

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИОСВЯЗИ

Кейстович Александр Владимирович

доктор технических наук, главный научный сотрудник ФНПЦ АО «НПП «Полёт».

E-mail: onti@npp-polyot.ru.

Мордашев Иван Николаевич

старший инженер ФНПЦ АО «НПП «Полёт».

E-mail: ivan_mordashev@mail.ru.

Адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, пл. Комсомольская, д. 1.

Аннотация: Статья посвящена организации телекоммуникационных систем обмена данными с применением радиофотонных элементов. Приведены основные проблемы, возникающие при построении антенно-фидерных трактов бортовых комплексов связи. Обозначены преимущества, которых можно добиться благодаря использованию радиофотонных элементов. Рассмотрены способы организации системы радиосвязи, совмещённой с бортовой РЛС на радиофотонных элементах. Предложены способы применения объектов, входящих в такие системы. Представлен алгоритм функционирования системы с использованием активной фазированной антенной решётки. Приведён вариант построения телекоммуникационной системы передачи данных на базе радиолокатора с радиооптической фазированной антенной решёткой для организации связи между воздушными и наземными подвижными объектами, расположенными на значительном удалении друг от друга. Представлены основные принципы её работы. Рассмотрены основные преимущества предлагаемой системы.

Ключевые слова: радиолокатор, радиофотоника, фазированная антенная решетка, радиосвязь, помехозащищённость.

В последнее время в Интернете появляются статьи об использовании средств радиофотоники в радиолокаторах. Судя по публикациям, наблюдается процесс замещения радиоэлектронных средств на радиофотонные [1–7]. Связано это с иной физической природой фотона по сравнению с электроном, благодаря отсутствию заряда и массы радиофотонные системы не подвержены воздействию внешних электромагнитных полей, обладают гораздо большей дальностью передачи и шириной полосы пропускания трактов обработки сигналов в радиолокаторах и каналах связи. Развитие фотоники считается одной из приоритетных задач Правительства РФ [1]. Радиофотоника считается одной из основных технических платформ XXI века шестого технологического уклада. Поэтому развитие направления радиофотонных линий связи можно считать крайне важным для повышения обороноспособности государства. Технология радиофотоники, в частности, должна открыть новые возможности для улучшения характеристик «умной обшивки»,

применяемой на российских вертолётах и самолётах последнего поколения. В частности, российский истребитель пятого поколения ПАК ФА может быть оснащён радиофотонным радаром разработки АО «Концерн Радиоэлектронные технологии» (КРЭТ) [2–4]. В рамках проекта радиооптические фазированные антенные решётки (РОФАР) в КРЭТ создана лаборатория радиофотоники. Концерн уже начал лабораторные исследования с целью создания РОФАР. Работа ведётся в соответствии с графиком, который был согласован с Фондом перспективных исследований. В ближайшее время Концерн намерен создать натурный образец радиолокационной станции. На программу разработки активной фазированной антенной решётки на основе радиофотоники для авиационных радаров КРЭТ выделено 684 млн. рублей.

Под радиофотоникой (microwave photonics) будем понимать, объединяющий обширный комплекс областей науки и техники, связанных с решением вопросов взаимодействия между

оптическим сигналом фотонных приборов и электромагнитными волнами СВЧ диапазона.

Радиофотоника позволяет создавать радиочастотные устройства с параметрами, недостижимыми для традиционной электроники. У радиофотонных антенн будет уникальная устойчивость к электромагнитным импульсам, которые возникают, например, при близких ударах молний или при солнечных магнитных бурях. Такая система встроенных элементов по всей площади фюзеляжа самолета позволит экипажу получать в любой момент времени цельную радиолокационную картину по азимуту 360° , обеспечит работу антенных систем в режиме активной и пассивной радиолокации, постановку всех видов помех, скрытную и помехоустойчивую передачу данных, связь с землей и другими воздушными судами. В электрооптической антенне осуществляется преобразование радиосигнала, приходящего из среды распространения в оптический с использованием эффекта Поккельса. Если удастся повысить чувствительность преобразователей радиосигналов в оптические в диапазоне температур от минус 50°C до плюс 50°C до единиц микроватт, то с помощью узлов радиофотоники будет обеспечена защита оборудования РЛС и радиосистемы передачи данных от воздействия мощных электромагнитных излучений радиочастотного оружия. Кроме того, такой радиофотонный приёмный тракт можно использовать в качестве дежурного приёмника системы передачи данных и обнаружителя постановки помех в эфире.

Частотные зависимости коэффициента передачи сверхширокополосного радиофотонного тракта (РФТ), по сравнению с радиочастотным коаксиальным кабелем, не искажают спектр передаваемого радиосигнала, в нём не теряется мощность радиосигнала, что позволяет передавать по РФТ субнаносекундные радиоимпульсы с минимальными искажениями спектра, например, от удалённых антенных

радиофотонных приёмо-передающих модулей, расположенных по периметру фюзеляжа самолёта, к обитаемому отсеку с комфортными условиями, где размещают аппаратуру формирования передаваемых и обработки принимаемых сигналов, наиболее чувствительную к изменению параметров окружающей среды.

На системном уровне радиофотоника позволяет создавать пространственно разнесённые, распределённые посредством волоконно-оптических линий связи радиооптические фазированные антенные решетки РЛС, которые имеют существенные преимущества перед традиционными активными фазированными антенными решётками – например, они позволяют реализовать их интеграцию в конструкцию носителей, создавая «интеллектуальную обшивку» как основу для радиолокационных систем большой дальности и радиоэлектронной борьбы [5].

Но как использовать новые возможности технологии радиофотоники «умной обшивки», применяемой в бортовых РЛС на российских вертолётах и самолётах последнего поколения для совместного использования и улучшения характеристик линий передачи данных «воздух-воздух» и «земля-воздух»?

Предлагается три варианта использования радиофотонного радара в составе радиофотонного приёмо-передающего модуля (РППМ) (см. рис. 1) для организации помехозащищённой воздушно-наземной связи. При обмене сообщениями на физическом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем используется приёмо-передающая аппаратура бортовой (наземной) РЛС, подключаемая через управляемый вычислителем коммутатор к аппаратуре передачи данных (АПД). Временная синхронизация при связи может обеспечиваться с помощью меток точного времени с выхода приёмника глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС).

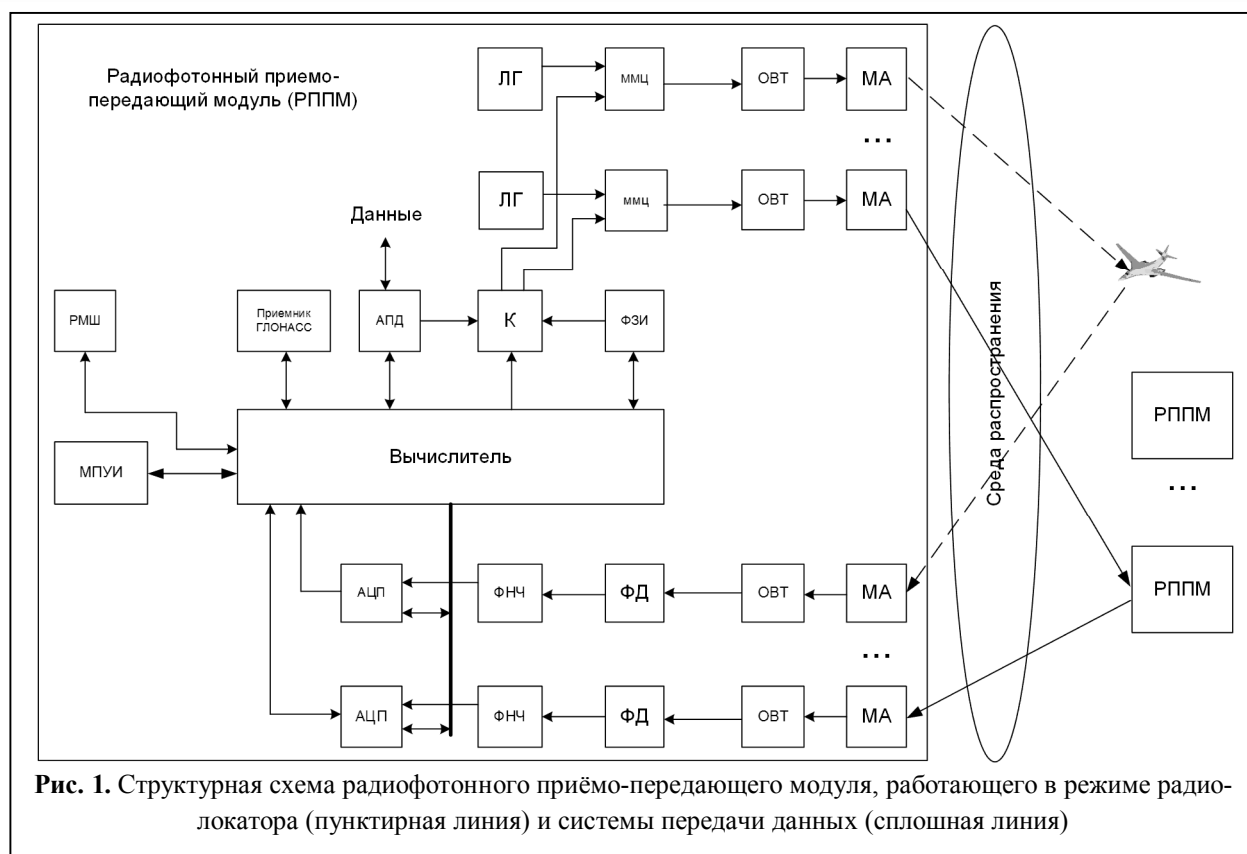


Рис. 1. Структурная схема радиофотонного приёмо-передающего модуля, работающего в режиме радиолокатора (пунктирная линия) и системы передачи данных (сплошная линия)

В первом случае для передачи данных выделяется один из периодов повторения в тот момент, когда центр диаграммы направленности бортовой РЛС будет направлен на вызываемого абонента или оптический луч будет автоматически направлен на него при известных его координатах.

Во втором случае для передачи данных выделяется интервал времени так называемого «обратного хода» РЛС, необходимого для изменения рабочей частоты, периода повторения, положения диаграммы направленности антенны и других характеристик.

В третьем варианте при обмене информацией блок данных устанавливается вместо источника зондирующего импульса радиолокатора и центр диаграммы направленности бортовой РЛС направляется на вызываемого абонента и ожидается ответное сообщение в том же периоде повторения, передаваемого с помощью зондирующего импульса другой РЛС.

Информация, полученная в результате обмена данными, может быть отображена в

всплывающем окне на мониторе бортового дисплея рабочего места штурмана (РМШ) или многоканальном пульте управления и индикации (МПУИ) летательного аппарата.

Интервалы локации и связи разделены по времени и по частоте, для локации и связи применены ортогональные сигналы, поэтому новый режим работы практически не ухудшает вероятность правильного обнаружения. Не обслуживаемые объекты (БПЛА) могут быть отведены с помощью других объектов от потенциально конфликтных ситуаций. При наличии помех для обхода наиболее опасных направлений объекты могут быть использованы в качестве ретрансляторов сообщений.

Формирование требуемой формы диаграммы направленности и ориентация её в пространстве осуществляется, например, с помощью установки в бортовом вычислителе необходимых задержек зондирующих импульсов, подаваемых на каждый приёмо-передающий модуль РОФАР, объединённый с широкодиапазонной антенной.

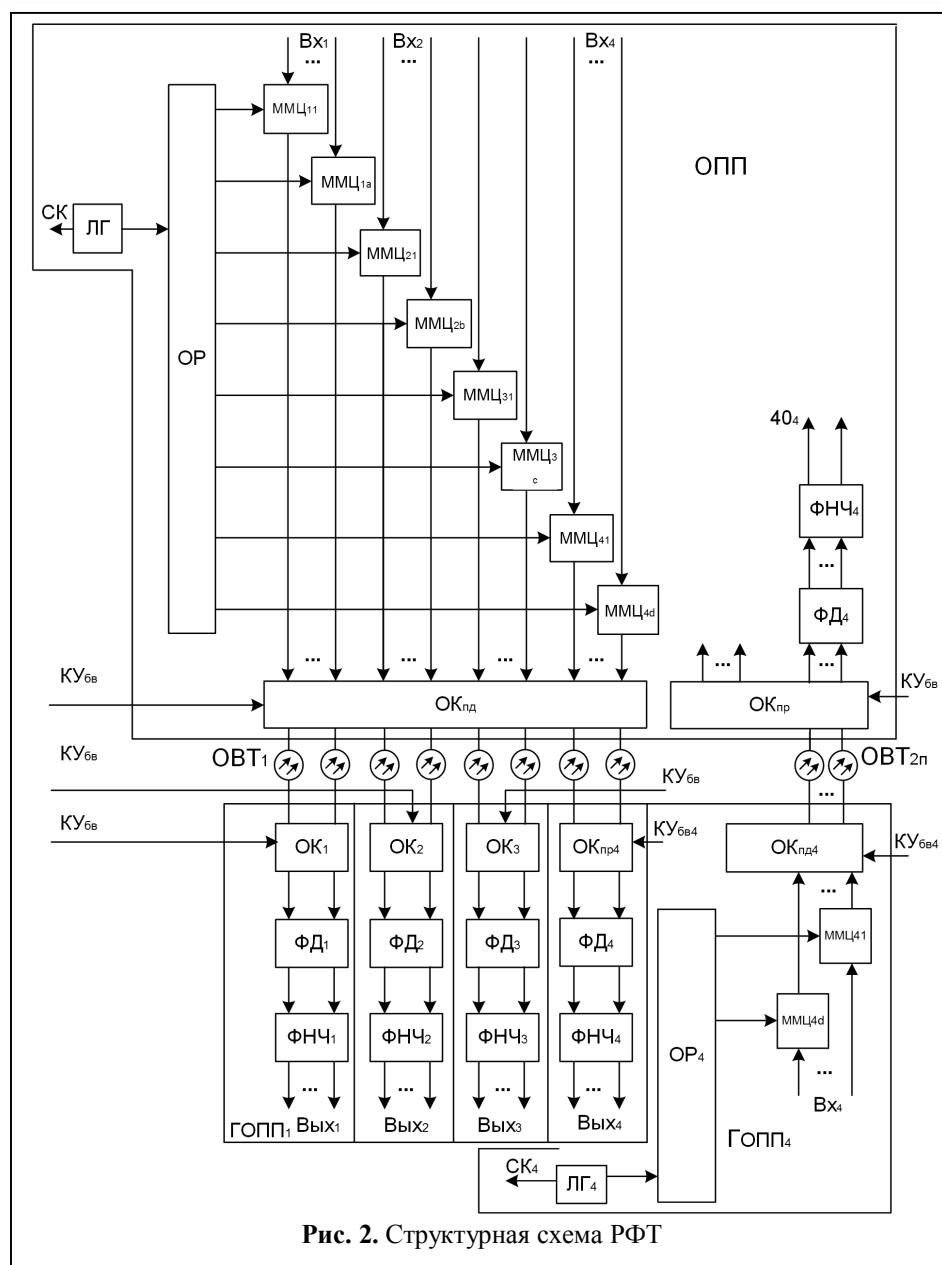


Рис. 2. Структурная схема РФТ

Излучатели модулей антенн (МА), в которые входят и приёмо-передатчики, выбираются таким образом, чтобы их параметры перекрывали весь выделенный для радиолокации и связи частотный диапазон. В качестве излучателей антенн могут быть применены, например, лёгкие плоские ленточные антенны, наклеиваемые через диэлектрик на «заземлённую» металлическую поверхность фюзеляжа или токопроводящую пластину, что позволит уменьшить число отводимых под антенны выступающих поверхностей на объекте, а следовательно, улучшить его аэродинамические ха-

рактеристики, увеличить скорость и уменьшить расход горючего. Марка материалов лент и диэлектрика для излучателей определяются волновым сопротивлением, диапазоном частот и другими требованиями, которые указаны в патентах предприятия [6, 7].

РФТ, заменяющий кабельные линии связи, искажающие форму спектра передаваемого сигнала, обеспечивает практически безыскажённую передачу радиосигналов до (или от) удалённых приёмо-передающих модулей РОФАР. Структурная схема РФТ приведена на рис. 2. РФТ состоит из оптического приёмо-передатчика (ОПП), размещаемого в обитаемом отсеке, 2п оптических воло-

конных трактов (ОВТ), четырёх групповых оптических приёмо-передатчиков (ГОПП). Основными элементами оптической схемы РФТ являются полупроводниковый лазер (ЛГ), оптические волокна и кабели, оптические разветвители (ОР), оптические соединители (разъёмные и неразъёмные), оптические усилители, модуляторы Маха-Цандера (ММЦ), фотодетекторы (ФД).

Совмещение режимов радиолокации и радиосвязи между летательными аппаратами и центром управления (ЦУ) в одном бортовом радиоэлектронном оборудовании с ис-

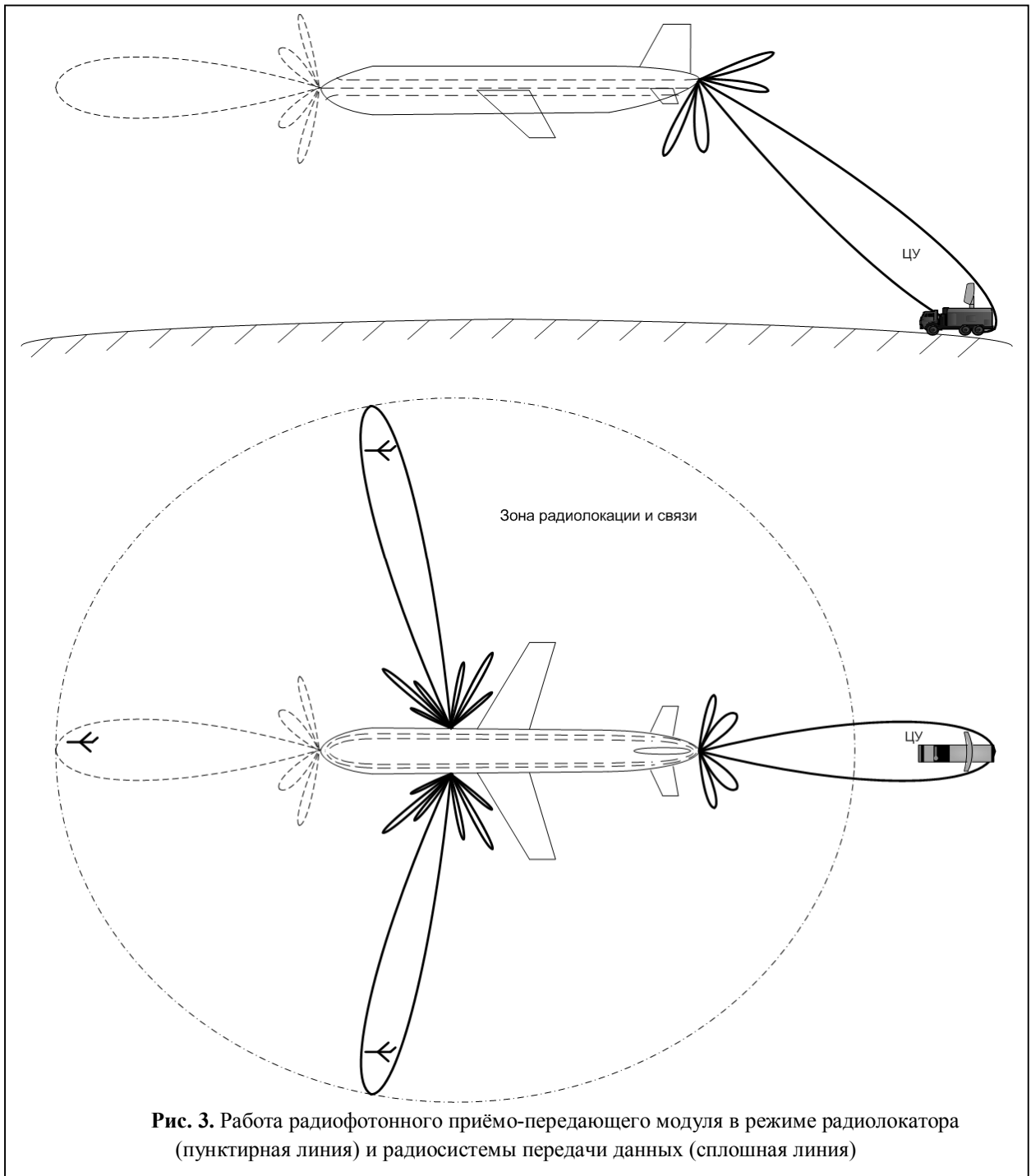


Рис. 3. Работа радиофотонного приёмо-передающего модуля в режиме радиолокатора (пунктирная линия) и радиосистемы передачи данных (сплошная линия)

пользованием элементов радиофотоники условно показано на рис. 3. Число узлов МА в каждой из четырёх полусфер пространства выбирается с учётом формирования требуемой формы диаграммы направленности и дальности связи в заданном секторе или с возможностью переброски лучей по азимуту на ретранслятор. Благодаря этому, появляются новые

возможности системы радиосвязи и достигается сразу несколько преимуществ:

1. Появляется возможность увеличения дальности устойчивой связи за счёт уменьшения потерь мощности радиосигналов в «длинных» бортовых антенно-фидерных трактах при введении узлов на радиофотонных элементах, управляемых с помощью бортового вычисли-

теля и распределения п бортовых широкодиапазонных антенн с п бортовыми широкодиапазонными радиочастотными приёмопередающими модулями на четыре группы (полусферы пространства), каждая из которых формирует свою диаграмму направленности в соответствующей полусфере, сдвинутой относительно соседних на 90^0 , и формирования общей для двух полусфер диаграммы направленности для сосредоточения энергетического потенциала в выбранном направлении. Это связано с тем, что за счёт повышения коэффициента усиления антенн в направлении выбранного абонента требуется гораздо меньшая энергия на формирование и излучение радиосигналов в одном луче, так как обычная всенаправленная антенна излучает энергию в широком секторе.

2. Повышение помехозащищённости системы обеспечивается тем, что при наличии более двух МА и исключении искажений формы радиосигналов и их спектров при передаче по радиофотонным элементам появляется возможность программными методами пространственно временной обработки сигналов автокомпенсации (сепарации) помех за счёт изменения формы диаграммы направленности в направлении на помехоноситель, а именно, уменьшения до нуля её коэффициента усиления [8].

3. Отсутствуют потери связи из-за затенения бортовых антенн направления на вызываемый абонент металлическим планером воздушных объектов при крене и тангаже, так как бортовые широкодиапазонные антенны, и бортовые широкодиапазонные радиочастотные приёмопередающие модули размещены по всем четырём сторонам подвижного объекта.

4. Учитывая широкополосность радиофотонных узлов РФТ может быть расширен диапазон передаваемых радиосигналов: не только метрового и декаметрового диапазона, но и сантиметрового и миллиметрового, одновременно изменив радиоэлектронную часть и конструкцию МА по аналогии с [8].

5. Концепция разделения аппаратуры синтеза частот, формирования радиосигналов и приёмопередающих модулей, антенн, позволяет снизить степень воздействия климатических условий, увеличить стабильность характеристик системы.

В настоящее время разработчики бортовых комплексов связи сталкиваются трудностями: дальность связи меньше заданной, «затенение» радиополя планером самолёта, трудности выполнения ЭМС, защита от ЭМИ. Решить эти задачи поможет радиофотоника и работающие совместно специалисты по ВОЛС, цифровым приёмникам и передатчикам (с применением технологии SDR), модульным усилителям мощности, широкодиапазонным антеннам, сопутствующим технологиям.

Заключение

Радиофотонные системы превосходят традиционные по всем ключевым тактико-техническим характеристикам, включая устойчивость к мощным электромагнитным импульсам, значительное повышение КПД, снижение габаритов и стоимости при серийном производстве.

Концепция разделения аппаратуры формирования и обработки принимаемых радиосигналов и антенного полотна АФАР позволяет снизить степень воздействия климатических условий, увеличить боевую устойчивость и стабильность характеристик системы. Блочномодульная конструкция построения РОФАР предоставляет широкие возможности по управлению формой и созданию многолучевых диаграмм направленности, обеспечивает гибкость в управлении РОФАР на передачу и приём в режимах радиолокации и связи, позволяет унифицировать базовые сменные модули, что улучшает эксплуатационные характеристики системы.

Новизна статьи обусловлена тем, что, несмотря на достаточно большое количество статей [2–12], посвящённых элементной базе радиофотоники, схемной проработки и созданию отдельных узлов радиофотонного радара, от-

существует проработанное схемотехническое решение использования радиофотонной РЛС на основе РОФАР для организации высокоскоростной, помехозащищённой системы радиосвязи с использованием радиофотонных элементов.

Литература

1. О развитии оптоэлектронных технологий (фотоники) [Электронный ресурс] // Сайт Правительства России. Режим доступа: <https://government.ru/news/13657#zased> (дата обращения: 28.04.2018).

2. Голов Н.А. [и др.] Системы оптоэлектронного распределения и обработки сигналов для создания радиофотонных РЛС с АФАР // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 18–31.

3. Голов Н. А. [и др.] Дорожная карта радиофотоники. Становление и перспективы развития // Научное издание. 2016. Т. 17. № 10. С. 13–29.

4. КРЭТ: новые радары смогут заглянуть в самолет на удалении 500 км [Электронный ресурс] // РИА-новости. Режим доступа: https://ria.ru/defense_safety/20151230/1351540463.html (дата обращения: 28.04.2018).

5. ФПИ создает радиофотонные радары, которые смогут обнаружить беспилотники [Электронный ресурс] // Фонд перспективных исследований. Режим доступа: <https://fpi.defence.ru/article/fpi-sozdaet-radiofotonnie-radari-kotorige-smogut-obnaruzhit-bespilotniki/> (дата обращения: 28.04.2018).

6. Патент РФ № 2516868. Система радиосвязи с подвижными объектами // Войткевич К.Л., Гусев Д.Ю., Зайцев В.А., Кейстович А.В. Заявл. 25.12.2012; опубл. 20.05.2014. Бюл. № 14.

Поступила 21 мая 2019 г.

7. Патент РФ № 2627686. Комплекс бортовых средств цифровой связи // Войткевич К.Л., Сулима А.А., Чащина Н.А., Штейн Е.Р., Колобков А.В. Заявл. 30.12.2011; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20.

8. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Дубровская А.А. Обзор возможных вариантов реализации сверхширокополосных аналоговых процессоров дециметрового, сантиметрового, и миллиметрового диапазонов длин волн с использованием методов и средств радиофотоники // Вторая научно-техническая конференция «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны»: сборник материалов конференции (Москва, 2014). М.: Радиотехника, 2014. С. 122–135.

9. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 6–42.

10. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3–39.

11. Морозов О.Г., Габдулхаков И.М. Универсальная радиофотонная система квантового распределения ключей с частотным кодированием // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2015. № 2 (26). С. 6–18.

12. Перепелицын Ю.Н. Устройства обработки оптического сигнала на основе фототоковой доменной неустойчивости // Мат. Всеросс. конф. «Микроэлектроника СВЧ-2012». Санкт-Петербург. 2012. С. 3–24.

English

NEW TECHNOLOGIES IN RADIO COMMUNICATION

Alexander Vladimirovich Keystovich – Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, Federal Research and Development Company “Polyot” (JSC RDC “Polyot”).

E-mail: onti@npp-polyot.ru.

Ivan Nikolayevich Mordashev – Senior Engineer, Federal Research and Development Company “Polyot” (JSC RDC “Polyot”).

E-mail: ivan_mordashev@mail.ru.

Address: 443086, Russia, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya square, 1.

Abstract: Publications lately come out increasingly on the application of radio-photonic components. Such components can convert radio band electromagnetic signals into visible radiation and the reverse. Information on the construction of onboard radar systems based on radio-photonic components for Russian advanced helicopters and aircrafts is of interest. Aircraft "smart skin" is used, as antennas, which represents a phased array antenna distributed over the aircraft body, components of which are radio-photonic component-based radiators (radio-optical phased array antennas). In view of this, the article authors propose to use

a radio-photonic radar as part of radio-photonic receiver and transmitter to set up noise-proof air-land communication. Joint operation options are presented for radar and radio communication systems based on time-frequency distribution of radiators' resources to the effect of minimizing mutual influence. The article introduces the operation description and functional block diagram of implementing radio communication system based on radio-photonic components. The proposed implementation of on-board communication system potentially has significant advantages. Intrabuilding losses are minimized by excluding long wire-iron cables from the list, which should bring about an increase in communication range. Noise immunity increase can be achieved via spatial-temporal signal processing and formation of special antenna array patterns. Blanking by aircraft steel airframe in roll and pitch is excluded due to specific features of radiating elements' location throughout the aircraft body. Broad range of radio-photonic path enables to extend the range of transmitted signals. It is possible to reduce the effect of climatic factors as system equipment and antenna modules can be separated from each other. Thus, the proposed system has significant advantages over "classical" solutions.

Keywords: radar, radio-photonics, phased antenna array, radio communication.

References

1. On the development of optoelectronic technologies (Photonics) [Electronic source]. Website of the Government of Russia. URL: <https://government.ru/news/13657#zased> (access date: 28.04.2018).
2. Golov N.A. [et al.] Optoelectronic systems of distribution and signal processing to create microwave photonic AESA radar. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2016. No. 3. Pp. 18–31.
3. Golov N.A. [et al.] Roadmap of microwave photonics. Formation and development prospects. *Naukoemkie tekhnologii*. 2016. Vol. 17. No. 10. Pp. 13–29.
4. KRET: new radars will be able to look into the plane at a distance of 500 km [Electronic source]. RIA-Novosti. URL: https://ria.ru/defense_safety/20151230/1351540463.html (access date: 28.04.2018).
5. FPI creates radiophoton radars that can detect drones [Electronic source]. Foundation for advanced research. URL: <https://fpi.defence.ru/article/fpi-sozdaet-radiofotonnie-radari-kotorie-smogut-obnaruzhit-bespilotniki/> (access date 28.04.2018).
6. Pat. RU No. 2516868. System of radio communication with mobile objects. *Voitkevich K.L., Gusev D.Yu., Zaitsev V.A., Keistovich A.V.* Appl. 25.12.2012; publ. 20.05.2014. Bull. No. 14.
7. Pat. RU No. 2627686. The complex of onboard means of digital communication. *Voitkevich K.L., Sulima A.A., Chashchina N.A., Stein E.R., Kolobkov A.V.* Appl. 30.12.2011; publ. 20.07.2012. Bull. No. 20.
8. *Belousov A.A., Volkhin Yu.N., Dubrovskaya A.A.* Review of possible options for the implementation of ultra-wideband analog processors of decimeter, centimeter, and millimeter wavelength ranges using methods and means of radiophotonics. Second Scientific and Technical Conference "Prospects for the development of long-range radar detection and integrated systems and complexes of information support for Aerospace defense": Conference materials (Moscow, 2014). Moscow: Radiotekhnika, 2014. Pp. 122–135.
9. Morozov O. G., Ilyin G. I. Amplitude-phase modulation system of radio photons. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2014. No. 1 (20). Pp. 6–42.
10. Starikov R.S. Photonic A/D converters. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2015. No. 2. Pp. 3–39.
11. Morozov O.G., Gabdulkhakov I.M. radiationa Universal system of quantum key distribution with frequency encoding. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2015. No. 2 (26). Pp. 6–18.
12. Perepelitsyn Yu.N. Devices of optical signal processing based on photocurrent domain instability. Conf. Materials. "Microwave microelectronics-2012". Saint-Petersburg. 2012. Pp. 3–24.