полупроводниковые материалы; пленкообразующие материалы; подложечные материалы; оптические кристаллы; композиты; создание основ гибридной технологии производства элементной базы радиофотоники на основе синтеза кремниевой арсенид-галлиевой и пленочной технологий, а также технологии широкозонных полупроводников.

- Анализ эволюции направлений исследований в области радиофотоники (рис. 21) показывает, что наиболее перспективной задачей в настоящий момент времени является реализация новых принципов построения РЛС и элементов радиофотоники для достижения нового качества радиолокационных средств.

Литература

1. Arnold M. Levine Fiber optics for radar and data systems // SPIE. V. 150. Laser & Fiber Optics Communications. 1978. P. 185–192.
2. Proceedings of the antenna applications symposium. 1992.
3. Richard W. Ridgway, Carl L. Dohrman, Joshua A. Microwave Photonics Programs at DARPA // Journal of lightwave technology. October 15, 2014. V. 32. № 20. P. 3428–3439.
4. Forrest J.R. etc. Optical fibre networks for signal distribution and control in phased array radars // Proc. of the International Conference Radar-82. 1982. P. 408–412.
5. Seeds A.J. Optical techniques in phased arrays // IEEE Tutorial Meeting on Phased Array Radar. 1989. P. 411–418.
6. Tang R., Popa A., Lee J.J. Applications of photonic technology to phased array antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. AP-S. Merging Technologies for the 90's. Digest. 1990. V. 2. P. 758–761.
7. Daryous A.S. etc. Optically controlled phased array at C-band // Antennas and Propagation Society International Symposium. AP-S Digest. 1992. V. 1. P. 466–469.

8. Lee J.J. etc. Photonic wideband array antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1995. V. 43. № 9. P. 966–982.
9. Бахрах Л.Д., Блескавицкий А.А. Перспективы применения ВОЛС в активных фазированных антенных решетках РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 1986. № 8. С. 3–13.
10. Бахрах Л.Д., Блескавицкий А.А. Методы автоматического выравнивания электрических длин каналов и стабилизации фазы в АФАР СВЧ с волоконно-оптической системой разводки сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общие вопросы радиоэлектроники». 1988. № 1. С. 3–13.
11. Бахрах Л.Д., Блескавицкий А.А. Гибридная СВЧ волоконно-оптическая система распределения сигналов в активной ФАР // Радиотехника. 1990. № 9. С. 62.
12. Бахрах Л.Д., Блескавицкий А.А. Крупноапertureные активные ФАР СВЧ с волоконно-оптической системой распределения и обработки сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общие вопросы радиоэлектроники». 1990. № 10. С. 3–18.
13. Бахрах Л.Д., Блескавицкий А.А. Оптомикроволновые методы формирования излучения сверхширокополосных антенн // УФН. 1992. Т. 162. № 12. С. 160–164.
14. Братчиков А.Н., Гринев А.Ю. Волоконно-оптические системы распределения и обработки сигналов антенных решеток // Радиоэлектроника. Известия ВУЗов. 1989. Т. 32. № 2. С. 19–31.
15. Братчиков А.Н., Глухов И.П., Курносов В.Д. Внутренняя модуляция инжекционных лазеров в волоконных каналах разводки СВЧ-сигналов // Радиоэлектроника. Известия ВУЗов. 1991. Т. 34. № 3. С. 12–18.
16. Братчиков А.Н., Глухов И.П. Анализ спектральных характеристик радиосигналов на выходе одномодового волоконного канала интерференционного типа // Радиоэлектроника. Известия ВУЗов. 1991. Т. 34. № 5. С. 28–33.
17. Братчиков А.Н., Глухов И.П. Анализ спектральных характеристик радиосигналов на выходе многомодового интерференционного волоконно-оптического канала // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 2. С. 197–202.
18. Авт. свид.-во № 1734223. СССР. 1992. Волоконно-оптическая линия передачи СВЧ-сигнала / Братчиков А.Н., Плотников С.О., Земцов Г.П.
19. Авт. свид.-во № 1748266. СССР. 1992. Волоконно-оптическая линия передачи СВЧ-сигнала / Братчиков А.Н., Плотников С.О., Земцов Г.П.
20. Coppinger F. etc. Nonrecursive tunable photonic filter using wavelength-selective true time delay // Photonics Technology Letters. 1996. V. 8. № 9. P. 1214–1216.
21. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wide-band microwave photonic phase and frequency shifter // Transactions on microwave theory and technique. 1997. V. 45. № 6. P. 1003–1006.
22. Riza N.A., Madamopoulos N. All-fiber connectorized fiber-optic delay module using 3-D polarization optics // Conference Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting. LEOS'97. 10th Annual Meeting. 1997. V. 2. P. 472–473.
23. Bowers J. Devices for microwave photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics. MWP '96. Technical Digest. 1996. V. 2. P. 29–32.
24. Romfin J.E., Esman R.D., Tavik G.C., Livingston M. and Parent M.G. Photonic Remoting of AN/SPQ-9B ADM Ultra High Dynamic Range Radar // IEEE Radar Conference. Dallas. May 1998.
25. Григорьянц В.В., Дворников А.А., Ильин Ю.Б., Константинов В.Н., Прокофьев В.А., Уткин Г.М. Генерация радиосигналов в системе «лазер – оптическая линия задержки» // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 4. С. 766–775.
26. Пат. РФ № 1506508, опубликован 07.09.1989 / Белов Л.А., Борцов А.А., Григорьянц В.В., Ильин Ю.Б., Константинов В.Н., Королев И.П.
27. Борцов А.А., Григорьянц В.В. и др. Частотные и фазовые характеристики автогенератора с волоконно-оптической линией задержки // Сб. докл. «Стабилизация частоты». М. 1986. С. 63–67.
28. Гиневский С.П., Котов О.И., Николаев В.М., Поверинов М.С., Сулейман Абу-Газали Оптоэлектронный измерительный автогенератор с волоконным интерферометром в цепи обратной связи // Журнал технической физики. 1995. Т. 21. № 15. С. 20–28.
29. Bratchikov A.N. and Sheremeta A.P. Optical amplifiers on the basis of Er-doped fibers: present state // Modeling, Measurement & Control, A. AMSE Press, Tassin-la-Demi-Lune, France. 1994. V. 54. № 3. P. 1–25.
30. Bratchikov A.N., Voskresensky D.I. and Garkusha S.A. High frequency characteristics of directly modulated injection laser // Modeling, Measurement and Control, A. AMSE Press (France). 1994. V. 54. № 3. P. 27–37.
31. Пат. РФ № 2119719, опубликован 27.09.1998. Устройство для стабилизации фазы передаваемого по ВОЛС высокочастотного аналогового сигнала / Зайцев Д.Ф.
32. Jäger D., Stöhr A. Microwave Photonics // 31st European Microwave Conference. 2001. P. 1–4.
33. Malcoci A. etc. Photonic (sub)millimeterwave local oscillators // 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON-2002. V. 3. P. 722–734.
34. Riza N.A., Arain M.A., Khan S.A. Hybrid analog-digital variable fiber-optic delay line // Journal of Lightwave Technology. 2004. V. 22. № 2. P. 619–624.
35. Funk E.E., Bashkansky M. Microwave photonic direct-sequence transmitter and heterodyne correlation receiver // Journal of Lightwave Technology. 2003. V. 21. № 12. P. 2962–2967.
36. Wojtyra P., Galwas B. Photonic microwave filters // International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications. MIKON-2006. P. 922–925.
37. Chan E.H.W., Minasian R.A. Photonic RF phase shifter and tunable photonic RF notch filter // Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. № 7. P. 2676–2682.
38. Zhigang Liu etc. Photonic true time delay using air-guiding photonic bandgap fibers // Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference. CLEO/QELS-2006. P. 1–2.
39. Yao J. Microwave photonics // Journal of Lightwave Technology. 2009. V. 27. № 3. P. 314–335.
40. Братчиков А.Н. Фазостабильные волоконно-оптические системы передачи и распределения антенных сигналов СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Дис. ... докт. техн. наук. М.: 2001. 373 с.
41. Постолов А.Н. Опторадиоэлектронные модуляторы миллиметровых волн. Дис. ... канд. техн. наук. Томск: 2002.

42. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф. Экспериментальное исследование макета многоканальной волоконно-оптической фазостабильной разводки СВЧ сигнала // Труды второго научно-технич. симпозиума «Электронное управление лучом в бортовых радиолокационных комплексах». Рязань. 2002. С. 102–104.
43. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф., Островский А.Г. Особенности применения фотоники в АФАР // Труды второго научно-технич. симпозиума «Электронное управление лучом в бортовых радиолокационных комплексах». Рязань. 2002. С. 114–117.
44. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф. Экспериментальное исследование макета многоканальной сверхшироколосной фазостабильной волоконно-оптической разводки СВЧ-сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2003. № 5. С. 3–6.
45. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф. Фазированные антенные решетки на основе распределенных оптических антенных модулей // Доклады РАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 465–468.
46. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф. Перспективы применения аналоговой фотоники в радиолокационных системах // Антенны. 2004. № 8–9. С. 134–138.
47. Зайцев Д.Ф. Устройства аналоговых фотонных сетей в аппаратуре АФАР. Дис. ... докт. техн. наук. М.: 2005. 194 с.
48. Пат. РФ № 2298810. МПК G01S13/66, опубл. 10.05.2007. Приемо-передающий оптоэлектронный модуль АФАР / Зайцев Д.Ф.; бюл. № 13.
49. Дорофеев А.В., Усачев В.А. О технологии приемо-передающих модулей радиооптических цифровых ФАР для перспективных РЛС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009. С. 68–77.
50. Faleski C. etc. From RADAR to NODAR // Radar Conference. RADAR'08. 2008. P. 1–6.
51. Hamidi E. Photonic processing of ultra-broadband radio frequency waveforms // A Dissertation Submitted to the Faculty of Purdue University. West Lafayette. Indiana. 2010. 146 p.
52. Laghezza F. etc. Reconfigurable radar transmitter based on photonic microwave signal generation // Proc. of the 7th European Radar Conference. 2010. P. 336–339.
53. Laghezza F. etc. Reconfigurable radar transmitter based on photonic microwave signal generation // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2011. № 3(3). P. 383–389.
54. Ghelfi P. etc. Novel Architecture for a Photonics-Assisted Radar Transceiver Based on a Single Mode-Locking Laser // Photonics Technology Letters. 2010 V. 23. № 10. P. 639–641.
55. Ghelfi P. etc. Ultra-stable radar signal from a photonics-assisted transceiver based on single mode-locking laser // Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and the National Fiber Optic Engineers Conference. 2011. P. 1–3.
56. Ghelfi P. etc. Phase Coding of RF Pulses in Photonics-Aided Frequency-Agile Coherent Radar Systems // Journal of Quantum Electronics. 2012. V. 48. № 9. P. 1151–1157.
57. Ghelfi P. etc. Photonic Generation of Phase-Modulated RF Signals for Pulse Compression Techniques in Coherent Radars // Journal of Lightwave Technology. 2012. V. 30. № 11. P. 1638–1644.
58. Bogoni A. etc. PHODIR: Photonics-based fully digital radar system // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 25–28.
59. Clark T.R., Waterhouse R. Photonics for RF Front Ends // IEEE Microwave Magazine. 2011. V. 12. № 3. P. 87–95.
60. Peng Huei Lim etc. Microwave photonics research for defense applications in Singapore // International Topical Meeting on Microwave Photonics & Microwave Photonics Conference. Asia-Pacific. MWP/APMP. 2011. P. 417–420.
61. Slow and Fast Light in Semiconductor Optical Amplifiers for Microwave Photonics // Applications Advances in Optical Amplifiers / Под ред. P. Urquhart. InTech. 2011. Chapter 9. P. 179–204.
62. Tzu-Fang Tseng etc. High-resolution 3-dimensional radar imaging based on a few-cycle W-band photonic millimeter-wave pulse generator // OFC/NFOEC Technical Digest. 2013. P. 1–3.
63. Capmany J. etc. A microwave photonics transistor // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 190–193.
64. Marpaung D., Eggleton B.J. Nonlinear integrated microwave photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 84–87.
65. Scott Rodgers J. Technologies for RF photonics in wideband multifunction systems // IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). 2013. P. 7–8.
66. Yamei Zhang, Fangzheng Zhang, Shilong Pan A microwave photonic system with switchable functions based on cascaded polarization modulators // 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 2014. P. 1–3.
67. Yamei Zhang etc. An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation // Optics express. 2014. V. 22. № 4. P. 3761–3765.
68. Shilong Pan, Yamei Zhang Microwave photonic signal processing based on polarization modulation // Photonics Conference (IPC). 2014. P. 210–211.
69. Zhenzhou Tang, Shilong Pan A reconfigurable photonic microwave mixer // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) and the 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP). 2014. P. 343–345.
70. Mathur M., Sridhar N., Rai J.K. Design and analysis of RF signal distribution over optical fiber for active aperture radar // International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). 2014. P. 354–357.
71. Piqueras M.A. etc. Photonic front-end for the next-generation of space SAR applications // Proc. of the 10th European Microwave Integrated Circuits Conference. 2015. P. 301–304.
72. Жураевева О.В., Иванов А.В., Исаев Д.С. и др. Активная волоконно-оптическая линия задержки сигналов СВЧ-диапазона // Microwave & Telecommunication Technology. CriMiCo 2007. 17th International Crimean Conference. С. 907–908.
73. Костицкий С.М. Создание научно-технологической базы интегральной и волоконной оптики // Отчет по НИР. Номер гранта (контракта): 02.527.11.9017 от 26.11.2007. URL = <http://elibrary.ru/item.asp?id=18072992>.
74. Пат. РФ № 2390073, опубликован 20.05.2010. Оптический генератор СВЧ-импульсов / Перепелицын Ю.Н.; бюл. № 14.
75. Пат. РФ № 2436141, опубликован 10.12.2011. Оптоэлектронный генератор сигналов СВЧ-диапазона / Белкин М.Е., Белкин Е.М.; бюл. № 34.
76. Пат. РФ № 2454759, опубликован: 27.06.2012. Фазовращатель / Яковлев М.Я., Цуканов В.Н.; бюл. № 18.

77. Вольхин Ю.Н., Мандрик А.М., Носов Ю.И. О перспективах использования методов и средств микроволновой фотоники в сверхширокополосной радиолокации и сверхширокополосной радиосвязи // Сб. докладов Междунар. научно-технич. конф. ФГУП «Омский научно-исследовательский институт приборостроения». Омск. 2011. С. 322–329.
78. Бевзюк И.А. R&D-стратегия: Определить конкурента // Интеллект & Технологии. 2012. № 3(4). С. 21–23.
79. Материалы V Общерос. науч.-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных систем». Омск. 2014. URL = http://www.ckba.net/media/files/2014_11_06_sbork.pdf.
80. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Диаграммоформирующие схемы для приемных ФАР СВЧ-диапазона на основе компонентов аналоговых волоконно-оптических линий // Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. 2014. С. 503–508.
81. Борцов А.А. Оптоэлектронный генератор с накачкой квантоворазмерным лазерным диодом. Дис. ... докт. техн. наук. М.: 2014. 402 с.
82. Нургазизов М.Р. Оптико-электронные системы измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона на основе амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей. Дис. ... канд. техн. наук. Казань: 2014. 166 с.
83. Шулунов А.Н. Применение радиофотоники в радиолокации // Материалы Междунар. Крымской конф. КРЫМИКО. Севастополь. 2014.
84. Митяшев М.Б. К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 178–190.
85. Голов Н.А. и др. Особенности и принципиальные преимущества элементной базы радиофотоники при создании сверхширокополосных РЛС на базе ФАР и АФАР // Антенны. 2016. № 3. С. 19–25.
86. Голов Н.А. и др. Системы оптоэлектронного распределения и обработки сигналов для создания радиофотонных РЛС с АФАР // Материалы VI Общерос. научно-технич. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». Омск: Изд-во ОмГТУ. 2016. С. 112–136.

Поступила 16 сентября 2016 г.

Roadmap of microwave photonics. Formation and development prospects

© Authors, 2016
© Radiotekhnika, 2016

N.A. Golov – Deputy Head of Department, Bauman Moscow State Technical University

E-mail: golov@bmstu.ru

S.F. Boev – Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Econ.), Professor, General Director JSC «RTI» (Moscow)

V.P. Savchenko – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Deputy Executive Director JSC «RTI» (Moscow)
E-mail: Vsavchenko@oaorti.ru

V.A. Usachev – Ph. D. (Eng.), Head of Department, Bauman Moscow State Technical University

E-mail: usachev_va@mail.ru

Y.B. Zubarev – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Corresponding Member of RAS, Adviser, JSC «MNITI» (Moscow)
E-mail: osa@mnniti.ru

A.N. Shulunov – Head of Area, JSC «RTI» (Moscow)

E-mail: A.Shulunov@oaorti.ru

Reviewed the features of the application, advantages and features elements of fiber optics, optoelectronics and integrated optics for use in ultra-wideband radars. Determined the principal possibility of achieving the ultra-wideband radar based on PAR and AESA significantly higher specifications by applying microwave photonic elements. The exploration of microwave photonics evolution shows the directions of future research, such as new principles of creating radio location stations and microwave photonics elements.

References

- Arnold M. Levine Fiber optics for radar and data systems // SPIE. V. 150. Laser & Fiber Optics Communications. 1978. P. 185–192.
- Proceedings of the antenna applications symposium. 1992.
- Richard W. Ridgway, Carl L. Dohrman, Joshua A. Microwave Photonics Programs at DARPA // Journal of lightwave technology. October 15, 2014. V. 32. № 20. P. 3428–3439.
- Forrest J.R. etc. Optical fibre networks for signal distribution and control in phased array radars // Proc. of the International Conference Radar-82. 1982. P. 408–412.
- Seeds A.J. Optical techniques in phased arrays // IEEE Tutorial Meeting on Phased Array Radar. 1989. P. 411–418.
- Tang R., Popa A., Lee J.J. Applications of photonic technology to phased array antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. AP-S. Merging Technologies for the 90's. Digest. 1990. V. 2. P. 758–761.
- Daryous A.S. etc. Optically controlled phased array at C-band // Antennas and Propagation Society International Symposium. AP-S Digest. 1992. V. 1. P. 466–469.
- Lee J.J. etc. Photonic wideband array antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1995. V. 43. № 9. P. 966–982.
- Baxrax L.D., Bliskaviczkij A.A. Perspektivny' primeneniya VOLS v aktivny'x fazirovanny'x antenny'x reshetkax RLS // Voprosy' radioelektroniki. 1986. № 8. S. 3–13.
- Baxrax L.D., Bliskaviczkij A.A. Metody' avtomaticheskogo vy'ravnivaniya e'lektricheskix dlin kanalov i stabilizacii fazy' v AFAR SVCh s volokno-opticheskoy sistemoj razvodki signalov // Voprosy' radioelektroniki. Ser. «Obshchie voprosy' radioelektroniki». 1988. № 1. S. 3–13.

11. Baxrax L.D., Bliskaviczkij A.A. Gibridnaya SVCh volokonno-opticheskaya sistema raspredeleniya signalov v aktivnoj FAR // Radiotexnika. 1990, № 9. S. 62.
12. Baxrax L.D., Bliskaviczkij A.A. Krupnoaperturny'e aktivny'e FAR SVCh s volokonno-opticheskoy sistemoj raspredeleniya i obrabotki signalov // Voprosy' radioelektroniki. Ser. «Obshchie voprosy' radioelektroniki». 1990. № 10. S. 3–18.
13. Baxrax L.D., Bliskaviczkij A.A. Optomikrovolnovy'e metody' formirovaniya izlucheniya sverxshirokopolosny'x antenn // UFN. 1992, T. 162. № 12. S. 160–164.
14. Bratchikov A.H., Grinev A.Yu. Volokonno-opticheskie sistemy' raspredeleniya i obrabotki signalov antenn'y x reshetok // Radioelektronika. Izvestiya VUZov. 1989. T. 32. № 2. S. 19–31.
15. Bratchikov A.H., Gluxov I.P., Kurnosov V.D. Vnutrennaya modulyacziya inzhekczionny'x lazerov v volokonny'x kanalakh razvodki SVCh-signalov // Radioelektronika. Izvestiya VUZov. 1991. T. 34. № 3. S. 12–18.
16. Bratchikov A.H., Gluxov I.P. Analiz spektral'ny'x xarakteristik radiosignalov na vy'xode odnomodovogo volokonnogo kanala interferencionnogo tipa // Radioelektronika. Izvestiya VUZov. 1991. T. 34. № 5. S. 28–33.
17. Bratchikov A.N., Gluxov I.P. Analiz spektral'ny'x xarakteristik radiosignalov na vy'xode mnogomodovogo interferencionnogo volokonno-opticheskogo kanala // Kvantovaya elektronika. 1992. T. 19. № 2. S. 197–202.
18. Avt. svid-vo № 1734223. SSSR. 1992. Volokonno-opticheskaya liniya peredachi SVCh-signala / Bratchikov A.H., Plotniczkij C.O., Zemczov G.P.
19. Avt. svid-vo № 1748266. SSSR. 1992. Volokonno-opticheskaya liniya peredachi SVCh-signala / Bratchikov A.N., Plotniczkij S.O., Zemczov G.P.
20. Coppinger F. etc. Nonrecursive tunable photonic filter using wavelength-selective true time delay // Photonics Technology Letters. 1996. V. 8. № 9. P. 1214–1216.
21. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wide-band microwave photonic phase and frequency shifter // Transactions on microwave theory and technique. 1997. V. 45. № 6. P. 1003–1006.
22. Riza N.A., Madamopoulos N. All-fiber connectorized fiber-optic delay module using 3-D polarization optics // Conference Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting. LEOS '97. 10th Annual Meeting. 1997. V. 2. P. 472–473.
23. Bowers J. Devices for microwave photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics. MWP '96. Technical Digest. 1996. V. 2. P. 29–32.
24. Romfin J.E., Esman R.D., Tavik G.C., Livingston M. and Parent M.G. Photonic Remoting of AN/SPQ-9B ADM Ultra High Dynamic Range Radar // IEEE Radar Conference. Dallas. May 1998.
25. Grigor'yancz V.V., Dvornikov A.A., Il'in Yu.B., Konstantinov V.N., Prokofev V.A., Utkin G.M. Generaciya radiosignalov v sisteme «lazer – opticheskaya liniya zaderzhki» // Kvantovaya elektronika. 1984. T. 11. № 4. S. 766–775.
26. Pat. RF № 1506508, opublikovan 07.09.1989 / Belov L.A., Borczov A.A., Grigor'yancz V.V., Il'in Yu.B., Konstantinov V.N., Korolev I.L.
27. Borczov A.A., Grigor'yancz V.V. I dr. Chastotny'e fazovyye xarakteristiki avtogeneneratora s volokonno-opticheskoy liniej zaderzhki // Sb. dokl. «Stabilizaciya chastyot». M. 1986. S. 63–67.
28. Ginevskij S.P., Kotov O.I., Nikolaev V.M., Poverinov M.S., Sulejman Abu-Gazali Optoelektronnyj izmeritel'nyj avtogenenerator s volokonny'm interferometrom v czepi obratnoj svyazi // Zhurnal texnicheskoy fiziki. 1995. T. 21. № 15. S. 20–28.
29. Bratchikov A.N. and Sheremet A.P. Optical amplifiers on the basis of Er-doped fibers: present state // Modeling, Measurement & Control, A. AMSE Press, Tassin-la-Demi-Lune, France. 1994. V. 54. № 3. P. 1–25.
30. Bratchikov A.N., Voskresensky D.I. and Garkusha S.A. High frequency characteristics of directly modulated injection laser // Modeling, Measurement and Control, A. AMSE Press (France). 1994. V. 54. № 3. P. 27–37.
31. Pat. RF № 2119719, opublikovan 27.09.1998. Ustrojstvo dlya stabilizaczii fazy' peredavaemogo po VOLS vy'sokochastotnogo analogovogo signala / Zajczev D.F.
32. Jäger D., Stöhr A. Microwave Photonics // 31st European Microwave Conference. 2001. P. 1–4.
33. Malcoci A. etc. Photonic (sub)millimeterwave local oscillators // 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON-2002. V. 3. P. 722–734.
34. Riza N.A., Arain M.A., Khan S.A. Hybrid analog-digital variable fiber-optic delay line // Journal of Lightwave Technology. 2004. V. 22. № 2. P. 619–624.
35. Funk E.E., Bashkansky M. Microwave photonic direct-sequence transmitter and heterodyne correlation receiver // Journal of Lightwave Technology. 2003. V. 21. № 12. P. 2962–2967.
36. Wojtyra P., Galwas B. Photonic microwave filters // International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications. MIKON-2006. P. 922–925.
37. Chan E.H.W., Minasian R.A. Photonic RF phase shifter and tunable photonic RF notch filter // Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. № 7. P. 2676–2682.
38. Zhigang Liu etc. Photonic true time delay using air-guiding photonic bandgap fibers // Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference. CLEO/QELS-2006. P. 1–2.
39. Yao J. Microwave photonics // Journal of Lightwave Technology. 2009. V. 27. № 3. P. 314–335.
40. Bratchikov A.N. Fazostabil'ny'e volokonno-opticheskie sistemy' peredachi i raspredeleniya antenn'y x signalov SVCh- i KVCh-diapazonov. Dis. ... dokt. texn. nauk. M.: 2001. 373 s.
41. Pospelov A.N. Optoradioelektronny'e modulyatory' millimetrovyy' voln. Dis. ... kand. texn. nauk. Tomsk: 2002.
42. Baxrax L.D., Zajczev D.F. Eksperimental'noe issledovanie maketa mnogokanal'noj volokonno-opticheskoy fazostabil'noj razvodki SVCh-signalov // Trudy' vtorogo nauchno-texnich. simpoziuma «Elektronnoe upravlenie luchom v bortovyx radiolokacionnyx kompleksax». Ryazan'. 2002. S. 102–104.
43. Baxrax L.D., Zajczev D.F., Ostrovskij A.G. Osobennosti primeneniya fotoniki v AFAR // Trudy' vtorogo nauchno-texnich. simpoziuma «Elektronnoe upravlenie luchom v bortovyx radiolokacionnyx kompleksax». Ryazan'. 2002. S. 114–117.
44. Baxrax L.D., Zajczev D.F. Eksperimental'noe issledovanie maketa mnogokanal'noj sverxshirokopolosnoj fazostabil'noj volokonno-opticheskoy razvodki SVCh-signalov i sverxkorotkix impul'sov // Antenny'. 2003. № 5. S. 3–6.
45. Baxrax L.D., Zajczev D.F. Fazirovannyye antenn'y x reshetki na osnove raspredelenyyx opticheskix antenn'y x modulej // Doklady' RAN. 2004. T. 394. № 4. S. 465–468.
46. Baxrax L.D., Zajczev D.F. Perspektivny'e primeneniya analogovoj fotoniki v radiolokacionnyx sistemax // Antenny'. 2004. № 8–9. S. 134–138.
47. Zajczev D.F. Ustrojstva analogovyyx fotonnyx setej v apparature AFAR. Dis. ... dokt. texn. nauk. M.: 2005. 194 c.

48. Pat. RF № 2298810. MPK G01S13/66, opubl. 10.05.2007. Priemo-peredayushhij optoe'lektronnyj modul' AFAR / Zajczev D.F.; byul. № 13.
49. Dorochev A.V., Usachev V.A. O texnologii priemo-peredayushhix modulej radioopticheskix czifrovyyx FAR dlya perspektivnyx RLS // Vestnik MGTU im. N.E'. Baumana. Ser. «Priborostroenie». 2009. S. 68–77.
50. Falessi C. etc. From RADAR to NODAR // Radar Conference. RADAR'08. 2008. P. 1–6.
51. Hamidi E. Photonic processing of ultra-broadband radio frequency waveforms // A Dissertation Submitted to the Faculty of Purdue University. West Lafayette. Indiana. 2010. 146 p.
52. Laghezza F. etc. Reconfigurable radar transmitter based on photonic microwave signal generation // Proc. of the 7th European Radar Conference. 2010. P. 336–339.
53. Laghezza F. etc. Reconfigurable radar transmitter based on photonic microwave signal generation // International Journal of Micro-wave and Wireless Technologies. 2011. № 3(3). P. 383–389.
54. Ghelfi P. etc. Novel Architecture for a Photonics-Assisted Radar Transceiver Based on a Single Mode-Locking Laser // Photonics Technology Letters. 2010 V. 23. № 10. P. 639–641.
55. Ghelfi P. etc. Ultra-stable radar signal from a photonics-assisted transceiver based on single mode-locking laser // Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and the National Fiber Optic Engineers Conference. 2011. P. 1–3.
56. Ghelfi P. etc. Phase Coding of RF Pulses in Photonics-Aided Frequency-Agile Coherent Radar Systems // Journal of Quantum Electronics. 2012. V. 48. № 9. P. 1151–1157.
57. Ghelfi P. etc. Photonic Generation of Phase-Modulated RF Signals for Pulse Compression Techniques in Coherent Radars // Journal of Lightwave Technology. 2012. V. 30. № 11. P. 1638–1644.
58. Bogoni A. etc. PHODIR: Photonics-based fully digital radar system // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 25–28.
59. Clark T.R., Waterhouse R. Photonics for RF Front Ends // IEEE Microwave Magazine. 2011. V. 12. № 3. P. 87–95.
60. Peng Huei Lim etc. Microwave photonics research for defense applications in Singapore // International Topical Meeting on Microwave Photonics & Microwave Photonics Conference. Asia-Pacific. MWP/APMP. 2011. P. 417–420.
61. Slow and Fast Light in Semiconductor Optical Amplifiers for Microwave Photonics // Applications Advances in Optical Amplifiers / Pod red. P. Urquhart. InTech. 2011. Chapter 9. P. 179–204.
62. Tzu-Fang Tseng etc. High-resolution 3-dimensional radar imaging based on a few-cycle W-band photonic millimeter-wave pulse generator // OFC/NFOEC Technical Digest. 2013. P. 1–3.
63. Capmany J. etc. A microwave photonics transistor // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 190–193.
64. Marpaung D., Eggleton B.J. Nonlinear integrated microwave photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2013. P. 84–87.
65. Scott Rodgers J. Technologies for RF photonics in wideband multifunction systems // IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). 2013. P. 7–8.
66. Yamei Zhang, Fangzheng Zhang, Shilong Pan A microwave photonic system with switchable functions based on cascaded polarization modulators // 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 2014. P. 1–3.
67. Yamei Zhang etc. An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation // Optics express. 2014. V. 22. № 4. P. 3761–3765.
68. Shilong Pan, Yamei Zhang Microwave photonic signal processing based on polarization modulation // Photonics Conference (IPC). 2014. P. 210–211.
69. Zhenzhou Tang, Shilong Pan A reconfigurable photonic microwave mixer // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) and the 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP). 2014. P. 343–345.
70. Mathur M., Sridhar N., Rai J.K. Design and analysis of RF signal distribution over optical fiber for active aperture radar // International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). 2014. P. 354–357.
71. Piqueras M.A. etc. Photonic front-end for the next-generation of space SAR applications // Proc. of the 10th European Microwave Integrated Circuits Conference. 2015. P. 301–304.
72. Zhuravleva O.V., Ivanov A.V., Isaev D.S. i dr. Aktivnaya volokonno-opticheskaya liniya zaderzhki signalov SVCh-diapazona // Microwave & Telecommunication Technology. CriMiCo 2007. 17th International Crimean Conference. S. 907–908.
73. Kosticzkij S.M. Sozdanie nauchno-tehnologicheskoy bazy' integral'noj i volokonnoj optiki // Otchet po NIR. Nomer granta (kontrakta): 02.527.11.9017 ot 26.11.2007. URL = <http://elibrary.ru/item.asp?id=18072992>.
74. Pat. RF № 2390073, opublikovan 20.05.2010. Opticheskiy generator SVCh-impul'sov / Perepelczy'n Yu.N.; byul. № 14.
75. Pat. RF № 2436141, opublikovan 10.12.2011. Optoe'lektronnyj generator signalov SVCh-diapazona / Belkin M.E., Belkin E.M.; byul. № 34.
76. Pat. RF № 2454759, opublikovan: 27.06.2012. Fazovrashhatel' / Yakovlev M.Ya., Czukanov V.N.; byul. № 18.
77. Vol'xin Yu.N., Mandrik A.M., Nosov Yu.I. O perspektivax ispol'zovaniya metodov i sredstv mikrovolnovoj fotoniki v sverxshirokopolosnoj radiolokaczii i sverxshirokopolosnoj radiosvyazi // Sb. dokladov Mezhdunar. nauchno-tehnich. konf. FGUP «Omskij nauchno-issledovatel'skij institut priborostroeniya». Omsk. 2011. S. 322–329.
78. Bevzyuk I.A. R&D-strategiya: Operedit' konkurenta // Intellekt & Texnologii. 2012. № 3(4). S. 21–23.
79. Materialy' V Obshheros. nauch.-texn. konf. «Obmen opy'tom v oblasti sozdaniya sverxshirokopolosnyx sistem». Omsk. 2014. URL = http://www.ckba.net/media/files/2014_11_06_sbork.pdf.
80. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I. Diagrammoformiruyushhie sxemy' dlya priemnyx FAR SVCh-diapazona na osnove komponentov analogovyx volokonno-opticheskix linij // Vseros. nauch.-texn. konf. «E'lektronika i mikroe'lektronika SVCh». Sankt-Peterburg. 2014. S. 503–508.
81. Borcov A.A. Optoe'lektronnyj generator s nakachkoj kvantovorazmernym lazernym diodom. Dis. ... dokt. texn. nauk. M.: 2014. 402 s.
82. Nurgazizov M.R. Optiko-e'lektronnye sistemy' izmereniy mgnovennoj chastyoty' radiosignalov SVCh-diapazona na osnove amplitudnofazovogo modulyacionsnogo preobrazovaniya opticheskoy nesushhej. Dis. ... kand. texn. nauk. Kazan': 2014. 166 s.
83. Shulunov A.N. Primenenie radiofotoniki v radiolokaczii // Materialy' Mezhdunar. Kry'mskoj konf. KRY'MIKO. Sevastopol'. 2014.
84. Mityashev M.B. K realizaczii texnologij radiofotoniki v AFAR radiolokaczionnyx kompleksov // Vestnik SibGUTI. 2015. № 2. S. 178–190.
85. Golov N.A. i dr. Osobennosti i principial'nye preimushhestva e'lementnoj bazy' radiofotoniki pri sozdaniu sverxshirokopolosnyx RLS na baze FAR i AFAR // Antenny'. 2016. № 3. S. 19–25.
86. Golov N.A. i dr. Sistemy' optoe'lektronnogo raspredeleniya i obrabotki signalov dlya sozdaniya radiofotonnyx RLS s AFAR // Materialy VI Obshheros. nauchno-tehnich. konf. «Obmen opy'tom v oblasti sozdaniya sverxshirokopolosnyx radioe'lektronnyx sistem». Omsk: Izd-vo OmGTU. 2016. S. 112–136.