

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ РАДИОФОТОНИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОЛОКАЦИИ

Р. П. Быстров, С. А. Соколов, В. А. Черепенин

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 23 марта 2017 г., после доработки – 3 мая 2017 г.

Аннотация. В статье излагаются направления возможного применения в радиолокации систем и устройств на основе радиофотоники. Показан физический смысл перехода к радиофотонике от нанофотоники. Приводятся материалы с обоснованием применения радиофотоники для функциональных устройств РЛС и наиболее перспективные области для её приложений.

Ключевые слова: фотоника, радиофотоника, радиолокационные системы и устройства, приемо-передающие модули, фазированные антенные решетки.

Abstract. It is noted that during rapid development of radio-electronic equipment of the future, within basic and basic researches in the field of radiophysics and radio electronics exclusively considerable progress is received in the development of radar-tracking systems of detection (recognition and radio-vision), maintenances, targetings including with the phased antenna lattices in which basic elements will be created with the use of the principles of radio photonics.

Practical experience of development of devices of radio photonics for application in the radar equipment and the main scientific positions of modern opportunities and prospects of development of radio photonics applying to radar-location is considered. Results of theoretical and pilot studies of application of radio photonics for devices of functioning of RLS are covered, including: basic principles (directions) of use of new area of researches of radio photonics; radio photon decisions at their application in RLS in the field of their improvement in the subsequent the directions; stage-by-stage sequence of creation of RLS and systems of information processing on the basis of digital radio photonics from photonics to radio photonics.

Separate examples of modern use of radio photon devices in modern aviation complexes are given. The most perspective directions where the positive result of application in a radar-location of systems and devices on the basis of radio photonics can be received are shown in the conclusion.

Keywords: photonics, radio photonics, radar-tracking systems and devices, send- and receive modules, antenna array.

1. Общие положения

Общеизвестно, что в настоящее время в рамках развития перспективной радиоэлектронной техники и технологий, в плане фундаментальных и поисковых исследований в области радиофизики и радиоэлектроники, имеются значительные успехи в развитии радиолокационных систем обнаружения (распознавания, радиовидения), сопровождения, целеуказания и наведения, в которых основные элементы разрабатываются с использованием принципов радиофотоники. Новейшие технологии в области микро- и наноэлектроники позволят уже в 2020-х годах создавать эффективные приемно-передающие устройства и радиолокационные станции нового поколения. Все это может существенно снизить массу аппаратуры, увеличить ее надежность и КПД, а также на порядки повысить скорость сканирования и разрешающую способность [1-5].

Цель настоящей статьи - осветить возможные направления применения в радиолокации систем и устройств на основе радиофотоники.

Как отмечается в [1-3,6], использование основ нанофотоники и радиофотоники обеспечит качественный скачок в развитии техники и технологий в радиолокации и ряде других областей.

Следует отметить, что радиофотоника, изучающая взаимодействие оптических и СВЧ-сигналов, позволяет создавать электронные устройства с параметрами, недостижимыми с применением традиционных средств. Сверхширокополосные аналоговые линии связи на ВОЛС, линии задержки, а также использующие элементы радиофотоники фильтры, генераторы и другие

устройства СВЧ-диапазона находят применение в системах РЭБ и в радиолокационных станциях обнаружения и наведения.

В настоящей статье на основе [6] рассматривается практический опыт разработки устройств радиофотоники для применения в радиолокационной аппаратуре, а также возможности и перспективы развития радиофотоники применительно к радиолокации.

Целесообразно также отметить и то, что переход к радиофотонике происходит от основ нанофотоники.

Временные рамки перехода на радиофотонные устройства в представляющих интерес областях приведены ниже (по [3,5-9]). При этом целесообразно отметить, что основными этапами в развитии антенных систем и устройств следует считать:

1) Для РЛС (Многофункциональные антенные системы РЛС– 2010-2017 г.г.):

- активная ФАР (полоса $< 1\%$) – 2002-2009;
- активная ФАР (полоса $< 10\div 30\%$) – 2005-2012;
- активная ФАР (двухдиапазонная) – 2008-2015;
- цифровая антенна – 2014-2018;
- системы для БПЛА – 2017-2020.

2) Системы РЭП:

- активные ФАР ($2\div 6-18$ ГГц) -2002- 2008;
- высокоскоростные поисковые РПУ -2006 -2012.

Далее, приведем материалы применения радиофотоники для устройств функционирования РЛС, включая: основные принципы (направления) использования новой области исследований радиофотоники; радиофотонные решения при их применении в РЛС в области их совершенствования и поэтапную последовательность создания РЛС и систем обработки информации на основе цифровой радиофотоники (от фотоники к радиофотонике), а также отдельные примеры современного применения радиофотонных устройств в авиационных комплексах.

В заключение покажем наиболее перспективные, на наш взгляд, области применения, где положительный результат может быть достигнут уже в течение ближайших нескольких лет [3,6].

2. Применение радиофотоники для устройств в РЛС

Оптоэлектронные схемы и архитектуры для генерации СВЧ сигналов (от 1 до 20 ГГц) с низкими фазовыми шумами. Типовое значение модуляторов для генератора, используемого в РЛС X-диапазона – -140 дБн/Гц при отстройке 10 кГц. (рис. 1).

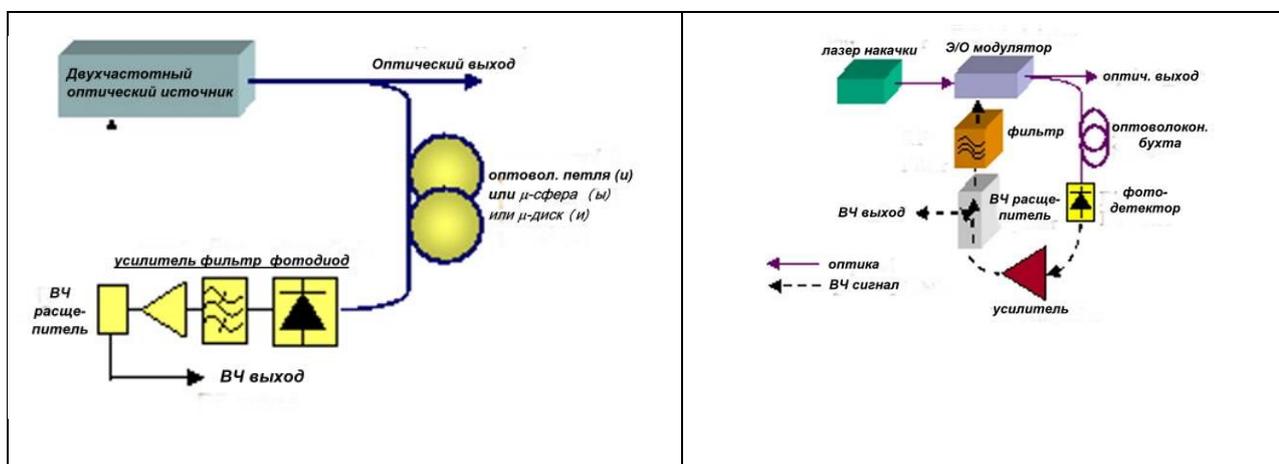


Рис. 1. Схемные варианты модуляторов с оптическим входом и СВЧ выходом [3,6]

Важное значение при этом имеет резонатор Фабри-Перо со слоем из метаматериала (рис.2).

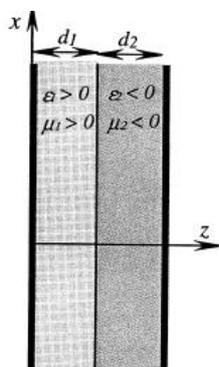


Рис. 2. Вариант резонатора Фабри-Перо

Математически это объясняется следующей зависимостью фазового сдвига волны после прохождения пластин

$$\phi_{\tilde{n}} = 2\pi\nu L_{opt} / \tilde{n}, \text{ где } L_{opt} = n_1 d_1 + n_2 d_2 ,$$

Условия резонанса $\varphi_c = \pi q$ выполняются при

$$\nu q = c q / 2L_{opt}; \quad q = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

L_{opt} может быть равна нулю в метаструктуре:

$$n_1 d_1 - |n_2 - d_2| = 0; \quad \varphi_c = 0$$

Размеры резонатора могут быть меньше, чем $\lambda/2$.

Дисперсия $n(\omega)$ определяет резонансную частоту.

Например, если $n_1=1, n_2=-1$, то для частоты 2 ГГц $d_1 = d_2 = \lambda/10$ и $L=1,5\text{см}$, а если $n=1$, то $L=7,5\text{см}$.

Весьма важны волноводные линии из обычных и «левых» линз с отрицательной рефракцией. Периодическая фокусировка при волноводном распространении волны показана на рис. 3. Видно, что линзы меняют кривизну волнового фронта.

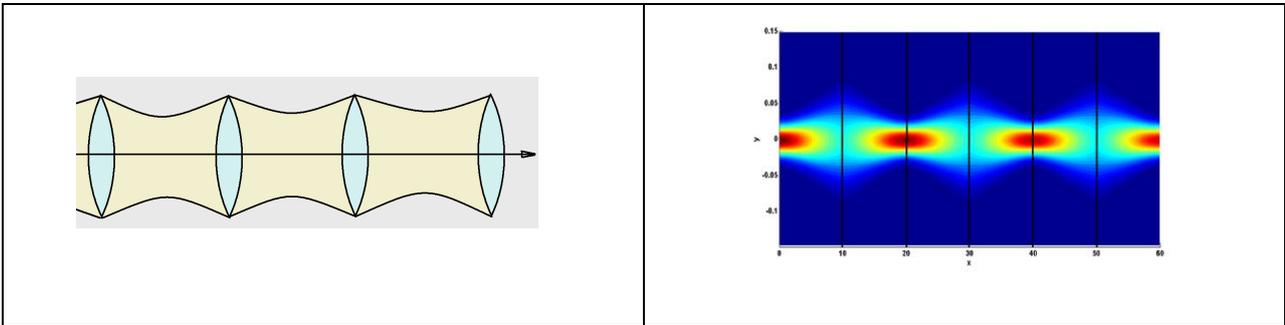


Рис.3. Линза для периодической фокусировки.

На рис. 4 показана слоистая структура с метаматериалом - аналог линзовой фокусирующей линии.

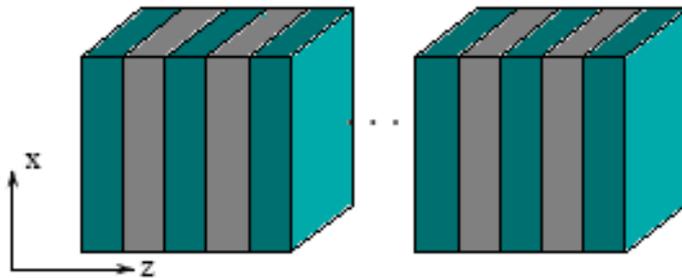


Рис. 4. Аналог линзовой линии.

Знака коэффициента дифракции от слоя к слою изменяется так:

$$D_j = \frac{\lambda_0}{4\pi n_j}, \quad \text{sign}(n_j) = (-1)^j$$

Отметим также линии задержки на медленном свете в фотонном кристалле.

На рис. 5 приведен пример устройства, обеспечивающего замедление света при использовании оптических буферов вместо длинных волоконных петель.

Ниже приведено выражение для показателя групповой скорости, которое учитывает как временную, так и пространственную дисперсию $n_g = 1000$.

$$n_g = \frac{n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}}{1 - \frac{\omega}{c} \frac{\partial n}{\partial k}}$$

Можно констатировать, что применение медленного света позволяет улучшить работу элементов оптической памяти, оптических модуляторов, фазированных антенн, эффективнее управлять оптическими пучками в фотонных кристаллах и других узлах.

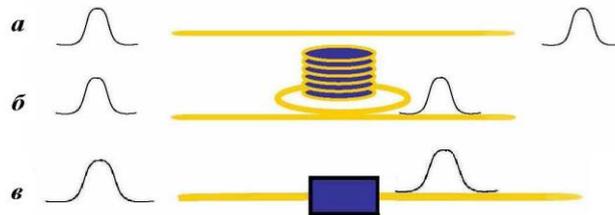


Рис. 5. Варианты замедления света: (а) - распространения оптического импульса в коротком волокне; (б) – задержка импульса в длинной волоконной петле; (в) - замедление импульса в ячейке с малой групповой скоростью.

В работах [3,6] отмечается, что архитектура ФАР при формировании лучей обеспечивает обработку радиосигналов и позволяет динамически реконфигурировать элементы антенных решеток. Распределение аналоговых и цифровых сигналов идет по однотипным волоконно-оптическим линиям связи. Кроме того, постоянно растет влияние пропускной способности межсоединений на производительность в дополнение к постоянно уменьшающимся размерам, увеличению тактовых частот и постоянному

усложнению архитектуры. На рис. 6 - 9 приведены схема узла оптического интерфейса, структура фотонного кристалла, фотография специальной печатной платы и других функциональных узлов.

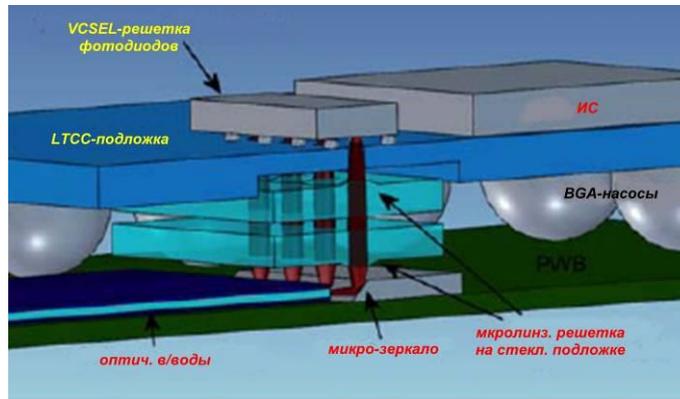


Рис. 6. Схема оптического интерфейса, применяемого для преодоления ограничения электрических интерфейсов, где: LTCC – Low Temperature Co-fired Ceramics, низкотемпературная совместно-обжигаемая керамика. BGA pumps – (серво) насосы (фирмы) BGA.

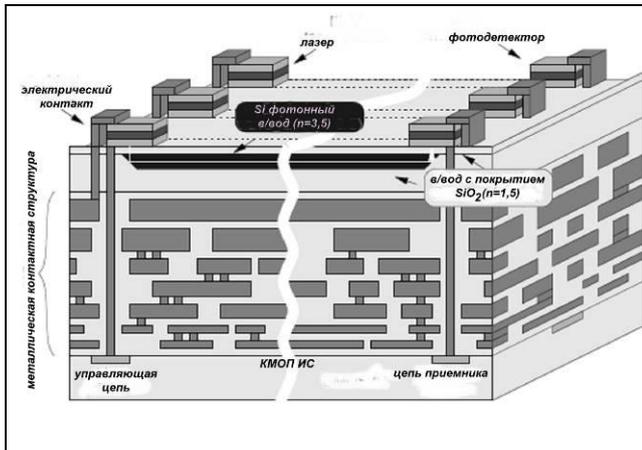


Рис. 7. Схема взаимодействия фотонов внутри кристаллов

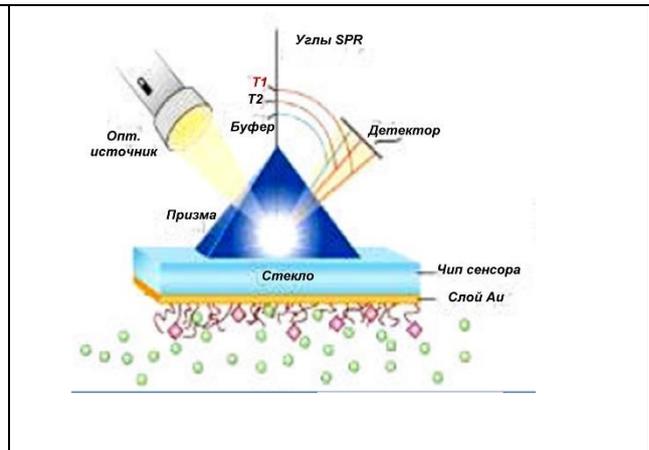


Рис. 8. Схематическое изображение образца экспериментального устройства при микромонтаже

На рис.8 сокращение *SPR* означает - угол поверхностного плазмонного резонанса (surface Plasmon resonance). Аналогом явления его в классической электронике являются хорошо известные аномалии Вуда [7]. Поскольку здесь рассматривается именно классический случай, то и трактовка *SPR* как аномалий Вуда является уместной и более продуктивной.

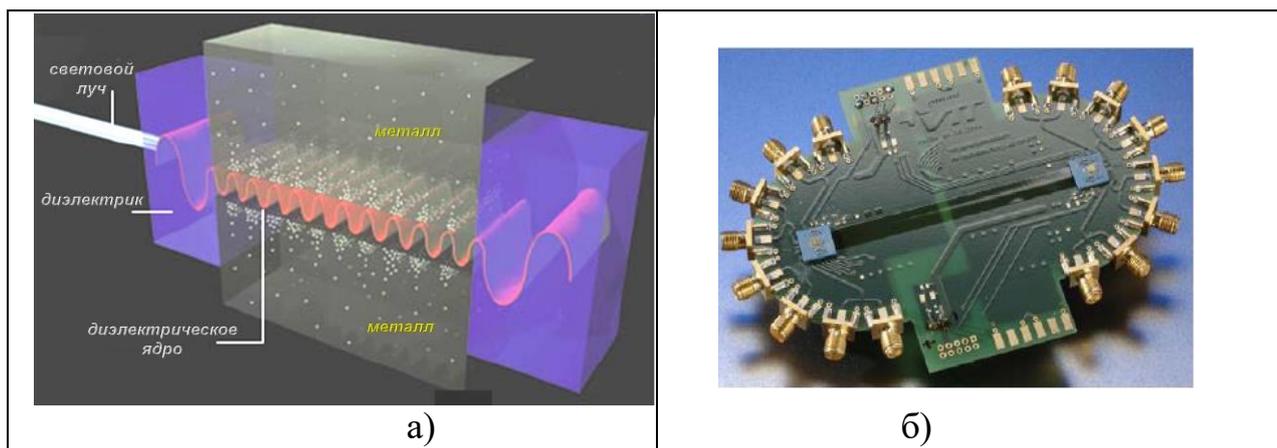


Рис. 9. Новые устройства и датчики на фотонных запрещенных зонах, на принципах фотоники и на принципах плазмоники: а) структурная схема и б) пример практической реализации устройства

3. Основные направления использования

Пути и основные направления использования в области радиофотоники - это, прежде всего, тематика, указанная в [3,6]:

- использование лазерного излучения, модулированного радиосигналом, в задачах приема, передачи и обработки информации;
- создание соответствующей элементной базы для решения задач радиоэлектроники (новые радары, системы связи, системы РЭБ и т.д.).

Основные направления использования радиофотоники для создания радиотехнической аппаратуры приведены схематично на рис. 10.

Как видно из рис. 10, области применения радиофотоники применительно к радиотехническим системам различного назначения могут быть самыми разнообразными. При этом появляются реальные возможности обеспечить:

- высокую помехозащищенность;
- снижение массы и габаритов;
- высокую пропускную способность;
- низкие потери и неравномерности;
- сверхширокополосности сигналов;
- обработку сигналов в реальном времени;

- высокие точность и разрешение.



Рис. 10. Направления использования принципов в области радиофотоники для создания радиотехнической аппаратуры

Далее остановимся на основных принципах и характеристиках применения радиофотоники в конкретных приложениях (подробнее см. [3,6]).

4. Основные характеристики радиофотонных устройства в авиационной радиолокационной технике

1). В качестве аппаратуры РЛС обнаружения авиационных комплексов, в работах [3,6] приводятся следующие.



Рис. 11. Фотография узла подсистемы цифровых интерфейсов

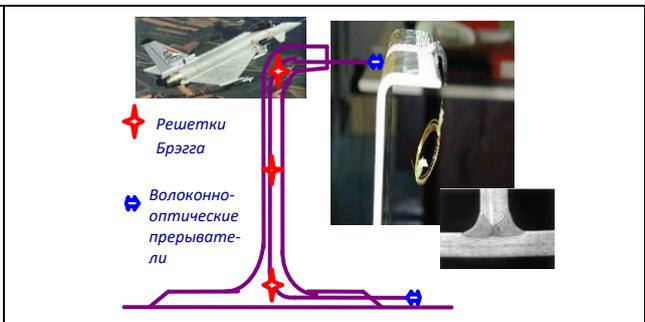


Рис. 12. Схема контроля работоспособности корпуса и двигателей на базе ВОЛС.

<p>Рис. 13. Схема волоконно-оптического гироскопа с фазовой модуляцией</p>	<p>Рис. 14. Фотография бортовой SMART-системы, содержащей волоконные датчики и решетки Брэгга</p>

На рис. 11 приводится один из образцов цифровых интерфейсов, схема бортовой аппаратуры на базе ВОЛС для контроля работоспособности корпуса, двигателя и экипажа (рис.12) и вариант гироскопа, используемого для внутренней диагностики летательных аппаратов (рис. 13).

2). Радиотехнические системы могут включать в себя кроме самой аппаратуры РЛС еще и аппаратуру радиоэлектронного подавления (РЭП). Особо важное место в создании таких радиотехнических систем на основе радиофотоники занимают системы передачи данных, а именно, осуществления помехоустойчивой системы связи. Предполагается, что это будут распределенные волоконные датчики и решетки Брэгга узла SMART (в переводе умный, интеллектуальный) - системы (рис. 14).

	<p>Оптоволоконный сенсор (фильтр) на брэгговской решетке</p>
<p>Рис. 15. Вид АФАР бортовой РЛС.</p>	<p>Рис. 16. Схема волоконной решетки Брэгга</p>

3). Обеспечение эффективного функционирования антенных систем. На рис. 15 приводится вид АФАР бортовой РЛС. Такого типа РЛС на ЛА служит для обработки сигналов и данных при выполнении задач навигации и управления оружием.

На рис. 16 приводится возможный вариант схемы волоконной решетки Брэгга (FOBG – оптоволоконная оптическая решётка).

Для такой схемы с волокном, встраиваемым в композитную структуру аппаратуры, характерно следующее:

- изменениями давления, намерзанием льда и др.;
- при этом несколько датчиков могут быть встроены в одно волокно либо использоваться отдельно;
- возможна сложная разветвленная волоконная система.

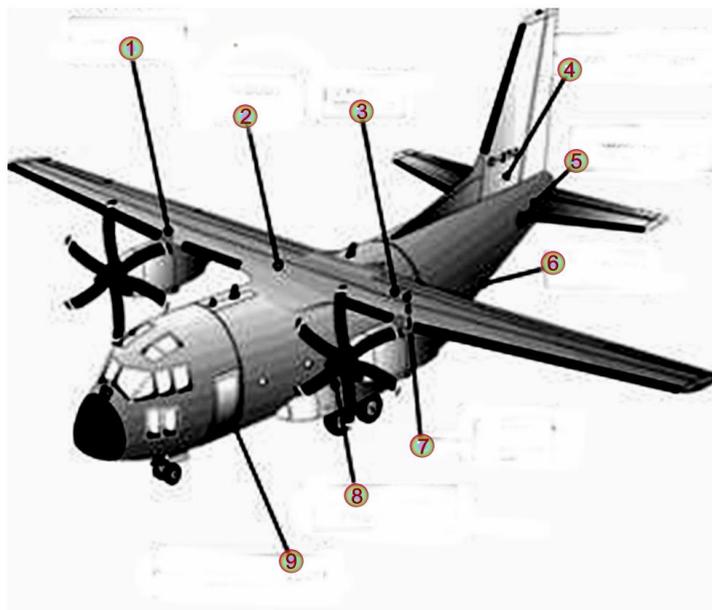


Рис. 17. Схема расположения датчиков Брэгга на транспортном самолете (контролируются напряжения в критических точках)

4) Основные области применения волоконных брэгговских решеток:

- оптические частотные мультиплексоры для телекоммуникационных систем;
- перестраиваемые и фиксированные узкополосные фильтры;
- компенсаторы дисперсии в волоконно-оптических линиях связи;

- частотно-селективные ответвители и устройства вывода света из волокна;
- лазерные диоды с брэгговской решеткой в качестве внешнего отражателя;
- мультиплексные пассивные волоконно –оптические датчики.

Как указанный комплекс аппаратуры может применяться на летательном аппарате, показывается схематично на рис. 17.

В [3-6] показаны пути практического повышения эффективности аппаратуры РЛС в следующих узлах и системах:

а). *АФАР*:

- формирования лучей антенны;
- линий задержки;
- обработки и распределения цифровых/аналоговых сигналов;
- волоконно-оптических интерфейсов передачи данных;
- сверхвысокоскоростных АЦП;
- параллельных оптических вычислителей;
- управления антеннами;
- калибровки антенн.

б). *системы РЭП РЛС*:

- радифотонные АЦП - частота 100 Гвыборок/с, полоса >20 ГГц, разрешение >8 бит;
- передача данных по ВОЛС на скорости >100 Гбит/с;
- фотонный цифровой процессор: частота процессора > 10 ТГц, производительность 10.000 ГФлоп/с.

в). *системы управления и навигации – оптические гироскопы*, достоинство которых заключается в отсутствии движущихся частей: на них не влияет гравитация, им не требуется пространственная стабилизация, снижена их чувствительность к вибрациям, они нечувствительны к ЭМ наводкам. На рис. 18. из [6] показан такой волоконно-оптический гироскоп в сверхминюатюрном исполнении (точность 0,01 град/час).

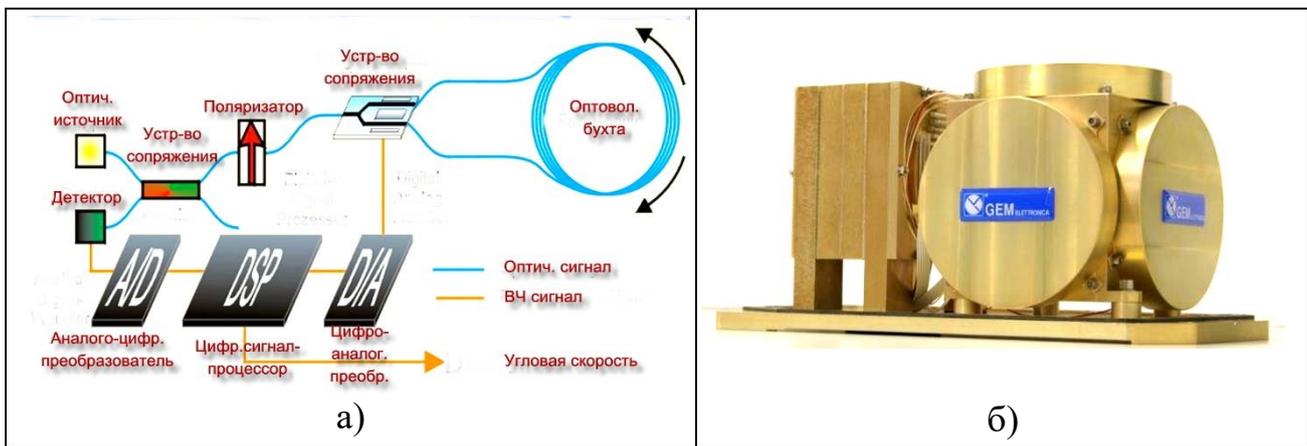


Рис. 18. Волоконнооптический гироскоп: (а) структурная схема; б) внешний вид.

5. Поэтапная последовательность создания РЛС и систем обработки информации на основе цифровой радиофотоники от фотоники к радиофотонике

Ниже представлена поэтапная последовательность создания РЛС и систем обработки информации на основе цифровой радиофотоники от фотоники к радиофотонике.

Первый этап. Фотоника дополняет СВЧ системы, выполняя второстепенные задачи (например, устройств передачи сигналов от антенн (рис. 19).

Второй этап. Фотоника выполняет более сложные системные задачи (рис.20).

а) Параметры радифотонного АЦП:

- частота 100 Гвыборок/с;
- полоса >20 ГГц;
- разрешение >8 бит.

б) Передача данных по ВОЛС на скорости >100 Гбит/с.

в) Фотонный цифровой процессор:

- частота процессора > 10 THz;
- производительность 10.000 ГФлоп.



Рис. 19. Фотография типового устройства передачи сигналов от антенн РЛС

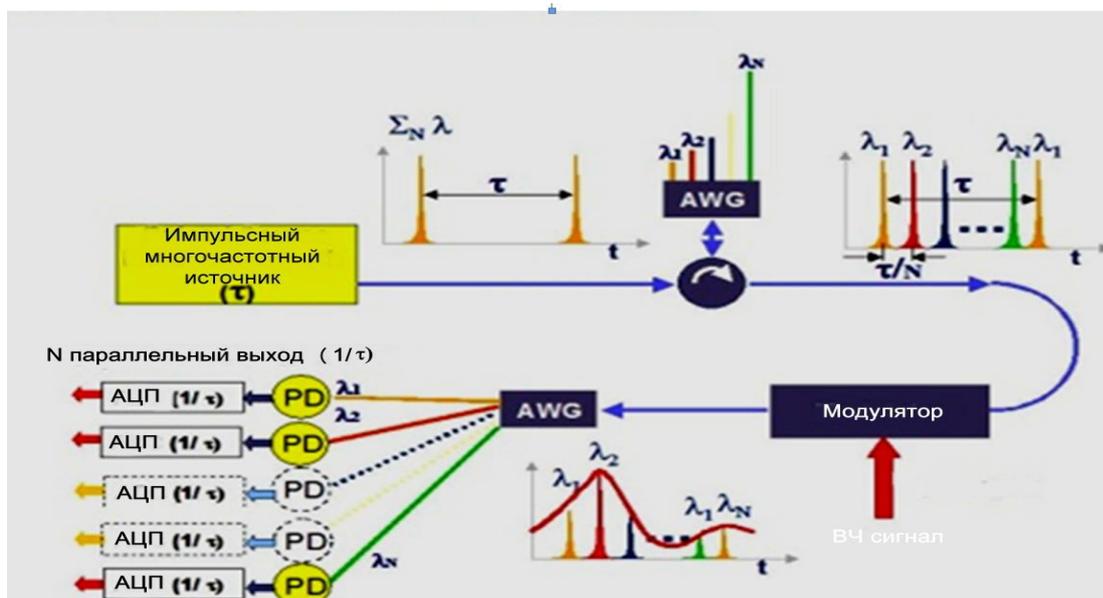


Рис. 20. Схема радиофотонного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).
Здесь: AWG arbitrary waveform generation – генератор сигналов специальной формы, PD – фазовый детектор.

Третий этап. Радиофотонные системы заменяют аналогичные по функциям системы, работающие на СВЧ, и цифровые системы.

Четвертый этап. Фотонные системы интегрируются с СВЧ системами.

Таким образом, анализ приведенных материалов позволяет сделать следующие заключения.

1. Исследования в области нанофотоники привели к возникновению радиофотоники и ее функциональных частей [1-3,6].

2. Наиболее перспективные, на наш взгляд, области применения, где результат может быть достигнут уже в течение ближайших трех-пяти лет:

- развитие принципов модуляции и демодуляции оптических полей СВЧ сигналами частотой до 100 ГГц и выше, разработка соответствующих устройств и технологий;

- разработка принципов создания малошумящих генераторов на базе опто-электронных методов преобразования сигналов;

- создание быстродействующих многоразрядных фотонных ЦАП и АЦП (не менее 50 ГГц);

- разработка принципов сверхскоростной параллельной обработки цифровых сигналов большой разрядности (256 бит и более) по фиксированной программе с помощью опто-электронных технологий и создание прототипов спецпроцессоров опто-электронных устройств;

- разработка принципов создания мощных излучателей микроволнового диапазона на основе опто-электронных преобразователей для радиолокационных систем, исследование возможных характеристик таких устройств и создание прототипов. В перспективе - разработка и создание АФАР.

Целесообразно также в заключение указать основные преимущества радиофотонных устройств, включая [4,5]:

- сверхнизкие потери и дисперсия оптического волокна (менее 0.2 дБ/км на 1550 нм, оптическая несущая ~200 ТГц);

- сверхширокополосность (доступная полоса частот оптического волокна ~50ТГц, полоса частот современных фотодиодов и модуляторов до 100 ГГц и выше);

- низкий уровень фазовых шумов (процесс прямого оптического детектирования с помощью фотодиода не восприимчив к фазе оптического излучения (т.е. к фазе и фазовым шумам оптической несущей);

- невосприимчивость к электромагнитным помехам, отсутствие э/м помех другим устройствам;

- малая масса и размеры оптического волокна и др.

В качестве – основных проблем разработки и применения радиофотонных устройств, - необходимо, среди прочего, отметить следующие:

- амплитудный шум и ослабление, вносимое модуляцией-демодуляцией оптического сигнала (коэффициент шума канала составляет $10 \div 30$ дБ, ослабление до 30 дБ, что заставляет применять малошумящие усилители на входе и линейные усилители на выходе, со всеми их недостатками);

- ограниченный динамический диапазон, связанный с нелинейностью оптических модуляторов и прямой токовой модуляции полупроводниковых лазеров.

Из сказанного можно заключить, что, несмотря на отдельные проблемные вопросы, радиофотоника представляет собой перспективную технологическую основу для многих практических задач, существенно расширяющую области применения и открывающую новые возможности для применения как в радиолокации, так и в целом, в области для электроники в целом.

Литература

1. Зайцев Д.Д., Васильев А.В., Кушнир С.Е., Казин П.Е., Петров Н.А., Третьяков Ю.Д., Янзен М., "Получение магнеторезистивного композита на основе $(La,Sr)MnO_3$ -х из боратного стекла" // Доклады Академии Наук, 2007, 412 (4). –с. 498 – 499.
2. Бутиков Е.И. Оптика. Электронная библиотека <http://www.twirpx.com/file/437325/>.
3. Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Быстров Р.П., Никитов С.А., Черепенин В.А. Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации, Монография. // - М.: Издательство «Радиотехника», 2014. - 479 с.
4. О практике применения радиофотонных устройств в радиолокации, Доклад на II всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО». // Москва 2014.
5. Источник:

<http://www.russianelectronics.ru/leaderr/news/russianmarket/doc/71865/>.

6. Черепенин В.А. Современные возможности и перспективы развития радиофотоники. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. // Доклады на Российских научно-технических конференциях РАН. 2013.

7. Шестопалов В.П. Дифракционная радиоэлектроника. // Издательское объединение «Вища школа», Харьковский гос. Университет, 1976 г.

8. Зайцев Д. Ф. Нанофотоника и ее применение. // - М.: Фирма «АКТЕОН», 2012. – 445 с.

9. Зайцев Д. Ф. Фотоннокристаллические устройства аналоговой нанофотоники // Антенны. - 2008. - Вып. 6., с. 81 - 88.

Ссылка на статью:

Р. П. Быстров, С. А. Соколов, В. А. Черепенин. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>