

РАДИОФОТОНИКА И РАДИОКВАНТОНИКА

О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация. Ставятся проблемы построения мультисенсорных систем, актуальных как в радиофотонике, так и в интегральных микроволновых и квантовых сетях с приложением одномоментного зондирования множества сенсоров, их дискриминации, локализации, повышения чувствительности и точности измерений. Для решения предполагается использование: принципов построения единого поля адресных датчиков, а также зондирование последних излучением генераторов частотной гребенки, синтезированных по методу Ильина – Морозова; статических методов квантового обнаружения и томографии квантовых состояний; трансфера технологий маломодовой радиофотоники в область квантовой сенсорики. В качестве примера выбраны пассивные и активные задачи радиолокационного типа. Дано определение мультисервисных систем радиофотоники и радиоквантоники.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, микроволновые квантовые технологии, нанофотоника, плазмоника, квантовые вычисления и связь, интегрированные микроволновые фотонные и квантовые чипы.

Введение

Квантовые технологии сегодня развиваются беспрецедентно быстрыми темпами. Их применение в области квантовых коммуникаций и процессинга множественны и многообещающи. Не менее важное их приложение – квантовая сенсорика.

Квантовая сенсорика – это широкий термин, охватывающий множество квантовых протоколов, используемых для обнаружения, распознавания и оценки различных факторов и способных превзойти по своим характеристикам классические сенсорные технологии. Квантовые сенсорные технологии используют одиночные и запутанные фотоны, фотоны в сжатых состояниях и др.

Наиболее перспективное направление – интегральные микроволновые квантовые технологии. Если среди интегральных микроволновых квантовых технологий обработки информации можно выделить технологии микроволновой квантовой памяти, то в области сенсорики это микроволновые квантовые технологии решения задач, подобных задачам, решаемым радарными (или микроволновыми квантовыми радарными).

Можно провести аналогию с радиофотоникой, основной целевой функцией развития которой является создание микроволнового фотонного радара. Микроволновая фотоника обеспечивает в сравнении с классическими электронными радарными высокую точность и сверхширокую полосу пропускания, что позволяет гибко генерировать высокостабильные радиочастотные сигналы с произвольным спектром, обнаруживать, принимать и обрабатывать такие сигналы в оптическом диапазоне, а также преобразовывать их цифровую форму без понижения частоты.

Последние достижения в области интегральной фотоники (интегральной с точки зрения технологий изготовления элементной базы) подняли технологии радиофотоники на новую высоту. С одной стороны, возможность обеспечения эффективного взаимодействия света с различными материалами привела к созданию электрооптических модуляторов со сверхмалой и сверхширокой полосой пропускания, синтезаторов частот с малым уровнем фазовых шумов и процессоров для обработки сигналов с высоким спектральным разрешением. С другой стороны, развитие полупроводниковых технологий позволило полностью интегрировать источники света, модуляторы и детекторы в один чип микроволнового фотонного процессора и открыло возможность для создания комплексного сигнального многофункционального процессора, обладающего возможностью реконфигурации при электронном управлении.

Предполагаемое вытеснение сенсоров на основе волоконной оптики сенсорами на основе интегральной фотоники не является свершившимся фактом и, скорее всего это не произойдет и в ближайшие 5-10 лет. Поэтому полноценная разработка сенсорных устройств с оптическим преобразованием информации, к которым относятся датчики на основе как технологий радиофотоники, так квантовой сенсорики, должна проходить в три этапа:

- 1) системный синтез в области радиофотоники;
- 2) экспериментальная реализация в области интегральной фотоники;
- 3) трансфер измерительных технологий на основе методов аналогий в область квантовой сенсорики с учетом общей интегральной элементной базы и особенностей принципов квантовой механики.

1. Современное состояние

В настоящее время квантовые технологии фотоники представляют собой альтернативную, надежную физическую платформу для практической реализации квантовой обработки информации, коммуникаций и сенсорики, в частности, используя преимущества волоконно-оптических систем. Интегральная фотоника, благодаря развитой технологии производства полупроводников интегральных схем, позволяет изготавливать оптические волноводы и функциональные устройства на выпускаемых в массовом количестве компактных чипах. Можно рассматривать это как недорогую и перспективную альтернативу для масштабируемой стабильной генерации неклассических оптических состояний и их обработки, обладающую большим потенциалом коммерциализации. Преобразование оптического излучения строго синхронизированных частотных гребенок в микроволновом диапазоне позволит передавать данные мультиплексированно на терагерцовых частотах, что позволит осуществить прорыв в развитии технологий беспроводных коммуникаций.

Таким образом, положительное решение задач по созданию интегральных квантовых технологий на основе трансфера технологий маломодовой радиофотоники и элементной базы интегральной микроволновой фотоники позволит получить значительный выигрыш в приложении не только задач радиолокационного типа, но и общих задач, стоящих перед информационным обществом.

В РФ создана дорожная карта развития квантовых технологий, подготовленная национальным исследовательским технологическим университетом МИСиС. Документ разделяет соответствующие квантовые технологии на три субтехнологии: вычисления, коммуникации и сенсоры. В направлении квантовых сенсоров работают несколько групп: ВНИИФТРИ, ФИАН, ИЛФ СО РАН, РКЦ и др. Связанные исследования, направленные на

прецизионные измерения, также ведутся в ИФП СО РАН, ИФВЭ РАН, ИЛФ РАН и ряде других институтов. Исследования носят, в основном, фундаментальный характер. Решения прикладных задач пока открыто не рассматривались и в обзоре не упоминались.

На основе результатов системного анализа, полученных различными исследователями, можно определить, что основная парадигма дальнейшего развития интегральных технологий квантовой сенсорики – поиск путей преодоления стандартного квантового предела (СКП) по чувствительности, упрощения структуры интеррогации сенсоров и обеспечения возможности распределенных или квазираспределенных измерений.

СКП соответствует минимально разрешимому сигналу при считывании оптическим полем и определяется суммой дробовых и структурных шумов. Преодоление этого предела позволит существенно повысить метрологические характеристики систем, основанных на технологиях квантовой сенсорики. Проблема интеррогации напрямую связана с определением оценки измеряемого параметра. Система, чувствительная к количеству, которое должно быть измерено, и является сенсором. Данный сенсор при оптическом измерительном преобразовании зондируется оптическим излучением с заданными параметрами, которые изменяются при взаимодействии с ним, например, амплитуда и фаза. Дальнейшее улучшение чувствительности может быть достигнуто, если сможет быть определена оптимальная стратегия измерения. На сегодняшний день почти все существующие демонстрации систем квантовой сенсорики ограничены улучшением характеристик зондирования оптических параметров только одного датчика, но различные задачи зондирования обычно основаны на множестве датчиков, которые работают интегрально в микроволновом и оптическом диапазонах [1] (рис. 1).

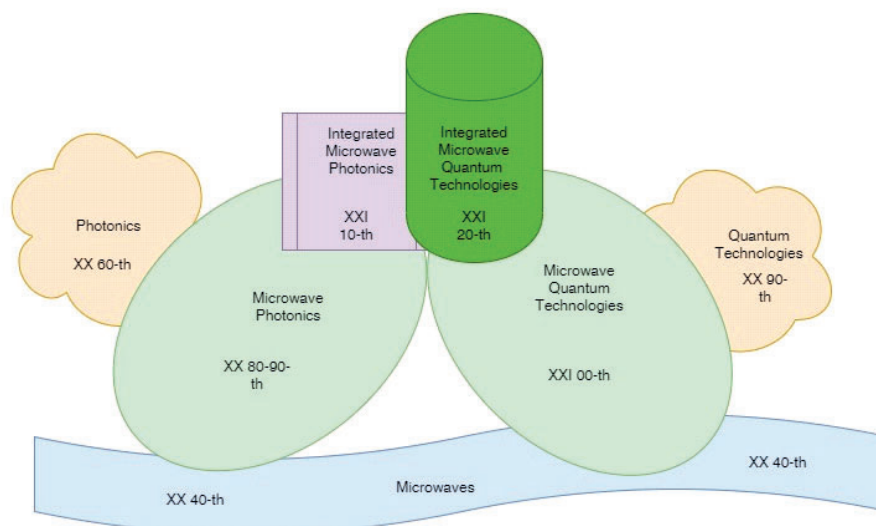


Рис. 1. Формирование интегральных микроволновых фотонных и микроволновых квантовых технологий как перспективных технологий развития сенсорных систем

2. Проблемы и решения радиофотоники

Аналогичные проблемы определены и для систем радиофотоники, особенно в интегральном исполнении. Для их дальнейшего развития необходимо решить проблему отношения сигнал/шум измерений. В этом случае шумы определяются распределением фликкер-

шумов, дробовых и тепловых шумов, к которым добавляются и структурные низкочастотные шумы элементов системы, например, лазеров. Развитие интеррогаторов на основе радиофотоники существенно упростило скорость получения информации, однако их стоимостная реализация не выдерживает никакой критики, несмотря на развитие технологий. Известные реализации также касаются примеров использования радиофотонных технологий опроса только для одного, максимум двух сенсоров. Развитие интегральных технологий на основе кремния, арсенида галлия, фосфата индия вызвало взрывной интерес к созданию устройств на их основе. Однако при наличии значительного количества положительных результатов осталась не снятой проблема синтеза систем и их анализа на системном уровне.

Для радиофотоники нами найден ряд решений квантовых задач радиолокационного типа.

Среди предложенных к решению радиолокационных задач были выделены активные и пассивные задачи [1]. К активным относятся задачи локализации и определения характеристик слабоотражающей цели на высокоярком фоне [2, 3], к пассивным – задачи определения угла прихода и измерения мгновенных амплитуды и частоты множества зарегистрированных микроволновых сигналов (распределения амплитуд и фаз поля), а также задача оценки задержки их распространения по волоконно-оптическим линиям, связывающим антенные посты, перед измерением [4, 5].

На рис. 2, а показан радиофотонный радар, разработанный на существующей объемной элементной базе [2], на рис. 2, б – тот же радар, созданный на основе интегральных технологий микроволновой фотоники, на рис. 2, в – схематическое исполнение радиоквантового радара [3]. В том числе показана схема электрооптомеханического (ЭОМ) преобразователя, в котором возбуждаемые СВЧ и оптические резонаторы связаны механическим резонатором. Радиоквантовый конвертер работает следующим образом: ЕОМ передатчик перепутывает микроволновое и оптическое поля, приемный ЕОМ преобразует возвращаемое микроволновое поле в оптическое с выполнением операции сопряжения фаз.

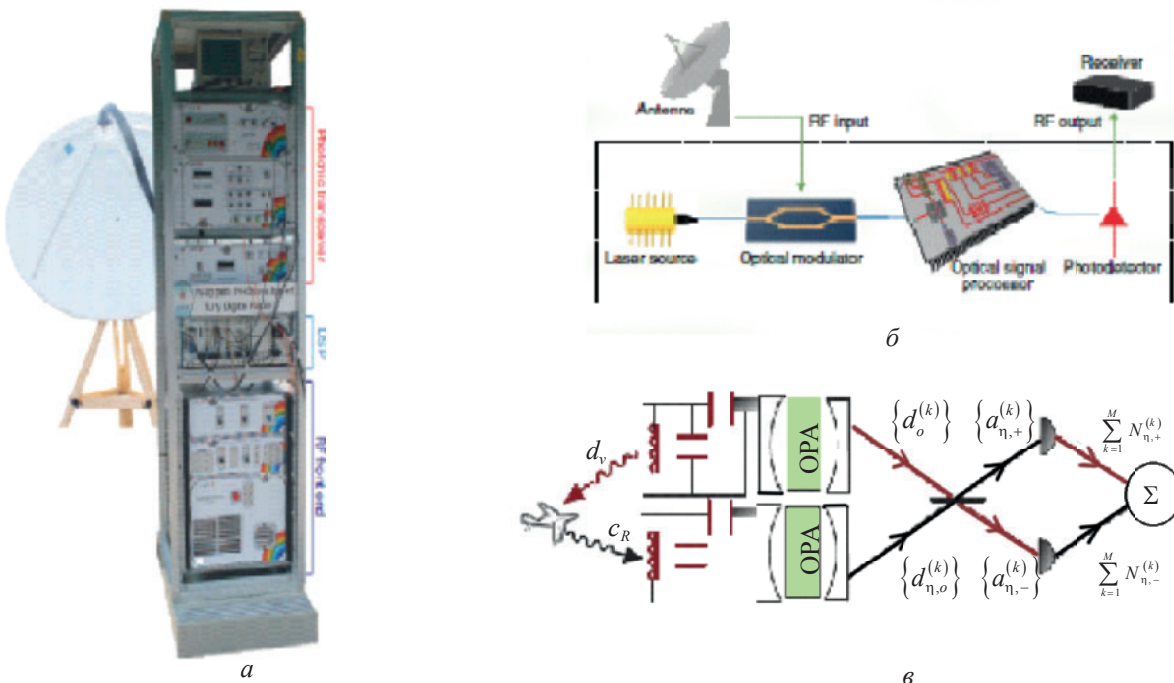


Рис. 2. Трансфер технологий построения радаров: а и б – радиофотонная объемная и интегральная соответственно; в – радиоквантовая [2], [3]

На рис. 3 представлены системотехника и схемотехника решения пассивных радиолокационных задач в квантовой области, к которым относятся определения угла прихода [4], доплеровское изменение частоты, измерения профиля распределения электромагнитных полей в зоне полетов [5].

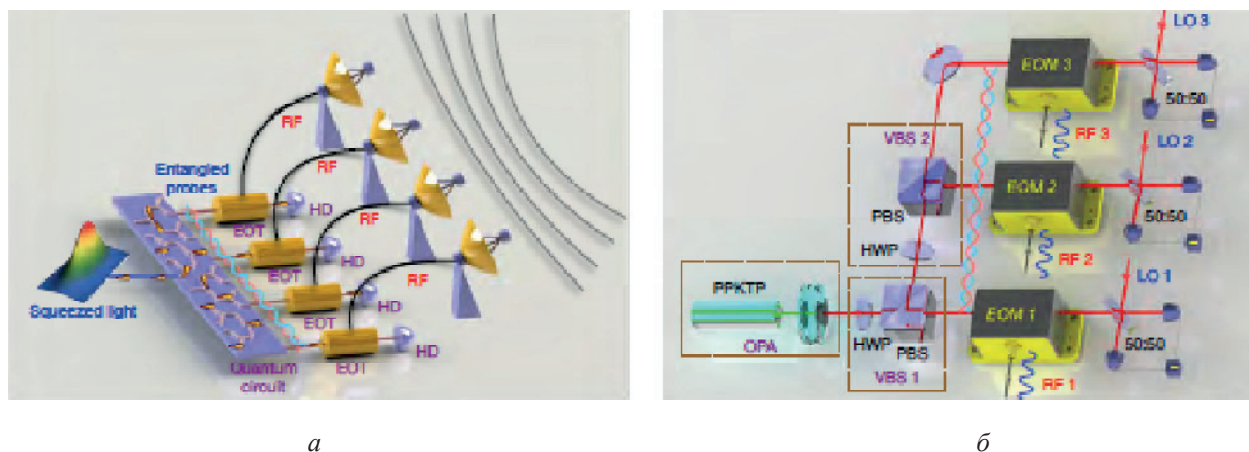


Рис. 3. Измерения профиля распределения электромагнитных полей в зоне полетов [5]:
a – системотехника; *б* – схемотехника

Все найденные решения связаны с использованием запутанных фотонов, а последнее решение является четким представителем сенсоров на основе интегральной микроволновой фотоники.

Научные подходы и методы для решения указанных задач и вероятность достижения их решения основываются на созданной в КНИТУ-КАИ теории маломодовой (двухчастотной) радиофотоники, реализующей оптическое зондирование сенсоров двухчастотным излучением, полученным по методу Ильина – Морозова – преобразования одночастотного когерентного излучения в симметричное двухчастотное. Данное излучение характеризуется наличием двух частотных компонент, жестко связанных по фазе (альтернативно) и равных по амплитуде с подавленным исходным одночастотным излучением. Любое изменение амплитуды и фазы двух частотных составляющих при взаимодействии с различными зондируемыми средами находит отражение в изменении мгновенной амплитуды, фазы и частоты огибающей их биений, по параметрам которой и судят о внешних измеряемых параметрах. При этом указанная частота биений лежит в микроволновом диапазоне ЭМВ, что позволяет использовать их потенциал точностей и разрешающих способностей для измерения различных физических величин, недостижимых при прямых измерительных преобразованиях в оптическом диапазоне. Дополнительным преимуществом является тот факт, что обработка информации на частоте биений ведется в области минимальных шумов фотоприемника, где она и лежит. Это позволяет избавиться от влияния фликкер и дробовых шумов.

В ряде исследований мы называем две указанные частоты «спутанными», что ставит перед нами задачу трансферта технологий для генерации пары спутанных фотонов, разнесенных по частоте с использованием амплитудно-фазовой модуляции, реализованной по методу Ильина – Морозова, и дальнейшего исследования их свойств. Несомненно, это предположение требует строгого доказательства.

Для решения этого вопроса нами был сделан некоторый задел.

3. Решения в области радиоквантоники

Начаты работы по трансферу технологий маломодовой микроволновой фотоники в область технологии квантовых коммуникаций, что нашло отражение в ряде работ, опубликованных в трудах международных конференций SPIE и IEEE [1], вошедших в базы цитирования Scopus и Web of Science. Кроме того, в настоящее время ведется работа по двум грантам РФФИ по программе «Аспиранты» в рамках научного проекта в рамках № 19-37-90057 и по программе BRICS совместно с DST, NSFC и NRF (проект 19-57-80006 BRICS_t). Данные результаты в области квантовых коммуникаций могут быть использованы при синтезировании сетевых решений в задачах квантовой сенсорики.

По результатам решения задач проектов уже опубликованы ряд статей и монографий.

Для достижения цели проекта – создания эффективных микроволновых квантовых сенсорных систем (**систем радиоквантоники**) – нами предложена дорожная карта (2021-2025), включающая в себя:

1. Развитие теории систем маломодовой радиофотоники с целью реализации многоэлементных распределенных сетей, использующих фонон-фотонные преобразования для решения подзадач субмегагерцовой фильтрации, фонон-фотонных генерации и детектирования, передачи микроволновых фононов по классическим и маломодовым оптическим волокнам с мультиплексированием на частотах гребенки в общем классе решения задач радиолокационного типа, в том числе методами и средствами квантовой сенсорики.

2. Симуляция и реализация найденных решений на платформе элементной базы интегральной микроволновой фотоники, ее развитие с оценкой возможности использования в области квантовой сенсорики с учетом необходимости формирования для этого субкилогерцовых линий излучения лазеров с использованием свойств внутренней симметрии излучений, применяемых в маломодовой радиофотонике, и постулатов квантовой механики для пар спутанных фотонов, разнесенных по частоте.

3. Решение задач интегральной микроволновой квантовой сенсорики на платформе расширенной элементной базы интегральной микроволновой фотоники при реализации методов квантовой иллюминации, квантовой гребенки, многочастных микроволновых квантовых систем в общем классе решения задач радиолокационного типа. Сравнительный анализ характеристик интегральных микроволновых и квантовых систем, созданных в ходе выполнения проекта.

Заключение

Надеемся, что эти исследования позволят дополнительно решить задачу статуса пары фотонов, которые получаем по модуляционному методу Ильина – Морозова на нелинейном участке модуляционной характеристики амплитудного модулятора.

Авторы благодарят профессоров КНИТУ-КАИ С.А. Моисеева, Р.Р. Нигматуллина и А.Ф. Надеева за полезные обсуждения и поиск путей решения задач радиолокационного типа методами радиоквантоники с использованием инструментария радиофотоники.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-07-00629.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morozov, O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Z., Kuznetsov A.A. and Gabdulkhakov I.M.* Integrated Microwave Quantum Sensing for Radar Type Problems Decision // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk – Russia. 2020. – Pp. 1 – 6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166102.
2. *Ghelfi, P., Laghezza F., Scotti F., Serafino G., Capria A., Pinna S., Onori D., Porzi C., Scaffardi M., Malacarne A., Vercesi V., Lazzeri E., Berizzi F. and Bogoni A.* A fully photonics-based coherent radar system // *Nature*. – 2014. – Vol. 507. – Pp. 341-345.
3. *Barzanjeh, S., Guha, C. Weedbrook, D. Vitali, Shapiro J.H. and Pirandola S.* Microwave Quantum Illumination // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – Vol. 114. 080503.
4. *Zhuang, Q., Zhuang, J. Preskill and L. Jiang.* Distributed quantum sensing enhanced by continuous-variable error correction // *New Journal of Physics*. – 2020. – Vol. 22. – 022001.
5. *Yi, Xia, Wei Li, William Clark, Darlene Hart, Quntao Zhuang and Zheshen Zhang.* Demonstration of a Reconfigurable Entangled Radio-Frequency Photonic Sensor Network // *Phys. Rev. Lett.* 2020. – Vol. 124. 150502.

MICROWAVE PHOTONICS AND MICROWAVE QUANTONICS

O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev, A.Zh. Sakhabutdinov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx Str., Kazan, Russian Federation

Abstract. The report sets the tasks for multi-sensor systems design, which are acute both in microwave photonics and integrated quantum nets in the problems of one time probing plurality of sensors, its discrimination, localization, and increasing the sensitivity and accuracy of measurements. To solve it, it is supposed, firstly, to use the principles of constructing a unified field of address sensors, and to probe the latter by radiation of comb generators synthesized by Il'in-Morozov's method. Given method consists in generating of two or more «entangled» frequencies based on the amplitude-phase transformation of the optical carrier as in the classical and in the quantum representation – the creation of a pair of entangled photons spaced symmetrically from the suppressed original carrier. Secondly, operations with one-photon fields in realistic conditions is associated with the need to highlight relevant information against the background of inevitably occurring quantum noises, for which static methods of quantum detection and tomography of quantum states have to be used. Thirdly, it is proposed to solve passive and active radar type problems, based on the transfer of few-mode microwave photonics technologies to the field of quantum sensors. For this purpose, system solutions of microwave photonics have to undergo adaptation to integrated platforms in order to create its element base and to use it further for implementing multi-sensor technologies in the integrated quantum field.

Keywords: microwave photonics, microwave quantum technologies, nanophotonics, quantum computing and communication, integrated microwave photonic and quantum chips.

Дата поступления статьи в редакцию 07.05.2021