

Архитектура передающего тракта радиофотонного диаграммообразующего устройства для двухлучевой антенной решётки TDM-MIMO РЛС

А.С. Манько¹, В.В. Головин²

^{1,2} ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33

¹E-mail: ASManko@sevsu.ru

²E-mail: VVGolovin@sevsu.ru

В работе предложена архитектура передающего тракта радиофотонного диаграммообразующего устройства для TDM-MIMO РЛС, обеспечивающая формирование двух независимых лучей с гибридной ортогонализацией по времени и частоте. Предложены принципы построения системы с возможностью динамического переключения между двумя режимами: высокоскоростной обзор для мониторинга движущихся целей и режим максимальной дальности для обнаружения удалённых объектов. Схема основана на технологии Radio-over-Fiber с использованием программируемых оптических переключателей и TTD-линий на основе ФИС для частотно-независимого фазирования. Преимуществами являются улучшенные характеристики обнаружения, сниженные массогабаритные показатели и повышенная электромагнитная совместимость. Выявлены ограничения по динамическому диапазону и фазовой стабильности радиофотонного тракта, обсуждены возможные пути их преодоления и дальнейшие направления развития архитектуры. Полученные результаты могут представлять интерес при создании систем дистанционного зондирования ближнего и среднего радиуса действия.

Ключевые слова: радиофотоника, TDM-MIMO, РЛС, диаграммообразующее устройство, Radio-over-Fiber (RoF), True-Time Delay (TTD), фотонные интегральные схемы (ФИС)

Architecture of the Transmitter Path in a Microwave Photonic Beamforming Network for Dual-Beam TDM-MIMO Radar Antenna Array

A.S. Manko, V.V. Golovin

Sevastopol State University.

This paper presents the architecture of the transmitting path in a microwave photonic beamforming network for TDM-MIMO radar systems, enabling the generation of two independent beams with time- and frequency-based orthogonalization. The proposed design principles include dynamic switching between two operating modes: high-speed scanning for tracking moving targets and maximum-range mode for detecting distant objects. The scheme is based on Radio-over-Fiber technology, incorporating programmable optical switches and TTD lines based on photonic integrated circuits to achieve frequency-independent beamforming. Key benefits include enhanced detection performance, reduced size and weight, and improved electromagnetic compatibility. Limitations in dynamic range and phase stability of the microwave photonic path are identified, and its potential mitigation strategies and future development directions are discussed. The results hold promise for developing short- and medium-range remote sensing systems.

Keywords: microwave photonics, TDM-MIMO, radar, beamforming network, Radio-over-Fiber (RoF), True-Time Delay (TTD), Photonic Integrated Circuits (PIC)

Введение

В современных системах дистанционного зондирования всё острее стоит задача повышения углового разрешения радиолокационных станций (РЛС) при жёстких

ограничениях на массогабаритные характеристики антенных систем (АС). Одним из перспективных путей её решения является применение TDM-MIMO РЛС (Time-Division Multiplexing Multiple-Input Multiple-Output). Ранее было показано [1], что использование временного разделения каналов позволяет при относительно небольшом числе физических излучателей сформировать большую виртуальную апертуру и одновременно повысить энергетический потенциал станции за счёт концентрации всей излучаемой мощности в каждом временном слоте.

Вместе с тем, последовательный характер излучения в TDM-MIMO РЛС приводит к заметному увеличению длительности кадра обзора и, как следствие, к снижению частоты обновления радиолокационной информации. Для многих задач радиолокации и дистанционного зондирования, где требуется мониторинг движущихся целей или быстро протекающих процессов, это ограничение может становиться критичным.

Одним из эффективных способов его компенсации может являться переход к многолучевым режимам работы, когда в течение одного временного слота одновременно формируется несколько независимо управляемых лучей диаграммы направленности (ДН). Однако, реализация такого подхода на традиционной элементно-компонентной базе СВЧ сопряжена с серьёзными трудностями. В первую очередь, это связано с эффектом углового «расплывания луча» ДН при использовании широкополосных зондирующих сигналов. Кроме того, необходимо обеспечить сохранение когерентности при жёстких эксплуатационных условиях, а также обеспечить ортогональность множества сигналов без значительного усложнения архитектуры.

В связи с этим, широкими перспективами обладают реализации TDM-MIMO РЛС, основанные на применении компонентной базы и технологий радиофотоники. Используя истинные линии задержки (TTD — True Time Delay), технологию волоконно-оптического распределения сигналов (RoF — Radio-over-Fiber) и программируемые фотонные интегральные схемы (ФИС), можно обеспечить как частотно-независимое диаграммообразование лучей ДН, так и гибкое управление режимами работы в распределённых антенных системах TDM-MIMO [2-4].

В настоящей работе предлагается архитектура радиофотонного диаграммообразующего устройства (РФДОУ) для антенной решётки TDM-MIMO РЛС, которая реализует формирование двухлучевой ДН с возможностью динамического переключения между режимами высокоскоростного обзора пространства и максимальной дальностью действия. Разработанная архитектура может представлять большой практический интерес при проектировании систем дистанционного зондирования ближнего и среднего радиуса действия.

Принципы построения двухлучевой TDM-MIMO РЛС

Применительно к классическим TDM-MIMO РЛС полный цикл работы, называемый кадром, делится на M временных слотов, в каждом из которых активным является только один передающий канал $Tx-m$. Это позволяет обеспечить максимальную пиковую мощность излучения РЛС в каждом временном слоте, однако в то же время длительность одного кадра увеличивается пропорционально количеству передатчиков. В результате, частота обновления радиолокационной картины снижается, что ограничивает возможности оперативного дистанционного зондирования динамичных объектов или обнаружения быстро движущихся радиолокационных целей.

Увеличить скорость полного обзора пространства без потери основных преимуществ архитектуры TDM-MIMO возможно за счёт перехода к двухлучевой ДН. При этом, в зависимости от решаемых задач, предлагается реализовать возможность переключения между двумя режимами работы, что демонстрируется на рис. 1.

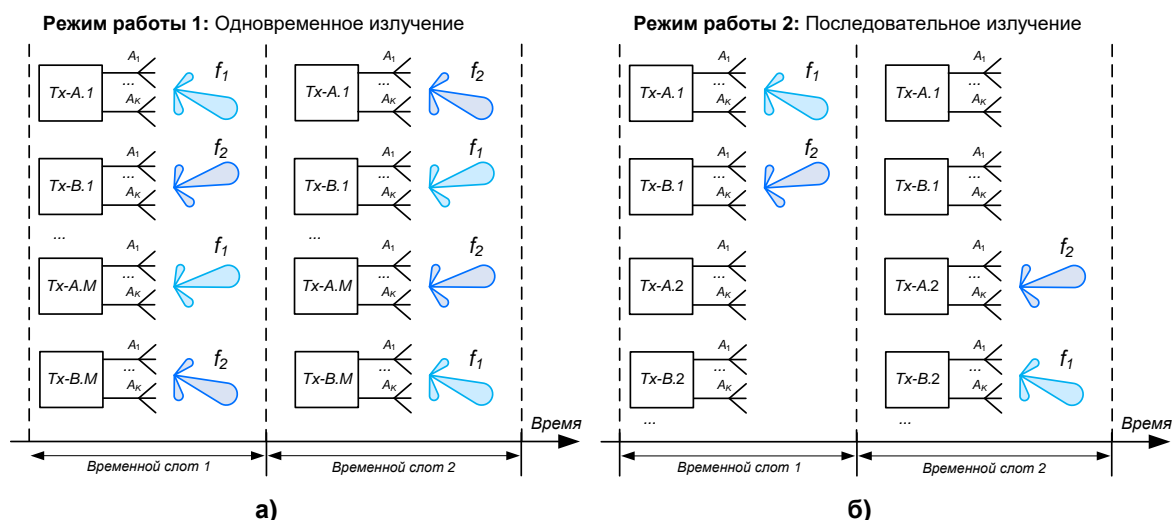


Рис. 1. Пояснение к предлагаемым режимам работы двухлучевой TDM-MIMO РЛС:
а — режим максимальной скорости обзора пространства;
б — режим максимальной дальности действия РЛС

В режиме высокоскоростного обзора (Режим работы 1) все передающие модули антенных подрешёток Tx разделены на две группы — Tx-A и Tx-B. В первом временном слоте группа модулей Tx-A.X формирует луч на несущей частоте f_1 , а вторая группа модулей Tx-B.X — на частоте f_2 . В следующем временном слоте группы меняются местами. Таким образом, за два временных слота весь сектор пространства облучается дважды (по одному разу на каждой частоте), что вдвое увеличивает частоту обновления информации по сравнению с классической TDM-MIMO при том же числе подрешёток.

В режиме максимальной дальности действия (Режим работы 2) используются подходы, традиционные для TDM-MIMO. В каждом временном слоте одновременно активной является только одна подрешётка в группе Tx-X.m, причём она может формировать либо луч f_1 (Tx-A.m), либо луч f_2 (Tx-B.m) по некоторому заданному алгоритму. Таким образом, при таком режиме работы сохраняется полная концентрация подводимой мощности излучения, что соответствует улучшенным характеристикам обнаружения слабоконтрастных или удалённых целей.

С одной стороны, для формирования устойчивой ДН и сохранения качественных характеристик обнаружения в широкой полосе частот диаграммообразующее устройство (ДОО) должно строиться на принципах истинного фазирования (TTD) [5]. С другой стороны, для возможности гибкого изменения режима работы TDM-MIMO РЛС необходимо переключать сигнальные тракты не только с малым временем коммутации, но и с высокой степенью синхронизации для уменьшения уровня фазовых ошибок [6]. Всё это обуславливает перспективность перехода к технологиям и компонентам радиофотоники при построении ДОО MIMO РЛС.

Разработка архитектуры радиофотонного диаграммообразующего устройства

Разработанная архитектура РФДОО TDM-MIMO РЛС предназначена для построения передающего тракта и обеспечивает формирование двухлучевой ДН с возможностью гибкого переключения ранее описанных режимов (рис. 2).

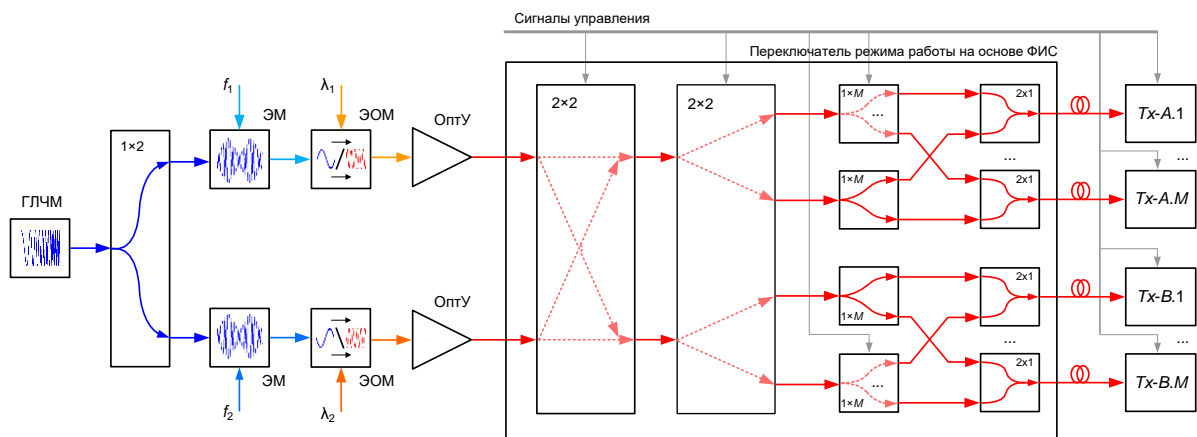


Рис. 2. Обобщённая структурная схема передающего тракта РФДОУ для двухлучевой TDM-MIMO РЛС

Информационный спектр с заданными параметрами формируется генератором непрерывного электрического линейно-частотно-модулированного зондирующего сигнала (ГЛЧМ). Далее этот сигнал поступает на два независимых СВЧ модулятора (ЭМ), на каждом из которых осуществляется модуляция на несущие частоты f_1 и f_2 соответственно, что обеспечивает ортогональность лучей за счёт их частотного разделения (соответствует применению режима FDM — Frequency-Division Multiplexing). Далее эти радиосигналы посредством электрооптических модуляторов (ЭОМ) переносятся в оптическую область на несущие λ_1 и λ_2 . В качестве ЭОМ могут применяться устройства на основе интерферометра Маха-Цендера, которые обеспечивают достаточный уровень глубины модуляции при малых значениях полуволнового напряжения [7]. Для компенсации потерь на преобразователе и последующих элементах тракта модулированные оптические сигналы поступают на оптический усилитель (ОпТУ), в качестве которого может выступать, например, эрбиевый волоконный усилитель.

Ключевым элементом архитектуры является переключатель режима работы на основе ФИС, который реализует логику коммутации и распределения оптических сигналов в соответствии с выбранным режимом работы. Этот блок позволяет динамически изменять конфигурацию тракта: в режиме высокоскоростного обзора (Режим работы 1) сигналы λ_1 и λ_2 одновременно распределяются на две группы подрешёток, с возможностью их переключения в следующем временном слоте; в режиме максимальной дальности (Режим 2) сигналы распределяются последовательно во времени на отдельные подрешётки. Логика работы переключателя режима, задающая принципы диаграммообразования глобальной антенной решётки из отдельных модулей Tx в составе TDM-MIMO РЛС, демонстрируется на рис. 3.

Для распределения сигналов и диаграммообразования в рамках общей антенной решётки используются отрезки одномодовых ВОЛС, которые за счёт низких погонных потерь сигнала (около 0,2 дБ/км при длине волны несущей 1550 нм) позволяют разносить центральный модуль обработки и периферийные передающие модули Tx (антенные подрешётки) на расстояния вплоть до нескольких километров [8].

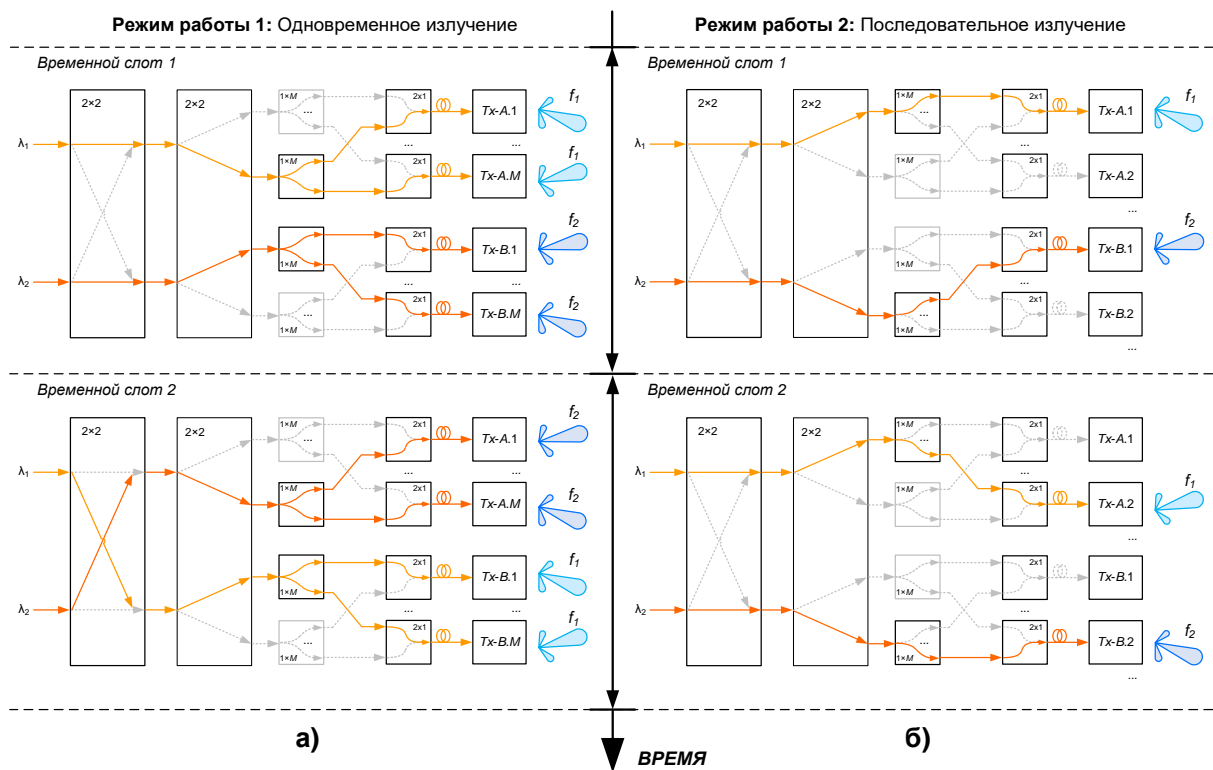


Рис. 3. Пояснение к логике работы переключателя режима передающего тракта РФДОУ:
а — режим максимальной скорости обзора пространства;
б — режим максимальной дальности действия РЛС

Архитектура отдельного передающего модуля (подрешётки) Тх показана на рис. 4. Для простоты рассматривается вариант с использованием антенной решётки из четырёх излучателей (может применяться ММО система, принципы разработки которой показаны в [9,10]), но при необходимости схема может быть легко масштабирована.

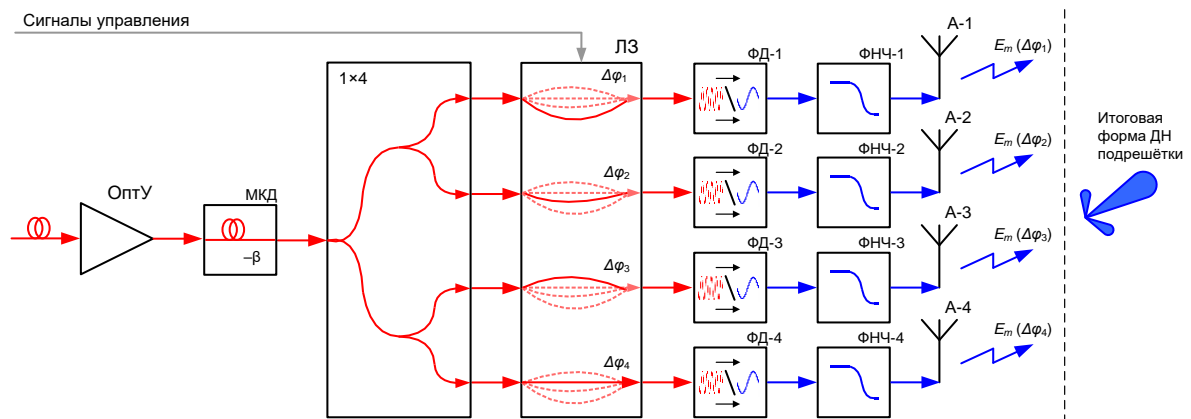


Рис. 4. Обобщённая структурная схема передающего модуля

Входящий оптический сигнал из распределительной ВОЛС сначала усиливается на ОптУ и при необходимости поступает на модуль компенсации дисперсии (МКД). Далее сигнал разделяется на заданное количество каналов, соответствующее количеству излучателей (в данном случае делитель 1:4). Разветвлённые независимые сигналы поступают на программируемые оптические линии задержки (ЛЗ), которые обеспечивают частотно-независимое фазирование сигналов с фазовыми сдвигами $\Delta\varphi_i$

для формирования ДН подрешётки. Оптические ЛЗ являются ключевым элементом РФДОУ и могут быть реализованы в качестве ФИС на основе регулируемых или переключаемых волноводных структур.

После ТТД оптические сигналы преобразуются в СВЧ-область с помощью фотодетекторов (ФД), за которыми следуют фильтры нижних частот (ФНЧ) для подавления нежелательных гармоник. Сформированные радиосигналы с заданными фазовыми сдвигами излучаются отдельными антеннами, в результате чего формируется итоговая ДН передающей подрешётки.

Преимущества и ограничения разработанной архитектуры

Таким образом, использование технологий RoF и ТТД при построении передающего тракта РФДОУ TDM-ММО РЛС обеспечивает следующий перечень преимуществ [11].

Во-первых, совместное использование технологий TDM и FDM в оптической области позволяет динамически изменять режим работы в зависимости от характера выполняемых задач. В режиме высокоскоростного обзора достигается двукратное увеличение частоты обновления информации без значительных потерь в угловом разрешении, что может быть полезно при мониторинге быстро движущихся объектов (транспортные потоки, воздушные и надводные цели и др.). При необходимости увеличения зоны действия РЛС следует применять режим последовательного излучения, который обеспечивает хорошие характеристики обнаружения (угловое сверхразрешение) стационарных или медленно движущихся целей (общий мониторинг пространства, картографирование, наблюдение за структурой зданий и др.).

Во-вторых, разработанные принципы построения архитектуры передающего тракта РФДОУ обеспечивают улучшенные характеристики обнаружения, что связано с сохранением формы главного луча и боковых лепестков ДН во всём диапазоне зондирующего широкополосного ЛЧМ-сигнала.

В-третьих, распределённая архитектура на базе ВОЛС способствует улучшению массогабаритных характеристик. Конструктивная реализация периферийных модулей получается компактной за счёт выноса блоков обработки на центральный модуль, который может быть размещена на удалении от антенной решётки. В свою очередь, это может значительно упростить интеграцию TDM-ММО РЛС в стационарные или подвижные платформы систем радиолокации и дистанционного зондирования.

В-четвёртых, использование волоконно-оптических и интегрально-оптических компонентов положительно влияет на электромагнитную совместимость и помехозащищённость РЛС к внешним воздействиям.

Вместе с тем, архитектура имеет ряд существенных ограничений, связанных с особенностями компонентной базы радиофотоники.

Одним из главных ограничений является незначительный динамический диапазон радиофотонного тракта [12-13], который обуславливается несколькими совокупными факторами:

- нелинейность преобразования ЭОМ и ВОЛС, которая особенно проявляется при уровнях входной оптической мощности порядка 20 дБм (200 мВт);
- частотно-селективные замирания отдельных спектральных составляющих зондирующего сигнала, вызванные влиянием дисперсионных эффектов;
- невысокая допустимая входная мощность фотодетекторов, которая ограничивается эффектом насыщения и на практике не превышает нескольких десятков или сотен мВт.

Кроме того, использование ВОЛС при большой протяжённости тракта, либо при жёстких эксплуатационных условиях (температурные и вибрационные воздействия) требует тщательного контроля фазовой стабильности, что может нарушить

когерентность сигналов в распределённой системе из-за возникающих фазовых дрейфов. Это повышает сложность реализации, поскольку может потребоваться использование дорогостоящих фазостабильных ВОЛС и лазерных источников с синхронизацией мод (MLL — Mode-Locked Laser), имеющих высокую степень когерентности [14-15].

Таким образом, указанные недостатки хоть и ограничивают возможности текущего применения радиофотоники при построении ДОУ TDM-MIMO РЛС, однако могут быть преодолены методами аналоговой и цифровой линейаризации [16-17], а также пассивной и активной стабилизации тракта [18]. Вопросы применения указанных методов требуют тщательной проработки и составляют основу дальнейших исследований РФДОУ для многолучевых TDM-MIMO РЛС.

Заключение

В работе предложена архитектура РФДОУ для антенной решётки TDM-MIMO РЛС, которая обеспечивает формирование двухлучевой ДН с возможностью динамического переключения между режимами высокоскоростного обзора пространства и максимальной дальности действия. Разработанная схема передающего тракта основана на технологиях RoF и TTD, что позволило реализовать частотно-независимое диаграммообразование, распределение сигналов на периферийные модули подрешёток с помощью ВОЛС и возможность переключения сигналов в оптической области. Полученные результаты могут быть перспективными при создании компактных систем дистанционного зондирования ближнего и среднего радиуса действия с улучшенными характеристиками углового разрешения.

Направления дальнейших исследований могут быть связаны с реализацией ключевых блоков радиопотонного тракта, а также экспериментальной отработкой упрощённой конфигурации разработанной архитектуры. Кроме того, проработки требуют вопросы линейаризации и увеличения фазовой стабильности радиопотонного тракта. Наконец, перспективным видится расширение предложенных принципов на приёмный тракт РФДОУ с целью полной реализации возможностей когерентной обработки сигналов в многолучевых TDM-MIMO РЛС.

Литература

1. Манько А.С., Головин В.В., Слезкин Г.В. Радиофотонное диаграммообразование в антенных системах MIMO радиолокации // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2026. 18(2). С. 177-192.
2. Serafino G., Maresca S., Di Mauro L., Tardo A., Cuillo A., Scotti F. A Photonics-Assisted Multi-Band MIMO Radar Network for the Port of the Future // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2021. 27(6). P. 1-13.
3. Zhang F., Sun G., Zhou Y., Gao B., Pan S. Towards High-Resolution Imaging With Photonics Based Time Division Multiplexing MIMO Radar // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2022. 28(5). P. 1-10.
4. Scaffardi M., Scotti F., Malacarne A., Rinaldi L., Camponeschi F., Amir M. Demonstration of a Widely Distributed Multistatic Multiband Coherent Photonics-Based MIMO Radar in a Coastal Surveillance Scenario // Proc. 2025 55th EuMC. 2025. P. 416-419.
5. Abdalrazak M., Majeed A., Abd-Alhameed R. The Beam Squint Effects in Antenna Arrays at Millimeter Bands // IEEE. 2024. 21(1). P. 16-22.
6. Serafino G., Ghelfi P., Perez-Millan P., Villanueva G., Palaci J., Cruz J. Phase and Amplitude Stability of EHF-Band Radar Carriers Generated From an Active Mode-Locked Laser // J. Lightwave Technol. 2011. 29(23). P. 3551-3559.
7. Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Применение модели электрооптического модулятора Маха - Цандера в оптической диаграммо-образующей схеме антенной решетки // СВЧ-

- техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015) : Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции. В 2-х томах, Севастополь, 06–12 сентября 2015 года. 2015. С. 1031-1032.
8. Lembo L., Ghelfi P., Bogoni A. Analysis of a Coherent Distributed MIMO Photonics-Based Radar Network // Proc. 2018 15th EuRAD. 2018. P. 170-173.
9. Манько А.С., Головин В.В. Антенная решётка МИМО 4х4 для приложений 5G IoT // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2024. № 7. С. 114.
10. Manko A.S. Design and Research of Precoding Matrix for MIMO 4x4 Antenna Array with Modified Radiation Pattern and Polarization Performance // Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies. 2025. No. 4. P. 186-192.
11. Манько А.С., Головин В.В. Перспективы применения радиофотонной компонентной базы для построения интеллектуальных антенных систем // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2025. № 8. С. 120.
12. Li S., Zheng X., Zhang H., Zhou B. Highly linear radio-over-fiber system incorporating a single-drive dual-parallel Mach–Zehnder modulator // IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 22. No. 24. P. 1775-1777.
13. Li W., Wang L., Zhu N. Highly linear microwave photonic link using a polarization modulator in a sagnac loop // IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 26. No. 1. P. 89-92.
14. Корепанов К.Э., Кузнецов А.А. Фазостабильные волоконно-оптические тракты для систем ROF // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2024 : Сборник тезисов докладов XI ММНТК молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 300-летию со дня основания Российской Академии наук, 90-летию со дня рождения первых космонавтов СССР Ю.А. Гагарина и А.А. Леонова, 90-летию первого выпуска КАИ, 65-летию начала регулярного телевизионного вещания в Республике Татарстан, Казань, 11–12 апреля 2024 года. 2024. С. 195-196.
15. Мажирина Ю.А., Мельников Л.А. Квантовые флуктуации в волоконных лазерах с синхронизацией мод // Журнал технической физики. 2025. Т. 95. № 5. С. 887-891.
16. Bai Y., Huang S., Gao X., Lei M., Zheng Z., Song X., Song C., Su Z. High Power Efficiency and Dynamic Range Analog Photonic Link with Suppressed Dispersion-Induced Power Fading // J. of Lightwave Technol. 2020. Vol. 38. No. 21. P. 5973-5980.
17. Khazani M., Helaoui M., Chen W., Ghannouchi F. A DNN-Based Digital Predistortion for Harmonically-Driven Radio-Over-Fiber Systems // Proc. of 2025 PGC. 2025. P. 1-4.
18. Huang S., Tjoelker R. Stabilized Photonic Links for Frequency and Time Transfer in Antenna Arrays // Proc. of 38th PTTI. 2006. P. 293-304.