

УДК 681.782(075.8)

Фотонные технологии в космическом приборостроении

А. К. Пономарев¹, А. А. Романов², А. Е. Тюлин³

^{1,3}к. т. н., ²д. т. н., проф.

¹Сколковский институт науки и технологий (Сколтех),

^{2,3}АО «Российские космические системы»

e-mail: romanov@spacecorp.ru

Аннотация. В статье приведен обзор базовых технологий, в которых применяются или потенциально могут быть использованы изделия фотоники и оптоэлектроники для создания целевой и служебной аппаратуры космических аппаратов (КА) навигации, связи и дистанционного зондирования Земли. Максимально представлен возможный спектр технологических решений, необходимых для обеспечения прецизионного спутникового позиционирования, создания технологий оптической связи, применяемых для обмена информацией на линиях «КА–КА» или «КА–Земля», а также выбора материалов для фотоприемников и измерительных датчиков. Показаны технологические тренды современных и перспективных разработок на базе использования фотонных технологий, обеспечивающих получение рекордных характеристик, соответствующих мировому уровню развития космического приборостроения. В заключении приводятся основные рекомендации по развитию и интенсификации внедрения фотонных технологий в космической отрасли Российской Федерации.

Ключевые слова: фотоника, оптоэлектроника, волоконная оптика и оптическая связь, бортовые шкалы времени, координатно-временное навигационное обеспечение (КВНО), нестабильность частоты, оптические стандарты частоты, малогабаритные атомные часы, оптический гироскоп, кольцевой резонатор на модах «шепчущих волн», фотоприемники, гиперспектральные приборы, фотонные сенсоры

Photonic Technologies in Space Device Engineering

A. K. Ponomarev¹, A. A. Romanov², A. E. Tyulin³

^{1,3}candidate of engineering science, ²doctor of engineering science, professor,

¹Scolcovo Institute of Science and Technology (Scoltech),

^{2,3}Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: romanov@spacecorp.ru

Abstract. The article provides an overview of the basic technologies where products of photonics and optoelectronics are used or potentially can be used to create a target and service equipment of navigation, communication, and Earth remote sensing spacecraft. The possible range of technology solutions needed to ensure precision satellite positioning, creation of optical communication technologies used for information exchange on the lines of “spacecraft-spacecraft” or “spacecraft-Earth”, as well as the choice of materials for photodetectors and measuring sensors is presented. Moreover, technological trends of modern and advanced developments based on the use of photonic technologies, providing record characteristics that meet the global standards in the development of space device engineering are shown. The main recommendations for the development and intensification of the introduction of photonic technologies in the space industry of the Russian Federation are given in the conclusion.

Keywords: Photonics, optoelectronics, fiber optics and optical communications, onboard time scales, coordinate-time and navigation support, frequency instability, optical frequency standards, small-sized atomic clock, optical gyroscope, annular resonator on “whispering waves”, photoelectronic receivers, hyperspectral devices, photon sensors

Введение

Фотоника в последние годы стала одним из важных направлений развития инновационной экономики в разных странах. Развитие этого наукоемкого направления определено также одним из приоритетных направлений развития мировой аэрокосмической индустрии. NASA [1, 2], ЕКА [3], JAXA и космические агентства государств БРИКС [4] целевым образом выделили данное направление в национальных программах создания перспективных космических систем и комплексов различного назначения в качестве приоритетного.

Появление фотоники как научного направления, охватывающего вопросы генерации, сбора, распространения и обработки световых сигналов, само по себе обозначило мощный потенциал для внедрения в создаваемые информационные системы различного целевого назначения, используемые в различных отраслях экономики.

Несмотря на то, что космическая индустрия не имеет огромных объемов серийно выпускаемой наукоемкой продукции, отрасль сама по себе, безусловно, может стать локомотивом внедрения современных фотонных технологий в создаваемые космические комплексы и системы. Данное обстоятельство обусловлено тем, что функционирование космических информационных систем различного целевого назначения обеспечивается процессами генерации, излучения, приема, обработки и передачи электромагнитных сигналов всего спектра электромагнитных волн, начиная от оптического ультрафиолетового и заканчивая микроволновым радиодиапазоном.

Постоянно растущие объемы данных, производимых космическими системами, а также требования по миниатюризации целевой и служебной аппаратуры космических аппаратов определяют настоятельную потребность разработчиков в поиске перспективных технологий, используемых в космическом приборостроении при создании новых видов целевой и служебной аппаратуры.

Востребованность применения фотонных технологий в космических приложениях постоянно возрастает, поскольку с ростом объемов производимой космическими средствами информации инфраструктура генерации, сбора, обработки, усвоения

и доведения оптических данных до конечного пользователя начинает упираться в чисто физические ограничения, связанные с использованием электронов как носителей информации. Фотоника является прямым преемником электроники [5], ее главное отличие состоит в использовании в качестве информационных носителей фотонов, а не электронов. Тем не менее, развитие фотонных технологий во многом повторяет этапы развития электроники. На сегодняшний день фотоника объединяет в себе такие направления, как оптическая фотоника, микрофотоника, нанофотоника и радиофотоника, охватывая диапазон спектра электромагнитных волн от УФ до СВЧ.

В работе [6] показано, что в перспективных системах ДЗЗ объем генерируемых на борту космического аппарата данных возрастет как минимум на три порядка величины как за счет увеличения пространственного разрешения съемочной целевой аппаратуры до субметрового размера, так и из-за использования нескольких тысяч спектральных каналов съемки. Используемые в настоящее время бортовые вычислительные мощности не позволят обеспечить сбор, обработку и обмен данными без применения фотонных технологий.

Отметим, что функциональность, обычно реализуемая одним большим космическим аппаратом, комплексирующим большое количество целевой аппаратуры, в перспективе может быть распределена между некоторым числом взаимодействующих между собой малых аппаратов [7]. Каждый аппарат подобной группировки, разработанный по принципу «спутник-прибор», может иметь различную ограниченную функциональность, однако в целом кластер будет выполнять функции единого аппарата. При этом для поддержания безопасных границ каждого из взаимодействующих элементов требуется совместное управление и синхронизация маневров КА внутри кластера.

Оптические линии межспутниковой связи представляют собой отличный инструмент для решения задач взаимодействия элементов подобной распределенной системы, особенно с учетом необходимости передачи большого количества данных от каждого абонента [8]. Для элементов распределенного космического аппарата, выполняющих роль «основного сервера» и «маршрутизатора»,

потребуется линия связи с пропускной способностью не менее нескольких Гбит/с [9].

При проектировании космических аппаратов для исследования дальнего космоса требуется создать бортовую аппаратуру, удовлетворяющую крайне жестким требованиям по массе, энергопотреблению и геометрическим размерам. Поэтому большие и потребляющие значительную электрическую мощность антенные комплексы размещаются на Земле, чтобы компенсировать ограничения, предъявляемые к бортовой аппаратуре космического аппарата. В соответствии со статьей [10] терминалы оптической связи легче традиционных радиотехнических систем. При условии размещения ретранслирующей станции на МКС или космическом аппарате (вне пределов земной атмосферы) оптическая связь может быть использована как для управления, так и для каналов передачи целевой информации с космических аппаратов, предназначенных для исследований дальнего космоса.

Создание аппаратуры передачи информации в оптическом диапазоне спектра в перспективе позволит практически полностью решить весь комплекс существующих ныне проблем. С одной стороны, появляется техническая возможность значительно (минимум на порядок) повысить пропускную способность бортовых радиолиний, с другой стороны, в оптическом диапазоне спектра могут одновременно работать сразу несколько приборов без ущерба для своей функциональности [11] вследствие отсутствия проблем электромагнитной совместимости.

Современные космические системы и комплексы, используемые для различных народнохозяйственных целей, активно используют методы и средства измерений временных и частотных характеристик регистрируемых ими сигналов. В работе [12] отмечается, что поскольку время и частота являются наиболее часто измеряемыми физическими величинами, то одним из основных приложений современной метрологии, обеспечивающих надлежащее функционирование спутниковой аппаратуры, является создание эталонов различных физических величин на основе применения фундаментальных физических констант (ФФК) и прецизионных измерений частоты.

Существенное влияние на точность определения местоположения наземных объектов, по данным спутниковых навигационных систем, оказывает относительная нестабильность бортовых эталонов частоты, применяемых в составе бортовой аппаратуры КА. Существующие средства с нестабильностью около 10^{-14} позволяют восстановить координаты объектов с метровой точностью. Переход к сантиметровой или миллиметровой точности требует использования бортовых эталонов времени с нестабильностью не хуже 10^{-16} . Такую точность позволяют обеспечить оптические атомные стандарты частоты, разрабатываемые сегодня как за рубежом, так и в Российской Федерации.

Таким образом, прецизионная метрология измерений частоты и времени чрезвычайно важна для обеспечения прогресса в следующих космических приложениях [13]:

- фундаментальные исследования, использующие прецизионные измерения расстояний;
- связь, включая космическую, использующую высокую скорость передачи данных на большие расстояния;
- глобальные спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС/GPS, применяющие точные измерения времени.

Оптико-электронные (фотонные) компоненты давно и достаточно широко внедряются в современных космических системах дистанционного зондирования Земли в качестве фоточувствительных приемников излучения, а также в солнечных батареях, обеспечивающих энергетику КА. Наряду с этими очевидными применениями, наблюдается повышенный интерес разработчиков космических систем к применению фотонных технологий в проведении разнообразных измерений на борту КА, а также для сбора, обработки и передачи получаемой измерительной информации.

В работе [14] представлен обзор состояния систем и устройств хранения больших объемов цифровых данных, включая CD-диски и фотонные устройства хранения данных, основанные на использовании голографических методов.

Согласно докладу, подготовленному международной корпорацией данных (IDC) в 2011 г., суммарное количество данных, генерируемых глобально

Таблица 1. Дорожная карта развития авионики КА до 2030 г.

	Спускаемый аппарат миссии «Исследования Марса»	1 поколение X2000	3 поколение	5 поколение	Перспектива
Объем, см ³	50,000	10,000	1,000	10	1
Масса, кг	80	40	1	0,01	0,002
Мощность, Вт	300	150	30	5	0,05
					
Год	1999	2003	2010	2020	2030

Источник: Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report, Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade, September 1999

до 2020 г., нарастает экспоненциально и достигнет 35 ZB (1 zetabyte (ZB) = $5 \cdot 10^3$, 1 exabyte (EB) = $5 \cdot 10^6$, 1 petabyte (PB) = $5 \cdot 10^{12}$ GB) [15], при этом, например, только объем данных при ежедневной съемке поверхности Земли с субметровым пространственным разрешением потенциальными космическими системами [16] мог бы составить $5 \cdot 10^{14}$ оцифрованных точек, или более 10^{15} байт = 10^6 GB, или 73 EB в год. Отмечается, что обеспечение хранения подобных массивов данных возможно только при использовании новых фотонных принципов, положенных в основу создания перспективных средств запоминания данных.

В одной из ранних публикаций по применению фотонных технологий в космических средствах [17] излагается потребность перспективных космических средств и целевой бортовой аппаратуры в большей полосе частот информационных сигналов, их бортовой обработке в жестких условиях космического пространства и предъявляются серьезные требования по улучшению технологий создания электронной компонентной базы и новых материалов.

Целью настоящей статьи является проведение анализа возможных направлений применения фотонных технологий при разработке и создании перспективной аппаратуры космических информационных систем и комплексов различного целевого назначения, выявление основных проблемных вопросов, а также формулировка рекомендаций и предложений по их решению.

Оценка мировых трендов применения фотонных технологий в космических системах навигации связи и ДЗЗ

Первые применения фотонных технологий для космических приложений включали цепи распределения радиотехнических сигналов, линии задержки сигналов, бортовые генераторы частот, аналого-цифровое преобразование с фотонной обработкой сигналов, а также быстрое аналого-цифровое преобразование сигналов. Наряду с перечисленными направлениями космического применения фотонных технологий, были начаты работы по использованию нанофотонных компонентов при создании перспективных образцов космической техники [18].

Для реализации технически трудно выполнимых миссий исследования дальнего космоса по приемлемой стоимости NASA разработало специальную Технологическую программу, известную как X2000. В рамках данной программы подразумевалось, что, начиная с 2000 г., один раз в два-три года будут разрабатываться и внедряться модернизированные подсистемы, а также элементы конструкции КА. Одной из целей программы было существенное уменьшение размеров авионики КА каждого нового поколения продукции программы X2000, частично путем интеграции нано- и микротехнологий. В табл. 1 представлена дорожная

карта развития авионики КА, из которой видно, что по прогнозу объем, вес и потребляемая мощность изделий авионики за 10 лет уменьшается примерно на порядок. За базовый уровень взяты параметры авионики марсианского КА по состоянию на 1999 г.

Отметим, что уже первая модернизация в рамках Х2000 представляла собой интегрированную систему авионики, объединившую функции командной телеметрии и обработки данных, управления ориентацией, распределения и управления энергопотреблением, а также интерфейс научной полезной нагрузки. Применение автоматизированных технологий разработки и проектирования аппаратуры позволило создать высокоинтегрированную модульно-блочную архитектуру, обеспечившую большую степень надежности конструкции для длительных миссий в дальнем космосе.

В настоящее время большие надежды возлагаются на применение технологии «система на кристалле», позволяющей в перспективе перейти на создание модулей авионики в едином кристалле — интегральной микросхеме. При этом такой кристалл может включать управление электропотреблением, датчиковые технологии, а также модули телекоммуникаций, совмещенные с бортовым компьютером и памятью. Сегодняшние успехи мирового космического приборостроения полностью подтвердили приведенные прогнозы.

Поставленная цель на 2020 г. подразумевает разработку революционных компьютерных технологий, которые могли бы не только преодолеть ограничения простого масштабирования полупроводниковых технологий, но и перейти к концепции «интеллектуального КА». Такой КА должен стать полностью автономным, высокоинтегрированным КА с супервозможностями, функционирующим при ультранизком энергопотреблении. Для достижения поставленных целей необходимо обеспечить широкое использование технологий фотоники в целом и нанофотоники в частности. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что феноменальные достижения в цифровых компьютерных технологиях последних лет, даже с применением суперкомпьютеров, не смогут конкурировать с биологическими системами в выполнении таких плохо обусловленных задач, как распознавание

изображений, обработка данных многосенсорных систем, отказоустойчивого управления, а также адаптивная подстройка к условиям окружающей среды.

Создание новых многофункциональных материалов на основе квантовых технологий с экстраординарными свойствами позволит организовать более быструю (десятки ТБит/с) передачу данных, обеспечить хранение и обработку информации, замену элементной базы микросхем, космического и транспортного оборудования.

Использование микрофотонных интегральных схем нового поколения обеспечивает интегрирование различных оптических элементов в общий фотонный чип, что позволяет минимизировать количество внешних волоконно-оптических соединительных проводов, уменьшить общий размер и массу космической системы, в то же время существенно повышая ее надежность.

В работе [19] были идентифицированы интересы космической индустрии Европы в использовании фотонных технологий и метаматериалов, которые приведены в табл. 2. В ней для каждого технологического направления приведены экспертные оценки существующего уровня готовности. При этом уровень А соответствует TRL 1–3 стандартной шкалы уровней технологической готовности [20], уровень В — TRL 4 и уровень С — TRL 5.

При этом для всех перечисленных технологий и их применений основные преимущества фотонных систем, позволяющие успешно использовать их в космических миссиях путем комбинирования встроенных элементов микро-, нано- и волоконной оптики, включают:

- слабую восприимчивость создаваемых систем к электромагнитным помехам, электрическим разрядам и воздействию заряженных частиц космического пространства;
- значительное сокращение веса сигнальных линий ($< 1/20$ по сравнению с традиционными кабельными электрическими соединениями);
- высокую пропускную способность передачи информации (до десятков ТГц);
- гальваническую развязку критических подсистем космических аппаратов (КА);
- высокоскоростную обработку оптических, радио- и СВЧ-сигналов;

Таблица 2. Интересы космической индустрии Европы в использовании фотонных технологий и метаматериалов

Технология	Технологический уровень	Горизонт разработки	Приоритет	Применение
Фотоника на кристалле	Уровень С	Среднесрочный	Наивысший	Защита от облучения, связь
Фотонные ВОЛС	Уровень С	Среднесрочный	Высший	Приборы, радиационная стойкость
Аэрогельное корпусирование фотонных компонентов	Уровень С	Долгосрочный	Высший	Теплозащита
ВОЛС на сапфире	Уровень С	Среднесрочный	Высший	Терморегулирование
Микрорезонаторы	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Спектроскопия
Нанокристаллы	Уровень А	Среднесрочный	Высший	Датчики
Фотонный маяк	Уровень В	Среднесрочный	Высший	Спектроскопия
Векторная вихревая коронография	Уровень С	Среднесрочный	Высший	Детекторы
Инфракрасные метаматериалы	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Циклические перепады температур
Метаповерхности	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Датчики
Интерферометр с перестраиваемым зрачком	Уровень В	Среднесрочный	Высший	Интерферометрия
Быстроперестраиваемые метаматериалы	Уровень А	Среднесрочный	Наивысший	Связь, датчики, детекторы
Частотно-избирательные поверхности	Уровень А	Среднесрочный	Высший	Проектирование антенн, датчики, детекторы
Плазмонное усиление фоточувствительности	Уровень А	Среднесрочный	Наивысший	Датчики, детекторы
Частотно-избирательные поверхности	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Циклические перепады температур
Метаматериалы с отрицательным индексом	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Детекторы
Пленки, изменяющие фазу	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Радиационная защита
Плоские перестраиваемые линзы	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Датчики
Плазмонное цветоразделение	Уровень А	Долгосрочный	Высший	Датчики

Источник: Technological Breakthroughs for Scientific Progress (TECHBREAK)// Brussels, ESF Forward Look, 2014.

– высокоскоростные прием/передачу полезной информации;

– повышение чувствительности и расширение рабочих диапазонов датчиков и сенсоров;

– увеличение срока активного существования КА.

Реализация таких преимуществ и применение изделий фотоники в бортовой аппаратуре КА позволяет кардинально улучшить характеристики:

– снизить вес сигнальных кабельных линий в 20 раз;

– уменьшить потребление электрической мощности на 30–50 %;

– увеличить скорость обработки информации в 20–200 раз;

– удешевить стоимость изготовления аппаратуры на 20–50 %;

– увеличить срок активного существования космической техники в 1,5–2 раза.

Анализ перечисленных технологий фотоники, применения на их основе изделий для космического использования позволил следующим образом

идентифицировать критические технологии фотоники, актуальные и для российской космической отрасли:

- инфотелекоммуникационные технологии (оптические линии связи спутник–спутник и спутник–Земля, оптоволоконные и беспроводные информационные сети внутри КА, гибридные вычислительные устройства);
- технологии дистанционного зондирования Земли (приемники оптического и инфракрасного диапазона, синтез оптической апертуры);
- технологии создания и использования датчиковой, измерительной и преобразующей аппаратуры (датчики температуры, давления, акселерометры, АЦП/ЦАП, оптические акселерометры, оптические гироскопы, солнечные датчики);
- технологии квантовых вычислителей;
- технологии оптических лазерных систем локации;
- технологии создания малогабаритных бортовых приемопередающих антенн из метаматериалов;
- технологии беспроводной передачи энергии;
- технологии хранения информации, голографическая память;
- квантовые технологии спутниковых систем навигации и ориентации (малогабаритные бортовые атомные часы, оптические акселерометры, оптические гироскопы, солнечные датчики, датчики земного излучения).

Оценим теперь современное состояние разработок фотонных технологий для космических применений и основные тренды их развития.

Основные требования к перспективным технологиям спутниковой навигации на основе применения фотонных технологий

В итоговом отчете Управления национальной космической безопасности США «Исследование национальной архитектуры средств координатно-временного и навигационного обеспечения» [21] представлены направления развития и рекомендации по оценке альтернатив развития систем КВНО. Группа разработчиков, перед которой была поставлена задача определения потенциальных

средств и технологий для обеспечения решения перспективных задач КВНО, использовала принятые в Управлении национальной космической безопасности процедуры, учитывающие любые нестандартные идеи, которые в настоящее время могут казаться экстремальными или необычными, а в 2025 г. станут привычным делом. В результате проведенного анализа показано, что наиболее многообещающими представляются 3 прорывные технологии, способные повлечь за собой значительные изменения:

- Chip-Scale Atomic Clocks (CSAC) – малогабаритные атомные часы на кристалле;
- высокоточные оптические атомные часы;
- экономически эффективные блоки инерциальных датчиков на основе микроэлектромеханических систем (MEMS) – чрезвычайно высокоточные интерферометрические инерциальные навигационные системы и пр.

Всего экспериментально было идентифицировано 50 технологий, из которых были отобраны следующие приоритетные направления развития глобальных навигационных систем:

- использование малогабаритных атомных часов;
- использование оптических часов на основе атомных переходов на оптических частотах;
- установка лазерных ретрорефлекторов на все КА и использование наземных средств лазерного слежения в целях улучшения моделей спутниковых орбит для повышения точности определения параметров орбит;
- точная калибровка устройств, передающих сигналы времени, в том числе и бортовой аппаратуры КА, передающей информацию о времени в навигационном сигнале;
- связь элементов ГНСС через лазерные межспутниковые каналы передачи данных;
- обеспечение дополнительных бортовых источников КВНО;
- формирование средств временного обеспечения, передающих временную информацию по оптоволоконному каналу связи;
- создание единого сервиса ГНСС, который мог бы обеспечить сантиметровую точность в режиме, близком к реальному времени, и миллиметровую точность в режиме постобработки, а также данные целостности в реальном времени;

– организация высокоточного эфемеридно-временного обеспечения потребителей, использующих все доступные сигналы для решения навигационных задач.

Использование излучения пульсаров для синхронизации спутниковых навигационных систем

На точность взаимной синхронизации КА спутниковых навигационных систем оказывают влияние три основных фактора:

- точностные характеристики самой системной шкалы времени, которые определяются технологией ее реализации — стабильностью составляющих ее хранителей времени, методами их сличения и построения групповой шкалы времени;
- точностные характеристики синхронизации бортовых шкал времени (БШВ) и системной шкалы времени, определяемые технологией процесса синхронизации;
- точность прогнозирования в аппаратуре потребителя бортовых шкал времени на заданный интервал, задаваемая стабильностью установленного на борту КА синхронизирующего устройства на основе бортовых стандартов частоты с определенными точностными характеристиками.

Одним из возможных направлений развития временной синхронизации спутниковых навигационных систем в перспективе может быть ее построение на основе пульсарных шкал времени, активно развиваемых в последнее время как за рубежом, так и у нас в стране [22, 23]. Подробный обзор различных методов навигации в дальнем космосе приведен в работе [24].

Идея использования высокостабильной повторяемости наблюдаемого импульсного пульсарного излучения на практически неограниченной пространственно-временной протяженности путем трансформации его в эталонную (пульсарную) шкалу времени возникла практически сразу после открытия пульсаров в 1967 г. Относительная нестабильность собственного вращения ряда пульсаров составляет величину 10^{-14} и выше на временном интервале в несколько лет. Наилучшее значение демонстрирует пульсар J0437-4715, для ко-

торого нестабильность $\sigma_y(\tau) < 10^{-15}$ на временном интервале, превышающем 3 г. (непрогнозируемый уход — 10 нс за 3 г.). Таким образом, уровень стабильности пульсарной шкалы времени (ПШВ) потенциально высок и принципиально позволяет использовать ее в интересах формирования высокостабильного и высокоточного времени.

Шкалы, основанные на пульсарах, тем не менее, обладают несколькими преимуществами по сравнению с уже существующими атомными шкалами времени:

- возможностью надежного наблюдения источника имеющимися или перспективными астрономическими инструментами с требуемой точностью решения задач потенциальным потребителем;
- длительностью времени жизни источника, обеспечивающей требования потребителя (зависит от поставленной задачи);
- высокой точностью описания (экстраполяции) аналитической моделью моментов прихода импульсов излучения (высокая стабильность наблюдаемого периода излучения, или прогнозируемость);
- меньшей величиной периода излучений, чем требуемый период синхронизации шкалы времени потребителя;
- высокой степенью распознаваемости вариаций электромагнитного излучения.

Проведенные исследования, в том числе и в России, показали, что, благодаря наличию достаточно большого количества ярких стабильных пульсаров, существует возможность построения на их основе наблюдений групповой шкалы пульсарного времени, обладающей более высокой стабильностью, чем у каждого из входящих в нее отдельных пульсаров. Стабильность групповой пульсарной шкалы времени оценивается величиной порядка 10^{-16} на длительных интервалах времени (годы, десятилетия), что гораздо надежнее существующих атомных групповых шкал времени.

В этой связи представляет значительный интерес будущая конкурентоспособность ПШВ в сравнении с атомными шкалами времени. Вопрос очень важен в связи с тем, что развитие наземных атомных стандартов частоты идет быстрыми темпами и за полвека их стабильность улучшалась в среднем на порядок за каждые 7 лет. Сейчас их характеристики уже сравнимы со стабильностью самых высокоста-

бильных пульсаров. Например, самые массовые цезиевые часы, используемые для формирования всемирной шкалы времени TAI, типа 5071A, имеют нестабильность частоты на интервалах выборки 3–5 сут. $\sigma_y(\tau) \leq 5 \times 10^{-15}$. Нестабильность часов на основе лучших водородных мазеров при временной выборке 5 сут. составляет $\sigma_y(\tau) \leq 5 \times 10^{-16}$. Групповые шкалы времени (TAI, UTC) еще более точны: по данным результатов от 220 атомных часов из почти 50 лабораторий времени по всему миру, эти шкалы имеют нестабильность около 2×10^{-15} на интервале нескольких недель и сохраняют тенденцию к дальнейшему ее снижению.

Космические бортовые оптические эталоны времени

Оптические атомные часы найдут широкое применение как в наземном, так и в бортовом сегментах глобальных спутниковых навигационных систем, что улучшит на 2–3 порядка величины точности бортовых эталонов времени. Это в свою очередь снизит необходимость обновления параметров бортового эталона времени и, соответственно, повысит автономность навигационных КА. По мере прогресса в понимании влияния атмосферы на прохождение навигационного сигнала это приведет в конечном счете к существенному повышению точности определения местоположения для потребителей системы.

Подробный обзор применения результатов европейских разработок в области спутниковой навигации представлен в работе [25].

В работе по атомным оптическим эталонам времени даются рекомендации по параллельной разработке четырех различных вариантов оптических атомных часов [26]:

1. Оптические атомные часы с ионными ловушками на основе 88Sr^+ [27].
2. Оптические атомные часы на основе решетки атома стронция [28].
3. Оптические атомные часы с ионными ловушками на основе квантовой логики, использующие 27Al^+ .
4. Оптические атомные часы на основе пространственной решетки атома ртути.

Разработка указанных устройств предполагается в широкой международной кооперации компаний из стран Европейского союза, включающих Великобританию, Германию, Францию, Австрию, Италию и Швейцарию, имеющих лидирующие позиции в метрологии оптического излучения. Безусловно, такая работа должна с самого раннего этапа проходить с привлечением специалистов компаний — космических системных интеграторов.

Малогабаритные атомные часы

Исследования по созданию малогабаритных оптических стандартов частоты лежат в русле миниатюризации используемых для этих целей лазеров. Впервые подобные работы начали проводиться в Национальном институте науки и технологий (Болдер, США) [29]. Аналогичные проекты ведутся, в частности, в Институте лазерной физики СО РАН [30] («Генератор оптических частот на основе фемтосекундного форстеритового лазера»). Размер разработанного здесь лазера составляет 20 на 30 см, на основании которого создан оптический стандарт частоты (ILP I2/532-1). Совместными усилиями ФИАН, Научного центра волоконной оптики и компании «Авеста» (фирмы, организованной внутри ОКРФ ФИАН) впервые были реализованы компактные фемтосекундные оптические часы, способные после необходимой технической доводки работать на борту искусственного спутника (стабильность — 10^{-14}).

На сегодняшний день работы в области оптических стандартов частоты находятся по большей части на стадии НИОКР, коммерческое использование подобных приборов ограничено. Можно полагать, что при условии преодоления свойственных ему недостатков подобное оборудование будет иметь весьма позитивные рыночные перспективы.

Основные направления исследований в области оптических систем связи

В целом, исследования в части открытых линий оптического диапазона направлены на решение проблем в нескольких областях. Постоянно

происходят поиски наилучших диапазонов передачи информации в атмосфере, а также факторов, влияющих на скорость передачи данных. Исследуются возможности увеличения скорости передачи и разработки новых схем модуляции сигнала [31]. Проводятся исследования в области создания источников и приемников оптического излучения [32]. Достаточно серьезную роль играют и аналитические исследования, обосновывающие необходимость внедрения оптических технологий по сравнению с традиционными — радиотехническими.

Идея передачи информации в оптическом диапазоне была предложена еще в 60-х годах прошлого века [33]. Специалисты корпорации Hughes предложили использовать для этих целей вновь разработанный рубидиевый лазер. Последующие эксперименты растянулись на 50–60 лет. Только в начале XXI века был проведен первый космический эксперимент по передаче информации в оптическом диапазоне — SILEX [34].

В 2001 г. в рамках SILEX была осуществлена передача информации с низкой околоземной орбиты (космический аппарат SPOT-4) на геостационарную орбиту (космический аппарат ARTEMIS). Были достигнуты скорости передачи информации до 2 Мбит/с при длине волны 819 нм [35].

Одновременно с передачей информации в открытом космосе с космического аппарата ARTEMIS осуществлялась передача информации через атмосферу. В том же 2001 г. были достигнуты скорости передачи данных до 50 Мбит/с с использованием канала 847 нм. В настоящее время уже достигнуты скорости передачи информации до 5–6 Гбит/с, подобная оптическая линия функционирует на борту космических аппаратов TerraSAR-X и NFIRE с использованием канала 1064 нм [36].

Для передачи информации в оптическом диапазоне в современном оборудовании используются две частоты, лежащие в сходных по характеристикам окнах прозрачности атмосферы: 1064 нм (282 ТГц) и 1550 нм (193 ТГц). Для оптических линий спутниковой связи канал 1550 нм выглядит предпочтительнее, чем канал 1064 нм, поскольку фоновая засветка в этом канале в 4 раза ниже. Кроме того, турбулентность, которая приводит к увеличению соотношения сигнал/шум, оказывает меньшее влияние [37].

В настоящее время рассматривается возможность создания оптических терминалов со скоростями от 30 до 100 Гбит/с. Предварительные расчеты показывают, что апертура «зеркал» подобных терминалов составит 200 мм и 1000 мм. В соответствии с энергетическим бюджетом радиолинии можно констатировать, что минимальный угол визирования должен быть не ниже 30° над горизонтом без применения технологий помехоустойчивого кодирования сигналов [31].

В работе [31] представлены результаты проведенного эксперимента по передаче информации в оптическом диапазоне в атмосфере со скоростью 1 Тбит/с. Показано, что информация на такой скорости может быть передана и получена, но расстояние передачи пока не превышает нескольких сотен метров. В этом исследовании рассматривается возможность использования новой технологии оптических усилителей Erbium-Doped Fibre Amplifiers (EDFA), которые могут повысить характеристики как приемников, так и передатчиков оптического излучения. Кроме того, предлагается рассмотреть возможность мультиплексирования каналов с разными длинами волн, что позволит повысить энергетический потенциал оптической линии.

Общеизвестно, что возможности оптических линий передачи информации ограничиваются наличием облачности на пути распространения оптического сигнала. В Европейском союзе пошли путем создания географически распределенной сети станций, которая обеспечивает пространственную диверсификацию возможности приема и является наиболее приемлемым путем обеспечения непрерывной доступности канала связи. Наряду с пространственным распределением приема информации (по аналогии с традиционными радиотехническими системами), проводятся исследования в области создания многоантенных приемных станций с целью снижения трафика оптических линий в интересах повышения пропускной способности системы [38].

На рис. 1 представлено возможное распределение наземных станций (10 шт.) в Южной Европе [31]. Причинами отсутствия связи (кроме облачности) также могут быть: условия сильной турбулентности в атмосфере над приемной станцией, наличие Солнца в ее зоне видимости, техническое состояние станции или соображения безопасности



Рис. 1. Предполагаемые точки размещения сети европейских земных оптических станций
Источник: по материалам [31]

(например, присутствие самолета на пути распространения сигнала). При этом облачность является доминирующей причиной.

Среднегодовая доступность подобной сети, которая определяется вероятностью того, что хотя бы одна станция не закрыта облаками и доступна для обмена информацией, составляет 99,89 % [31]. Детальный анализ статистики по облачности в Европе показывает, что ситуация, когда все станции покрыты облаками, может произойти в основном зимой, т.е. для дальнейшего увеличения процента доступности одна станция обязательно должна быть размещена в Южном полушарии.

Одна из важных проблем при построении космических оптических систем связи состоит в создании технологии передачи информации при переходе от одной земной станции к другой непосредственно в процессе осуществления сеанса связи. Для того чтобы избежать потери данных при переключении, необходимо обеспечивать сброс информации на эти станции как минимум до тех пор, пока поток информации не будет синхронизирован.

Технология может быть создана при условии применения дублированной линии, подразумевающей наличие двух трансиверов на борту геостационарного космического аппарата. Подобная аппаратура может быть скомпонована как в виде двух независимых терминалов, так и в виде единого телескопа с расширенными возможностями фокальной плоскости для мультиплексирования двух станций. Кроме того, для успешной реализации подобной технологии необходимо иметь сведения о реальной и прогнозной доступности наземных

станций с учетом всех факторов (облачности, турбулентности и пр.).

Использование оптических линий связи для передачи информации с космических аппаратов имеет ряд принципиальных преимуществ перед традиционными радиотехническими технологиями. Это большие скорости передачи данных, меньшие размеры апертур приемопередающих комплексов — факторов, повышающих эффективность подобных решений.

В открытом космическом пространстве проблема облачности отсутствует и соответственно альтернативный подход к передаче информации предполагает, что информация с низкоорбитального КА может транслироваться по оптическому каналу на геостационарный спутник, который будет передавать информацию на наземную станцию уже в радиодиапазоне, в котором нет проблемы прохождения сигнала через атмосферу.

Основные направления исследований по применению фотонных технологий в целевой и служебной аппаратуре космических информационных систем

Рассмотрим теперь основные технологии создания информационной инфраструктуры космических информационных систем.



Рис. 2. Обобщенная структурная схема информационной системы КА

Укрупненная структурная схема бортового сегмента космической информационной системы представлена на рис. 2.

Видно, что количество информационных связей в космической информационной системе достаточно велико и включает в себя как обмен данными внутри КА, так и обмен данными по линиям «КА–Земля» и «КА–КА». Причем по мере усложнения аппаратуры количество информации нарастает экспоненциально, и именно данное обстоятельство становится «бутылочным горлышком» космического приборостроения.

Фотонные технологии, специализированные для космического применения, используются при создании широкого спектра полезных нагрузок и служебных систем КА:

- волоконно-оптических гироскопов;
- интегральной микро- и нанооптики;
- фотоприемных устройств видимого и инфракрасного диапазона;
- акустооптических фильтров и диспергирующих элементов;
- дифракционных антенных решеток;
- малогабаритных антенн на основе метаматериалов;
- высокочастотных микромеханических и электрооптических модуляторов;

- органических преобразователей энергии;
- радиационнотойкой ЭКБ нового поколения;
- изделий магнитооптической голографии;
- элементной базы микроэлектроники со встроенными в кристалл элементами гальванической развязки на основе фотоники.

В работе [39] отмечается, что оптоэлектронные компоненты находят все более широкое применение в миссиях дистанционного зондирования Земли за счет их высокой интегрируемости и обеспечения лучших характеристик при уменьшении массы и габаритов целевой аппаратуры, а также улучшения качества получаемых изображений земной поверхности. Однако в связи с применением инновационных технологий их уровень технологической готовности не всегда достаточен для использования в конструкторских разработках, что приводит к неоправданным рискам, которые необходимо учитывать на самых ранних стадиях разработки. В упомянутой работе также предпринята попытка идентифицировать указанные риски и предложить пути их снижения.

Отмечается, что при создании космической миссии Pleiades был применен ряд принципиально новых технологий оптоэлектроники, обеспечивших на то время новое качество суммарных характеристик системы, которые приведены в табл. 3.

Зеленым цветом выделены те из них, которые требуют обязательного применения фотонных технологий для достижения заданных требований к миссии. В то же время остальные технологии используют оптоэлектронные компоненты для обеспечения традиционных функций аппаратуры КА.

Следует отметить, что, несмотря на разное время проведения анализа и составления табл. 2 и 3, их содержимое неплохо коррелирует. Это означает, что разработка перспективных фотонных технологий осуществляется скоординированно с опытом, полученным в ходе выполнения текущих миссий.

Главные риски, идентифицированные в ходе разработки оптоэлектронных компонентов, были связаны с инновационным характером разработки, поэтому основная рекомендация разработчикам состояла в необходимости заблаговременной разработки критических компонентов для обеспечения общего успеха создания новой миссии в целом.

В работе [40] приведены результаты работ французского космического агентства (CNES) по созданию фотоприемников, работающих в различных диапазонах спектра: ультрафиолетовом (УФ), видимом (ВИД), ближнем (БИК), среднем (СИК) и дальнем ИК. Основные успехи в данном направлении достигаются за счет:

- координации выполняемых НИОКР с требованиями, идентифицированными с помощью тематических дорожных карт;
- существующих возможностей достижения рекордных характеристик оптоэлектронных приборов, использующих как одноэлементные охлаждаемые инфракрасные приемники, так и крупноформатные ПЗС-матрицы;
- учета влияния космической радиации при наземных испытаниях посредством сравнения результатов летных и наземных испытаний.

Все эти работы выполняются в тесном контакте с разработчиками из компаний Photonis, LETI/LIR, SOFRADIR, Cypress, e2v technologies, CMOSIS.

В работе [41] представлены потребности в оптоэлектронных компонентах космического назначения. Отмечается, что указанные компоненты достигли необходимого уровня технологической готовности в телекоммуникациях и наземной инфраструктуре, с очевидностью наращивая использо-

вание фотонных технологий в перспективных методах телекоммуникаций, что обусловлено целым рядом преимуществ, включающих:

- практически неограниченную полосу пропускания частот;
- отсутствие потерь;
- малый вес;
- небольшие габариты печатных плат;
- механическую гибкость в случае, например, оптоволоконных;
- невосприимчивость к электромагнитным помехам;
- простую гальваническую развязку.

Однако для космических применений готовность перечисленных оптоэлектронных технологий все еще сильно ограничена, в первую очередь, из-за проблем с надежностью, связанными с жесткими условиями космического пространства. В статье [41] проанализированы потребности в различных семействах оптоэлектронных компонентов, применяемых в широком спектре космических приложений: от генерации сигнала до обработки сигналов на борту КА, приема сигналов, их маршрутизации и обработки. Можно утверждать, что внедрение фотонных технологий в космическую технику находится пока в зачаточной стадии, в первую очередь потому, что требуется огромная работа по их доведению до готовности, достигнутой в наземных приложениях, при обеспечении приемлемого уровня качества и надежности.

Сегодня ЕКА уже использует фотонные технологии различного назначения в ряде космических проектов, например, SMOS, GAIA, DARWIN, Herschel, Bepi-Colombo и др. Следует отметить, что крупные космические компании пока неохотно приступают к разработке компонентов фотоники, применяемых в космосе, в основном потому, что рынок космической продукции весьма ограничен, по сравнению, в частности, с телекоммуникациями.

Другое важное, но пока недостаточно освещенное применение волоконно-оптических технологий заключается в возможности модуляции оптического сигнала микроволновым излучением, используемым в радарах, системах связи, системах электронного противодействия, а также в приборостроении [42]. В данной статье подробно представлены широкополосные детекторы и волноводы

Таблица 3. Новые технологии на борту КА ДЗЗ Pleiades

	Аппаратура	Технология	Улучшение
<i>Съемочная аппаратура</i>	Панхроматический детектор	Тонкий ПЗС-приемник с обратной засветкой и структурой антирастекания зарядов	Повышенная эффективность засветки и отсутствие размывания изображения из-за растекания заряда
	Высокоинтегрированная фокальная плоскость	Технология высокоинтегрированной ПЛИС	Высокая плотность интеграции
	Объектив	Углерод/углеродная структура	Малая масса, высокая температурная стабильность
<i>Обработка изображений и телеметрии</i>	Очень высокая скорость цифровой связи	Коммерчески доступная 1 Гбит/с	Уменьшение массы и энергопотребления
	Компрессор данных	Алгоритм вейвлетного преобразования со скоростью 2 бита/пиксел	Минимизация массы бортовой памяти и скорости входного потока данных
	Модулятор телеметрии	Треллис-коды в X-диапазоне с модуляцией 8-PSK	Высокоскоростная линия сброса данных с малым количеством ошибок
<i>Система ориентации и успокоения</i>	Блок чувствительных элементов для инерциальной системы навигации	Волоконно-оптический гироскоп	Низкие шумы, высокая стабильность
	Гиродины	Подшипниковая технология	Большой момент с высокой динамической стабильностью
<i>Энергетическая система</i>	Солнечная батарея 1500 Вт	Тройной переход арсенида галлия	Высокий КПД (26%) и малая площадь
	Аккумулятор 150 А/ч	Литий-ионная	Высокая специфическая плотность энергии

Источник: по данным работы [39]

для фотонной генерации высокочастотных сигналов, поскольку они являются ключевыми компонентами, обеспечивающими эффективность внедрения волоконно-оптических систем миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Рассмотрены и обсуждены несколько технологий, систем, а также приложений, в которых волоконно-оптическая технология демонстрирует конкурентные преимущества по сравнению со своими электронными аналогами, позволяя существенно расширить сферу применения рассматриваемого СВЧ-диапазона частот.

В настоящий момент открываются качественно новые возможности в области создания информационно-измерительных систем изделий РКТ, включающие возможность замены значительного числа сенсоров датчиково-преобразующей аппаратуры (ДПА) традиционных типов на принципи-

ально новые датчики на основе технологий фотоники, обеспечивающих измерения электрических и неэлектрических параметров на недостижимом ранее уровне точности.

Одним из критических компонентов таких устройств являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), применяемые при разработке усовершенствованных цифровых (программно-управляемых) приемников сигналов и непосредственно преобразующие сигналы от датчиков в цифровую форму для последующей обработки. Однако прогресс в совершенствовании модулей АЦП проявляется достаточно медленно в силу огромного количества проблем производства электронных схем с очень высоким разрешением (большим количеством уровней квантования сигнала) и высокой скоростью преобразования. Широкая полоса частот

и высокое разрешение АЦП позволяют обеспечивать выборку аналоговых сигналов от всевозможных измерительных датчиков непосредственно на несущих частотах радиосигналов, устраняя необходимость понижения частоты аналогового сигнала. В настоящее время подобные решения уже найдены с помощью фотонных технологий преобразования, которые реализуют рекордные характеристики по сравнению с лучшими электронными АЦП. Возможности оптических и оптико-электронных приборов позволяют получать 12–14-битное квантование сигналов со скоростью порядка 10 Гигаотсчетов/с (GS/s) по сравнению с наилучшими параметрами электронных АЦП, обеспечивающих на скорости 8 GS/s только 3-разрядное преобразование.

В работе [43] проанализирован почти 30-летний опыт работ по созданию фотонных АЦП, для понимания принципов работы которых попутно рассмотрены современные электронные АЦП, их фундаментальные свойства совместно с аналоговыми оптическими линиями связи, применяемыми во многих фотонных АЦП. При этом рассмотрены 4 класса фотонных АЦП: 1) АЦП с элементами фотонных технологий, в которых для улучшения рабочих характеристик фотонные приборы добавлены к чисто электронному АЦП; 2) АЦП с фотонной выборкой и электронным квантованием; 3) АЦП с электронной схемой выборки и фотонным квантователем и 4) АЦП с полностью фотонными схемами выборки и квантования. В заключении обсуждены возможности фотонных АЦП в будущем. Отметим, что уже на начало второго десятилетия XXI века максимально достигнутая скорость квантования по электронной технологии составила 18 ГГц, в то время как оптические схемы выборки обеспечивали скорости 100–200 ГГц.

Результаты лабораторных исследований фотонного АЦП для космических применений представлены в работе [44]. Показано, что в сравнении с традиционными, полностью электронными АЦП, фотонный АЦП имеет преимущество в 200 %, особенно в энергопотреблении и массе.

Моделирование показало, что предложенный подход кажется весьма многообещающим: испытанный в лаборатории образец достиг характеристик, аналогичных традиционным аналоговым

системам с существенно уменьшенными сложностью, размерами, массой и энергопотреблением.

Эффективное использование фотонных технологий волоконной оптики в ряде датчиков для измерения различных параметров окружающей среды — температуры, давления и влажности — представлено в работе [45]. Подобные устройства основаны на разном пространственном расположении чувствительной области датчика. Изменения давления, температуры, изгибов конструкции КА влияют на такие свойства распространяющегося по оптоволокну светового луча, как фаза, поляризация, амплитуда или спектр. При этом реализуется точность измерений, ранее недостижимая при использовании традиционной ДПА.

Во встроенных датчиках модулятор оптических сигналов используется как составная часть собственно оптоволокну, одно или несколько физических свойств которого подвергаются внешним воздействиям и претерпевают изменения. Внешние воздействия влияют на оптоволокну, которое, в свою очередь, изменяет некоторые характеристики светового луча внутри оптоволокну.

Современные достижения в области разработки датчиково-преобразующей аппаратуры на принципах фотоники (ДПАФ) сформировали устойчивый интерес разработчиков к их применению в составе космических средств бортового и наземного базирования.

Первоначальное применение ДПАФ было обусловлено ее быстродействием. По мере совершенствования ДПАФ все более востребованными становятся следующие преимущества:

- пассивность (датчики не требуют подведения электропитания);
- высокая чувствительность;
- малые габариты и вес;
- высокая помехоустойчивость;
- способность работать в тяжелых условиях внешней среды (устойчивость к воздействию температурных, механических нагрузок и пр.);
- возможность уплотнения электрических и оптических сигналов.

Начиная с 2000-х гг. уделяется повышенное внимание научным исследованиям, практическим разработкам, использующим различные свойства магнитных полей, и эффектам, связанным с их

влиянием на оптические среды [46]. Такие измерители уже используются в системах управления производственными процессами, измерительной и вычислительной технике, дефектоскопии и т. д. [47]. В Российской Федерации также наблюдается повышенный интерес к разработке и исследованиям такой ДПАФ. Разработки ведутся в ИРЭ РАН, МИЭТ, МГУ, МЭИ, МГТУ и др.

Для РКТ актуальным направлением применения магнитных оптико-электронных структур является создание на их основе датчиков электрического тока, предназначенных для бесконтактного измерения и контроля тока в сигнальных и силовых цепях радиоэлектронной аппаратуры, силовых проводах и кабелях изделий отрасли и пр. Такие датчики позволяют обеспечить надежную гальваническую развязку токоведущих цепей различных напряжений от измерительных цепей. Они также исключают разрывы в токоведущих цепях для включения в них устройств измерения (особенно актуально для силовоточных токоведущих шин и кабелей); обеспечат устойчивость в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Датчики не требуют электропитания и позволяют осуществлять непосредственную стыковку с волоконно-оптическими линиями связи систем телеизмерений. Создание указанных датчиков тока позволяет качественно повысить надежность и срок службы изделий системообразующих предприятий отрасли: ФГУП «НПЦ АП», АО «РКК Энергия», ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева», АО «РКЦ «Прогресс» и др.

Еще одна многообещающая фотонная технология, близкая к практической реализации, — создание микрорезонаторов на модах «шепчущей галереи» [48]. Спектр применений простирается от создания высокодобротных резонаторов оптического и микроволнового диапазона [49] до обеспечения эффективного широкоапертурного ввода излучения в одномодовое оптическое волокно [50].

В публикации [51] сообщается о том, что группа молодых специалистов ФГУП «ВНИИФТРИ» Росстандарта изготовила и исследовала макет сверхмаломощного СВЧ-генератора на основе дискового лейкосапфирового резонатора типа «шепчущая галерея», работающего на частоте 6,8 ГГц. Освоенная технология позволяет производить такие резо-

наторы в диапазоне частот 6,0–10,0 ГГц. Исследования температурной зависимости добротности образца в СВЧ-диапазоне частот демонстрируют достижение уровня добротности 450 000 при температуре порядка -40°C . В перспективе планируется продолжить исследования при более низких температурах для повышения добротности резонатора. Ожидается, что к 2025 г. возможно создание серийного производства подобных микрорезонаторов с рекордными показателями добротности около 1 000 000.

Очень важным направлением применения фотонных технологий при создании космических средств является использование волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Основы и принципы действия ВОГ и датчиков на основе волоконно-оптических технологий подробно изложены в ряде работ, например [52, 53]. При этом по оценке американских экспертов, ВОГ в недалеком будущем заменят широко применяемые сегодня механические гироскопы [54].

Новейшие исследования направлены на разработку миниатюрных вариантов ВОГ для применения в том числе на малоразмерных космических аппаратах [55]. Отмечается, что ВОГ обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими технологиями. Так, в противоположность механическим гироскопам, ВОГ не содержат подвижных частей, соответственно, они более компактны, легче по массе и не оказывают противодействия ориентации в пространстве. По сравнению с кольцевыми лазерными гироскопами, ВОГ не требуют точных юстировок, лучше приспособлены для использования на КА, им не нужен механизм антиблокировки вибраций. И, наконец, в отличие от MEMS-гироскопов, ВОГ обладают лучшей устойчивостью к ударным воздействиям и вибрациям, а также имеют на порядок лучшие характеристики. Так, летные образцы ВОГ (NG LN-200) обладают лучшей стабильностью ($\ll 1^{\circ}/\text{ч}$) и гораздо лучшими шумовыми параметрами ($\ll 0,05^{\circ}/\text{ч}$). Ключевые технологические преимущества ВОГ перед лазерными гироскопами приведены в работе [56], где даны их общие и отличительные характеристики, анализируются некоторые преимущества технологии ВОГ.

В работах [57, 58] представлен обзор современного состояния разработки принципиально новых

материалов, так называемых метаматериалов, представляющих собой искусственную электромагнитную среду, структура которых масштабирована пропорционально длине волны распространяющегося в них излучения и изначально предназначавшаяся для реализации линз с отрицательными показателями преломления. Затем они стали основой для разработки электромагнитной среды для управляемого распространения волн, что послужило побудительным мотивом для пересмотра законов классической геометрической оптики.

В работе [59] рассмотрены отражающие покрытия из силиконового углерода. Их главная задача заключается в том, чтобы уберечь конструкцию КА при входе в атмосферу от сильного электромагнитного излучения газов в ударном слое. Предложены структуры из силиконового углерода и стеклянного углерода, увеличивающие отражение излучения. Выполнено численное моделирование и оптимизация фотонных структур. Среди рассмотренных материалов анализировались резонансные структуры послойного, объемно-штабельного, пористого и волноводного типов, для которых оценена роль имеющихся структурных дефектов. Ожидается, что в перспективе такие материалы могут составить основу применяемых защитных покрытий космической техники.

Заключение

В результате проведенного анализа состояния технологий фотоники, приемлемых для использования в космических приложениях, доказано, что фотонные технологии можно ранжировать как по уровням технологической готовности, так и по приоритетам востребованности следующим образом:

- фотоника на кристалле — технологии соответствуют уровням TRL 3–5 и имеют наивысший приоритет использования в космической связи с достаточно короткими сроками внедрения (около 3 лет);

- фотонные ВОЛС и ВОЛС на сапфире, используемые в космическом приборостроении и для терморегулирования, а также аэрогельное корпусирование фотонных элементов, применяемое для теплозащиты КА;

- все технологии с уровнями технологической готовности TRL 3–5 и сроками внедрения 3–5 лет;
- интерферометры и спектрометры, находящиеся в задельных стадиях и требующие достаточно длительных сроков внедрения (5–10 лет).

Следует особо отметить высокий потенциал использования широкоформатных многоэлементных фоточувствительных приемников, особенно ИК- и УФ-диапазонов спектра, а также разнообразных метаматериалов. Разработка подобных устройств вполне реальна в среднесрочной перспективе 3–5 лет.

При этом необходимо постоянно иметь в виду повышенные требования к надежности и радиационной стойкости компонентов на основе фотонных технологий, а также обязательное наличие летной квалификации таких изделий для обеспечения гарантированного их внедрения в целевой и служебной аппаратуре КА.

С учетом практически полностью исчерпанного потенциала использования традиционных технологий при проектировании космической техники для поддержания устойчивого развития и конкурентоспособного уровня космической техники российского производства необходимо овладение современными методами и средствами проектирования, а также создание новых, ранее отсутствующих технологий на российском рынке космической техники.

Для реализации подобной задачи необходимо предложить отраслевую комплексную целевую программу «Фотоника для космоса», включающую четкую дорожную карту создания и внедрения конкретной номенклатуры изделий фотоники, в первую очередь в космическом приборостроении. После окончания разработки такой программы целесообразно провести ее всестороннее обсуждение на научно-техническом совете Роскосмоса, по результатам которого она может быть принята для реализации организациями космической отрасли.

Создание подобной программы позволит консолидировать усилия разработчиков отрасли, а также различных ведомств в интересах создания элементной компонентной базы нового поколения для космической промышленности.

Основная проблема в ускорении развития рассматриваемого направления в Российской Федерации связана с полным отсутствием межведом-

ственной координации разработок. Дорожная карта фотоники разрабатывается на протяжении ряда лет, но так и не оформилась в программу организации массового производства. Различные ведомства пытаются самостоятельно решать возникающие проблемы, понимая, что для полномасштабного внедрения собственных усилий явно недостаточно.

В качестве главной рекомендации по развитию области космических применений фотонных технологий следует разработать скоординированную программу развития и производства изделий фотоники, жестко ориентированную на создание продукции, гарантированно востребованной отраслями экономики Российской Федерации. Безусловно, задельные работы должны осуществляться при участии университетов и институтов Минобрнауки, а также институтов развития (Сколково, Роснано и т.д.). При этом заказчиками на указанные работы должны выступать Минпромторг Российской Федерации, Роскосмос, Росатом.

С учетом ограниченных возможностей финансирования предлагаемых работ в условиях экономического кризиса возможным выходом может стать принятие ведомствами набора АЦП, позволяющих сконцентрировать ограниченные ресурсы на прорывных разработках.

И, наконец, чрезвычайно важной представляется организация работ в международной кооперации, например, в рамках государств-участников БРИКС.

Список литературы

1. Space Flight Requirements for Fiber Optic Components; Qualification Testing and Lessons Learned // Photonics Group, April 2006, SPIE Europe Vol. 6193SPIE.
2. Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation, The National Academic Press, Washington D.C., 2013, 341 p.
3. Draft Horizon 2020 Work Programme 2016–2017 in the area of Leadership in Enabling and Industrial Technologies — Space, http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants_manual/hi/oa_pilot/h2020-hi-oa-data-mgt_en.pdf
4. http://www.csir.co.za/dpss/conference/docs/Space_photonics.PDF
5. Microphotonics for Space Application full report. <http://seminarprojects.org/t-microphotonics-for-space-application-full-report>
6. Antikidis J.-P. A new business paradigm for Earth Observation with the e-CORCE programme // 3rd Symposium on Earth Observation Business, 15–16 September 2011, Paris. 5SEOBPanel8BluePlanet_0.pdf
7. Романов А.А., Романов А.А., Урличич Ю.М., Буравин А.Е. Концептуальные подходы к созданию перспективных космических систем // Механика, управление и информатика, 2011, № 5. С. 92–104.
8. Leeb W.R., Kalmar A., Kudielka K.H., Winzer P.J. Optical terminals for microsatellite swarms // Proc. SPIE 4635, 2002. P. 202–214.
9. Nishinaga N., Takayama Y., Takahashi T., Ogawa Y., Kubooka T., Umehara H. Study for HDR cross-link for formation flight satellite systems // Proc. SPIE 4975, 2003. P. 45–56.
10. Wilson K., Enoch M. Optical Communications for Deep Space Mission // IEEE Commun. Magazine, 2000, № 38. P. 134–139.
11. Королев Б.В. Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств // Космическая техника и технологии, 2014, т. 1, № 4. С. 39–47.
12. Красовский П.А. Метрология космических навигационных спутниковых систем. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2009. Илл. 44. Табл. 7. Библ. 22. С. 216.
13. National Research Council, 2013, Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation.
14. Min Gu, Xiangping Li and Yaoyu Cao. Optical storage arrays: a perspective for future big data Storage // Light: Science & Applications, (2014) 3, e177; doi:10.1038/lsa.2014.58.
15. Gantz J., Reinsel D. The Digital Universe in 2020: Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East. Framingham // MA: IDC; 2012; <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/index.htm>
16. Antikidis J.-P. Serving the whole planet with metric resolution data: The e-CORCE program status // WGISS 27, Toulouse, 12th of May, 2009.

17. *Bernstein N.P., Rrost G.A., Hayduk M.J., Hunter J.R., Nichter J.E., Payson P.M. and Repak P.L.* Why photonic systems for space? // in Radio Frequency Photonic Devices and Systems, Andrew R. Pinch, Anastasios P. Goutzoulis, Paul L. Repak, Editors, Proceedings of SPIE, 2000, vol. 4112.
18. Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report, Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade, September 1999.
19. Technological Breakthroughs for Scientific Progress (TECHBREAK)// Brussels, ESF Forward Look, 2014.
20. Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance// DoD, April 2011 <http://www.acq.osd.mil/chieftechnologist/publications/docs/TRA2011.pdf>
21. National Positioning, Navigation, and Timing Architecture Study, Final Report, National Security Space Office, September 2008.
22. *Ray P.S., Wood K.S., and Philips B.F.* Spacecraft Navigation Using X-ray Pulsars// Featured research, 2006, NRL REVIEW. P. 95–102.
23. *Арефьев В.А., Павлинский М.Н., Федотов С.Н., Лутвинов А.А., Семена Н.П., Левин В.В.* Рентгеновские пульсары-маяки автономной системы навигации космических аппаратов// Механика, управление и информатика. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Издательство ИКИ РАН, 2009. С. 210–218.
24. *Rad A.M., Azar L.V.* Determining Attitude and Position in Deep Space Missions Using X Ray Pulsars// International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2014, 4, 628–648. <http://www.scirp.org/journal/ijaa>, <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2014.44058>
25. Overview of Results from GNSS Research under the FP7 R&D Programme (2007–2013): From Research Applications to Market, European GNSS Agency (GSA), 2015; <http://www.gsa.europa.eu/rd-for-galileo-egnos-app>
26. *Гуров М.Г., Гурова Е.Г.* Оптические часы на ионах и нейтральных атомах [Электронный ресурс] // Контенант: электрон. науч.-техн. журн., 2014, т. 1, № 4. Режим доступа: http://www.contenant.ru/1electron_mag/magazine/
27. *Benjamin J. Bloom*, Building a Better Atomic Clock // A thesis submitted to the University of Colorado in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics, 2014. https://jila.colorado.edu/sites/default/files/assets/files/publications/BenBloom_Thesis447.pdf
28. *Poli N., Schioppo M., Vogt S., Falke St., Sterr U., Lisdat Ch., Tino G.M.* A transportable strontium optical lattice clock // Appl. Phys. B. DOI 10.1007/s00340-014-5932-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. <http://coldatoms.lens.unifi.it/tino/images/personal/articles/tino/2014-a-transportable.pdf>
29. *Kitching J., Knappe S., Liew L., Moreland J., Robinson H.G., Schwindt P., Shah V., Gerginov V. and Hollberg L.* Chip-Scale Atomic Clocks at NIST // 2005 NCSL International Workshop and Symposium, <http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2067.pdf>
30. *Пивцов В.С., Нюшков Б.Н.* Разработка мобильных прецизионных фемтосекундных оптических часов для метрологии и спутниковых навигационных систем // Отчетная сессия по программе Президиума РАН 16 декабря 2013, ФИАН им. П. Н. Лебедева.
31. *Perlot N., Dreischer T., Weinert C., Perdignes J.* Optical GEO Feeder Link Design // Future Network & Mobile Summit, 2012. Berlin.
32. *Hilbert S., and Krutz D.* BTDI CCD21122 Optical Performance Test Report // DLR-OS, 2014,
33. *Lindgren N.* Optical Communications — A Decade of Preparations // Proceedings of the IEEE, 1970, vol. 58, № 10. P. 1410–1418.
34. *Kitching J., Knappe S., Liew L., Moreland J., Robinson H.G., Schwindt P., Shah V., Gerginov V. and Hollberg L.* Chip-Scale Atomic Clocks at NIST // 2005 NCSL International Workshop and Symposium, <http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2067.pdf>
35. *Sbardellati A., Sassorossi T., Marinelli M., and Guibilei R.* The communication payload of the ARTEMIS European satellite // Proceedings of AIAA Conf., 1994, AIAA-94-0905-CP. P. 22–32.
36. *Lunde C., Fields R., Wong R., Wicker J., Kozlowski D., Skoog J., Muehlhnikel G., Hartmann J., Sterr U., Lutzer M.* Joint United States-Germany Satellite Laser Communications Project: NFIRE-to-TerraSAR-X ISLs and NFIRE-to-Ground SGLs // International Workshop on Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments, May 13–15, 2010, Tenerife, Spain. Paper: GOLCE2010-08.
37. DIN; VDE; DKE (Hrsg.) // Optische Strahlungssicherheit und Laser 2, 2010. DIN-VDE-Taschenbücher Band 526, 2, Auflage
38. *Wilson K., Enoch M.* Optical Communications for Deep Space Mission // IEEE Commun. Magazine, 2000, № 38. P. 134–139.

39. *Perret L.* Optoelectronic demands on Earth Observation Satellites: Example of the Pleiades Mission // ISROS, 14–16 May 2009.
40. *Materne A., Bardoux A., Penquer A., Bernard F.* Main trends for the development of detectors for space applications at CNES // ISROS, 14–16 May 2009.
41. *Zahir M.* Space needs on optoelectronics // ISROS, 14–16 May 2009.
42. *Vidal B., Nagatsuma T., Gomes N.J., and Darcie T.E.* Photonic Technologies for Millimeter- and Submillimeter-Wave Signals // *Advances in Optical Technologies*, 2012, Article ID 925065, 18 pages doi:10.1155/2012/925065
43. *Valley G.C.* Photonic analog-to-digital converters // *Optics express*, 2007, vol. 15, № 5. P. 1955.
44. *Pantoja S., Piqueras M.A., Villalba P., Martínez B., Rico E.* High performance photonic ADC for space applications // *ICSO 2010 International Conference on Space Optics*, Rhodes, Greece, 4–8 October 2010.
45. *Parikh Meera J. and Gcharge Anuradha P.* A Survey Paper of Optical Fiber Sensor // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, ISSN: 2321-8169, 2014, vol. 2, Issue 1. P. 33–39, <http://www.ijritcc.org/download/A%20Survey%20Paper%20of%20Optical%20Fiber%20Sensor.pdf>
46. *Tindaro Ioppolo and M. Volkan Ötügen.* Magnetorheological polydimethylsiloxane micro-optical resonator // June 15, 2010 / Vol. 35, No. 12 / *OPTICS LETTERS* p. 2037 Grzegorz Lubkowski, Michael Suhrke, *Metamaterials for Optical and Photonic Applications in Space*// Final Report ESA AO/1-6187/09/NL/AF, Euskirchen, March 2011.
47. *Wolinski T.R., Lesiak P. and Domanski A.W.* Polarimetric optical fiber sensors of a new generation for industrial applications // *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*, 2008, vol. 56, № 2. P. 125.
48. *Виноградов А.В., Ораевский А.Н.* Волны шепчущей галереи // *Соросовский образовательный журнал*, 2001, т. 7, № 2.
49. *Foreman M.R., Swaim J.D., and Vollmer F.* Whispering gallery mode sensors // *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7, 168–240 doi:10.1364/AOP.7.000168 168
50. *Городецкий М.Л., Родин А.В., Бендеров О.В.* Широкоапертурный ввод излучения в одномодовое оптическое волокно при помощи асферических резонаторов на моде шепчущей галереи // Презентация, Апатиты, 2013.
51. Молодые ученые из «ВНИИФТРИ» представили разработку на основе резонатора типа «шепчущая галерея» // http://www.ria-stk.ru/news/detail.php?ID=97769&SECTION_ID=
52. *Merlo S., Norgia M. and Donati S.* Fiber gyroscope principles // *Handbook of Fibre Optic Sensing Technology*, edited by José Miguel López-Higuera, 2000, John Wiley & Sons Ltd.
53. *Lecler S. and Meyrueis P.* Intrinsic Optical Fiber Sensor // in book *Fiber Optic Sensors* Edited by Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof, ISBN 978-953-307-922-6, 530 pages, Publisher: In-Tech, Chapters published February 22, 2012 under CC BY 3.0 license DOI: 10.5772/1379
54. ASTRIX200 — A Very High Performance FOG Inertial Measurement Unit for Accuracy demanding Satellites // *EADS-ASTRIUM & IXSEA*, 2002.
55. *Costa J.* Miniaturizable High Performance Fiber Optic Gyroscopes for Small Satellites // *Presentation to NASA Early Stage Technology Workshop*, March 2015.
56. *Napolitano F.* Fiber-optic gyroscopes key technological advantages, 2010. <http://www.industrycortex.com/datasheets/profile/1254703121/fiber-optic-gyroscopes-f.-napolitano-102010-fiber-optic-gyro>
57. *Lubkowski G., Suhrke M.* *Metamaterials for Optical and Photonic Applications in Space* // Final Report ESA AO/1-6187/09/NL/AF, Euskirchen, March 2011.
58. *Zheludev N.I. and Kivshar Yu. S.* From metamaterials to metadevices // *Nature materials*, 2012, vol. 11, p. 917–924, www.nature.com/naturematerials
59. *Komarevskiy N., Shklover V., Braginsky L., Hafner Ch., and Lawson J.* Optimal design of reflecting photonic structures for space applications // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2012, ISSN Print:1942-0730, http://scee2012.ethz.ch/abstracts_new/SCEE12_Abstract_22_talk_Komarevskiy.pdf