

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.372.22
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Модульная многопозиционная когерентная цифровая радиофотонная система

И.В. Унченко^{1, 2, 3, @},
А.А. Емельянов^{1, 2, 3}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт, Калужская область,
г. Жуков, 249192 Россия

³ Технологии аппаратных решений, Калужская область, г. Малоярославец, 249096 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: unchenkoivan@gmail.com

Резюме

Цели. Разработка межвидовых и межклассовых способов построения радиотехнических когерентных систем на основе модульной дополняемой структуры.

Методы. В качестве базового набора для построения тракта цифровой радиофотонной системы предлагается рассмотреть комплекс модулей и субмодулей, не имеющих узкой специализации и в совокупности составляющих широкополосную гибкую аппаратно-реконфигурируемую программно-определяемую радиотехническую структуру. Благодаря широкополосности и дополняемой структуре модули и субмодули имеют множество применений, как в качестве самостоятельных устройств, так и в составе более сложных систем.

Результаты. Представлены функциональные схемы современных цифровых приемников-формирователей, модулей усиления радиочастотных сигналов, модулей преобразования радиочастотных сигналов в оптический сигнал, радиофотонной синхросети формирования тактовых сигналов. Приведены расчеты вносимой фазовой ошибки кварцевого одномодового волокна и графики зависимости изменения фазы сигнала от внешних воздействующих факторов. Предложена концепция интеграции представленных модулей и построения модульной приемо-передающей многопозиционной широкополосной когерентной цифровой радиофотонной системы. Приведены расчеты диаграмм направленности и результаты математического моделирования отклонения луча широкополосной антенной линейки. Показаны антенные системы на ее основе.

Выводы. Предложенные методы позволят существенно сократить сроки разработки новых типов систем за счет линейки готовых технических решений. Разработанные устройства обладают параметрами, не уступающими лучшим мировым аналогам, а в рамках интеграции в систему позволяют превзойти существующие решения. Апробирование разработок проведено в рамках НИОКР на базе АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» и ООО «Технологии аппаратных решений». Предложенные решения интегрированы на уровне подсистем в перспективные разработки продукции гражданского и специального назначения. Дальнейшее развитие концепции построения сверхширокополосных устройств позволит достигнуть нового уровня в технологии построения модульных многопозиционных когерентных цифровых радиофотонных систем.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, радар, активная фазированная антенная решетка, лазер, фотодиод, цифроаналоговый преобразователь, аналогово-цифровой преобразователь, цифровое диаграммообразование

• Поступила: 17.01.2022 • Доработана: 17.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.06.2022

Для цитирования: Унченко И.В., Емельянов А.А. Модульная многопозиционная когерентная цифровая радио-фотонная система. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Photonics-based modular multistate digital coherent system

Ivan V. Unchenko ^{1, 2, 3, @},
Andrey A. Emelyanov ^{1, 2, 3}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Kaluga Research Institute of Radio Engineering, Kaluga oblast, Zhukov, 249192 Russia

³ Hardware Solutions Technologies, Kaluga oblast, Maloyaroslavets, 249096 Russia

@ Corresponding author, e-mail: unchenkoivan@gmail.com

Abstract

Objectives. The study aimed to develop interspecies and interclass methods for constructing coherent radio engineering systems based on a modular complementary structure.

Methods. A set of modules and submodules having no narrow specialization and together constituting a flexible broadband hardware-reconfigurable software-defined radio engineering structure is considered as the basic set for constructing a digital radio photonic system path. Due to their broadbandness and complementary structure, modules and submodules have many applications both as self-sustained devices and as part of more complex systems.

Results. Functional diagrams of modern digital receiver-shapers, as well as modules for amplifying radio frequency signals and converting radio frequency signals into an optical signal are presented along with a radio photonic synchronization network for generating clock signals. Calculations of the introduced phase error of a quartz single-mode fiber and graphs of the dependence of the change in the signal phase on external influencing factors are given. A concept for integrating the presented modules into the construction of a modular transceiver multiposition wideband coherent digital radio photonic system is proposed. The results of calculating radiation patterns and mathematical modeling the beam deflection of a broadband antenna array are presented along with antenna systems based thereon.

Conclusions. The proposed circuit design solutions allow the time required for developing new types of systems to be significantly reduced due to the range of ready-made technical solutions. Not only are the parameters of the developed devices comparable to the best world analogues, but they also surpass existing solutions in terms of system integration. The developments have been tested under R&D project at the Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology and Hardware Solution Technologies (TAR). The proposed solutions are integrated at the subsystem level into advanced developments of products for civil and special purpose. Further development of the concept of building ultra-wideband devices allows reaching a new level in the technology of constructing modular multiposition coherent digital radio photonic systems.

Keywords: digital antenna arrays, radar, active phased antenna array, laser, photodiode, digital-to-analog converter, analog-to-digital converter, digital beamforming

• Submitted: 17.01.2022 • Revised: 17.05.2022 • Accepted: 24.06.2022

For citation: Unchenko I.V., Emelyanov A.A. Photonics based modular multistate digital coherent system. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время цифровые антенные решетки (ЦАР), широко распространенные в системах связи, находят все большее применение в радиолокационных системах (РЛС), в системах гражданского и специального назначения. Постоянное повышение рабочих частот и расширение полосы частот современных систем связи и РЛС, а также общие тенденции развития электроники и компонентной базы приводят к вытеснению традиционных активных фазированных антенных решеток (АФАР). На сегодняшний день на рынке представлены аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие вести прямое цифровое диаграммоформирование (ЦДФ) в широкой полосе частот, а волоконно-оптические линии переноса частот дают возможность переносить синтезированные сигналы в любой участок спектра [1, 2]. Работы [3–9] посвящены дальнейшему развитию концепции построения сверхширокополосных устройств.

Цель настоящего исследования – разработать межвидовые и межклассовые способы построения радиотехнических когерентных систем на основе модульной дополняемой структуры, что позволит достигнуть нового уровня в технологии построения модульных многопозиционных когерентных цифровых радиофотонных систем.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТРАКТА ЦИФРОВОЙ РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ

В качестве интегрируемого тракта цифровой радиофотонной системы предлагается рассмотреть комплекс модулей и субмодулей, не имеющих узкой специализации и в совокупности составляющих широкополосную гибкую аппаратно-реконфигурируемую программно-определяемую радиотехническую структуру. Благодаря широкополосности и дополняемой структуре модули и субмодули имеют множество применений, как в качестве самостоятельных устройств, так и в составе более сложных систем.

В состав такой системы предлагается включить следующие компоненты: базовый цифровой модуль (БЦМ), субмодуль прямого усиления

радиочастотного сигнала (СУРС), субмодуль оптоэлектронного переноса частот (СОПЧ), вспомогательный модуль управления и питания субмодулей, радиофотонную синхросеть (РФС), фазированные широкополосные антенные решетки.

БЦМ предназначен для цифровой обработки и синтеза радиочастотных (РЧ) сигналов в широком диапазоне частот. Он является самостоятельным приемопередающим устройством. Расширить функционал БЦМ можно с помощью установки дополнительных субмодулей. В общем случае в состав предлагается включить двухканальные АЦП и ЦАП, программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), цифровой сигнальный процессор (ЦСП), малошумящие усилители (У), управляемые аттенюаторы (Ат), набор переключателей (П), полосовых фильтров (ПФ) и схему квадратурной обработки входного сигнала спаренными АЦП, содержащую переключатели и направленные делители (Д). Структурная схема такого БЦМ представлена на рис. 1.

СУРС предназначен для усиления принимаемых и передаваемых сигналов, коммутации антенных входов на прием-передачу. На рис. 2 представлена структурная схема субмодуля.

СУРС состоит из приемных и передающих трактов. Для проведения самоконтроля в рамках системы используются коммутируемый тракт контрольного сигнала и каналы передатчика с интегрированными направленными ответвителями. Функционально СУРС состоит из направленных делителей, направленных ответвителей, управляемых аттенюаторов, малошумящих усилителей, каскадов усилителей мощности, переключателей и ограничителей (ОГР). Предлагается устанавливать СУРС на несущую печатную плату БЦМ, где организована стандартизированная схема питания субмодулей и канал информационного обмена (КИО) со сквозным протоколом управления и инициализации субмодулей.

СОПЧ – четырехканальный двунаправленный (2×2) субмодуль оптикоэлектронного и электрооптического преобразования частот широкополосных сигналов, синтезируемых и оцифровываемых приемопередающими каналами модуля БЦМ. Предлагается парное использование разнесенных модулей СОПЧ. Функционально приемный

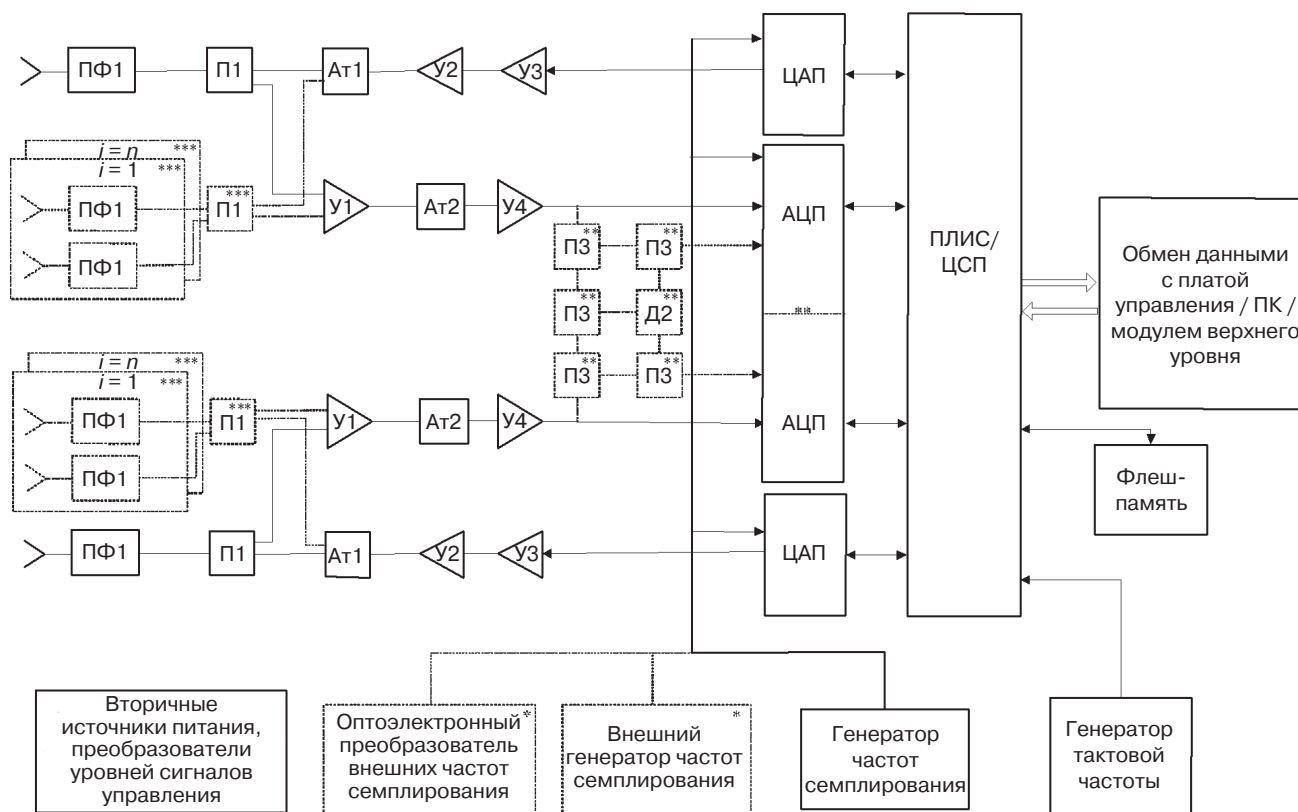


Рис. 1. Структурная схема БЦМ

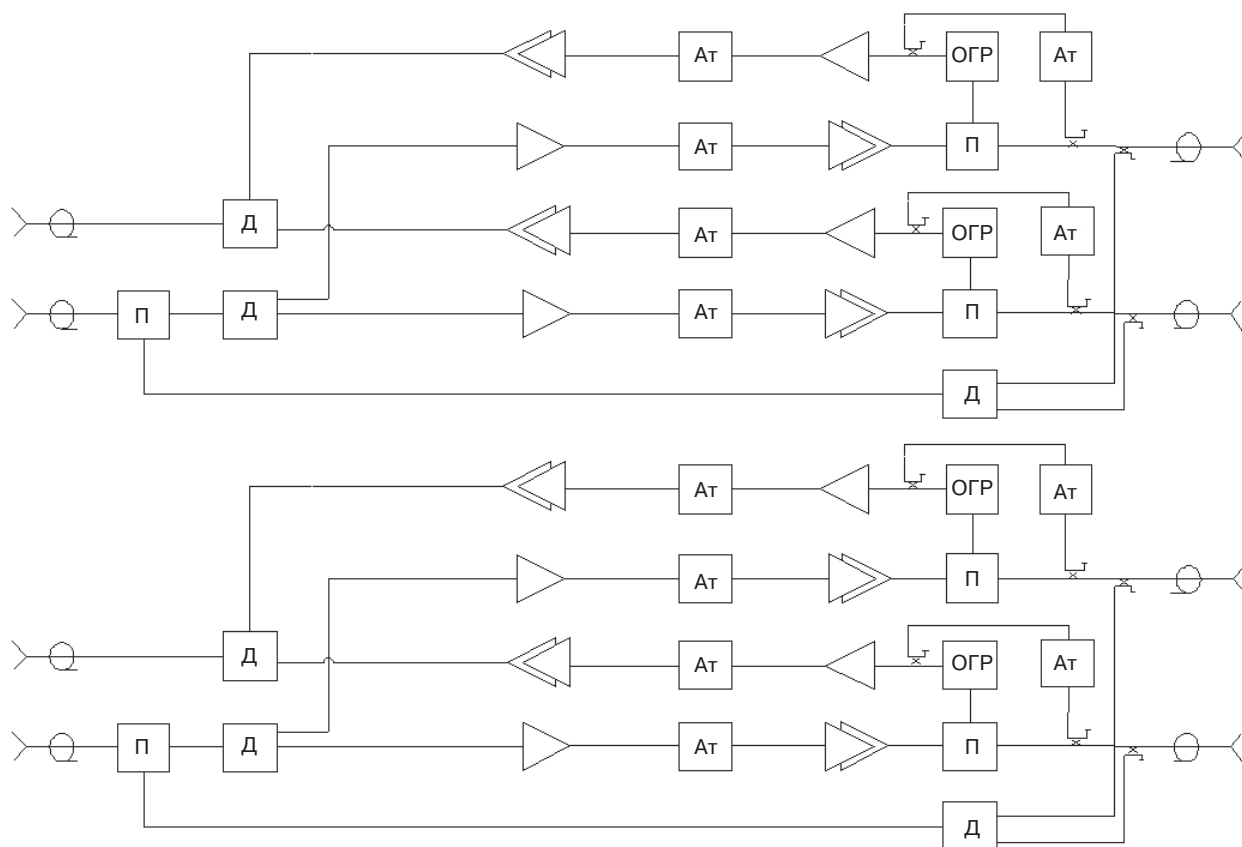


Рис. 2. Структурная схема СУРС

канал СОПЧ состоит из радиопотонного малошумящего усилителя, оптического модулятора, в котором осуществляется дополнительная модуляция сигналом местного гетеродина, выходного фотодетектора, преобразующего оптический сигнал в радиочастотный. Передающий канал предназначен для переноса радиочастотного сигнала в оптический диапазон и передачи сигнала по волоконно-оптическим линиям связи в приемник разнесенного спаренного СОПЧ. Научно-технический и практический задел для реализации СОПЧ создан на базе ООО «Технологии аппаратных решений» (ООО «ТАР») в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика»^{1, 2, 3} при поддержке Фонда содействия инновациям⁴.

Структурная схема СОПЧ представлена на рис. 3.

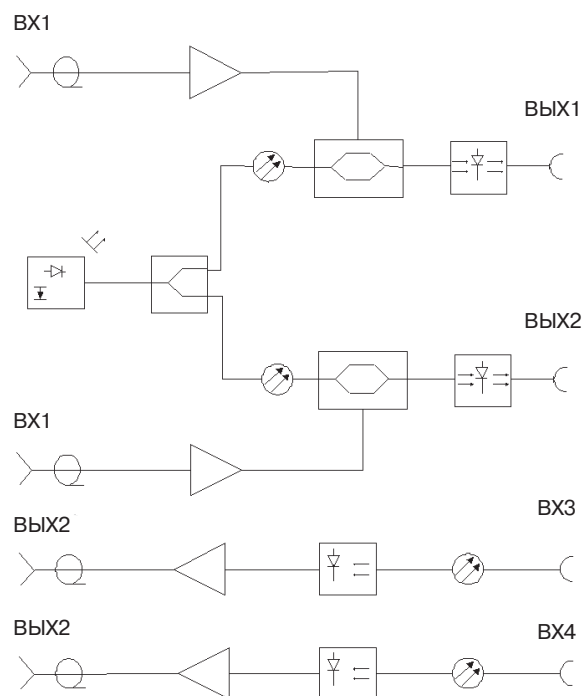


Рис. 3. Структурная схема СОПЧ

РАДИОФОТОННАЯ СИНХРОСЕТЬ

РФС предназначена для тактирования БЦМ оптическим синхросигналом. Особенностью предлагаемой системы фазовой синхронизации для всех АЦП, ЦАП и ПЛИС является использование единого высокостабильного источника тактовых сигналов, распределение которых осуществляется по одномодовым ВОЛС равной электрической длины, что снижает влияние собственных шумов источника тактовых сигналов и общих цепей их распределения (до оптического делителя) на ошибки измерения разности фаз принимаемого сигнала. Использование одномодового волокна позволяет снизить потери в тракте передачи, а также исключить влияние межмодовой дисперсии, которая приводит к искажению сигнала и снижению пропускной способности оптоволокну⁵. Структура радиопотонной синхросети, включающей задающий генератор и два разнесенных радиоэлектронных модуля АЦП, приведена на рис. 4.

Генератор тактовых сигналов формирует тактовую частоту АЦП – f_1 (S-диапазон), тактовую частоту сигнального процессора – f_2 (для быстродействующих АЦП, как правило, $f_1 = 2if_2$, где $i = 1, 2, 4$) и импульсные сигналы синхронизации и сброса АЦП. Для исключения временного расхождения четверки этих сигналов все они передаются по одному оптоволокну длиной, ориентировочно, несколько

¹ Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика: отчет о НИОКР (промежуточ.). ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2021. 48 с. № ГР 121031900169-9. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/MYS684SV1OP68CW4NR4SZHWO>, дата обращения 01.06.2022. [Development, manufacture and testing of a prototype photonic transceiver: R&D report (interim), TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V., et al. Maloyaroslavets, 2021. 48 p. Grant No. 121031900169-9. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/MYS684SV1OP68CW4NR4SZHWO>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

² Радиофотонный приемопередатчик: секрет производства (ноу хау). ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2022. 53 с. № ГР 622011200395-5. <https://www.rosrid.ru/rid/detail/QPGRZIV0EEAEYARJU4BQ3I34>, дата обращения 01.06.2022. [Photonic radio transceiver: know-how. TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V., et al. Maloyaroslavets, 2022. 53 p. Grant No. 622011200395-5. <https://www.rosrid.ru/rid/detail/QPGRZIV0EEAEYARJU4BQ3I34>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

³ Разработка, изготовление и испытания прототипа радиопотонного приемопередатчика: отчет о НИОКР. ООО «ТАР». Руководитель Унченко И.В., исполнители: Емельянов А.А., Унченко И.В. и др. Малоярославец, 2022. 70 с. № ГР 222021700414-1. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/UJCVU86GQ2YVRM2MUVQMY79U>, дата обращения 01.06.2022. [Development, manufacture and testing of a prototype photonic transceiver: R&D report (interim), TAR, LLC. Director Unchenko I.V., executives: Emelyanov A.A., Unchenko I.V. et al. Maloyaroslavets, 2022. 70 p. Grant No. 222021700414-1. <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/UJCVU86GQ2YVRM2MUVQMY79U>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

⁴ <https://fasie.ru/>, дата обращения 01.06.2022. [<https://fasie.ru/>. Accessed June 01, 2022 (in Russ.).]

⁵ Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем: учебное пособие. М.: МИРЭА; 2010. 112 с. [Belkin M.E. Components of fiber-optic systems: tutorial. Moscow: MIREA; 2010. 112 p. (in Russ.).]

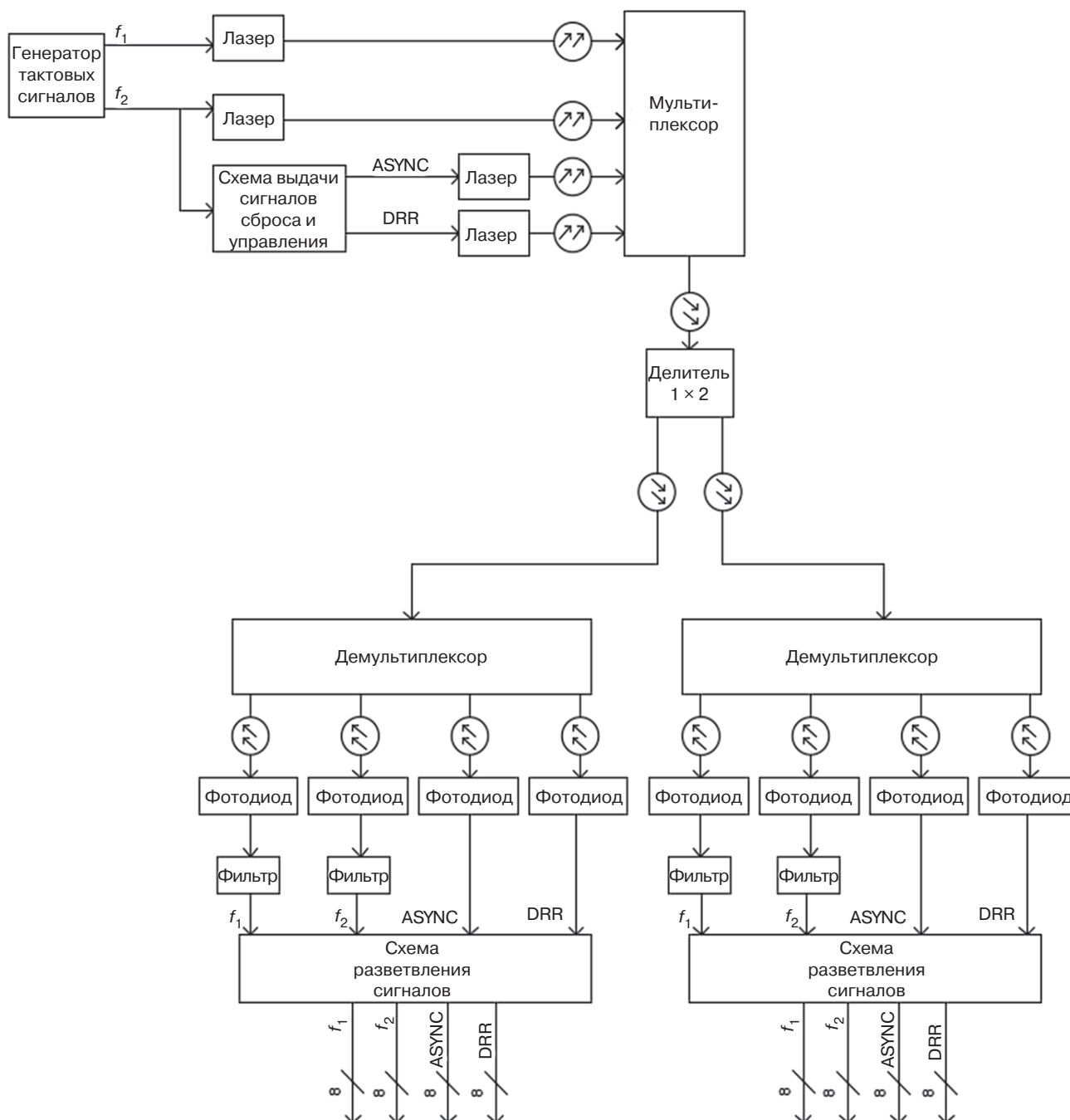


Рис. 4. Структура радиофотонной синхросети

десятков метров, а для их независимой передачи и приема используются четыре разнесенных по частоте лазера, оптические спектральные мультиплексоры и демультиплексоры. В цепях прохождения тактовых сигналов после фотодиодов установлены полосовые фильтры, при этом для сигналов сброса ПЛИС (DRR) и АЦП (ASYNC) фильтрация не требуется.

Кроме фазового шума существуют и другие источники фазовых искажений в оптоволокне: температура, вибрация и акустика, хроматическая дисперсия, поляризационно-модовая дисперсия и переходные

помехи [10]. На основе материалов, представленных в [10], был проведен расчет вносимой фазовой ошибки. Результаты расчета представлены в таблице.

В таблице использованы следующие обозначения: n – эффективный групповой показатель преломления кварцевого волокна, для стандартно используемого одномодового волокна SMF-28 типовое значение $n = 1.4686$; L – длина волокна, для данной системы

⁶ <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf>, дата обращения 01.06.2022. [https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1463-AEN.pdf. Accessed 01.06.2022.]

Таблица. Результаты расчета вносимой фазовой ошибки

№ п/п	Эффект	Расчетная формула	Расчетное значение
1	Температура	$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{\omega_r L}{c} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right)$	Рис. 5
2	Вибрации и акустика	$\frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{\omega_r L}{c} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{d\sigma} + \frac{dn}{d\sigma} \right)$	Рис. 6
3	Хроматическая дисперсия	$\Delta\varphi = \omega_r D L \Delta\lambda$	$1.1 \cdot 10^{-4}$ град
4	Поляризационная модовая дисперсия	$\Delta\varphi = \omega_r D_{\text{pmd}} L^{1/2}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$ град
5	Переходные помехи	$\Delta\varphi = \arctg(10^{A_c/20})$	1.8 град

составляет 20 м; c – скорость света; ω_r – угловая частота синхросигнала S-диапазона; T – температура, °C; $(1/L)dL/dT$ – коэффициент термического расширения, типовое значение $5.6 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $1/^\circ\text{C}$; dn/dT – температурный коэффициент показателя преломления, типовое значение $1.2 \cdot 10^{-5}$, $1/^\circ\text{C}$; $[(1/L)dL/d\sigma]^{-1}$ и $dn/d\sigma$ – модули Юнга, соответственно, по длине и показателю преломления волокна, типовые значения: $7.2 \cdot 10^{10}$ Па и $-3.4 \cdot 10^{-12}/\text{Па}$, $1/\text{Па}$; D – коэффициент хроматической дисперсии, типовое значение 18 пс/(нм·км); $\Delta\lambda$ – разность длин волн между оптической несущей и составляющими боковых полос первого порядка в спектре распространяющегося по волокну модулированного по интенсивности оптического сигнала, для С-оптического диапазона (1551–1563 нм) определяется по частоте тактового радиосигнала в гигагерцах из пропорции $10 \text{ ГГц} \approx 80 \text{ пм}$; D_{pmd} – коэффициент поляризационной модовой дисперсии, типовое значение $0.1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$; A_c – относительный уровень переходной помехи, которая проявляется при мультиплексировании, как правило, ее значение составляет –30 дБ.

Таким образом, предложенный вариант построения системы фазовой синхронизации способен распределить по всем АЦП единый тактовый сигнал от одного источника на расстояние до десятка метров и передать на устройства обработки сигналы сброса и синхронизации. При этом значение теоретической фазовой ошибки обрабатываемых сигналов составит не более 1.8 град, основную часть которой вносит блок мультиплексирования сигналов.

МОДУЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА ЦАР

Предложенные решения для построения системы синхронизации и интегрального тракта при использовании направленных излучателей с оптимальным шагом уже являются как самостоятельными устройствами, так и ячейкой ЦАР. Интеграцию БЦМ и СУРС в ЦАР возможно произвести по внешним интерфейсам БЦМ с использованием решений в области бортовых электронно-вычислительных

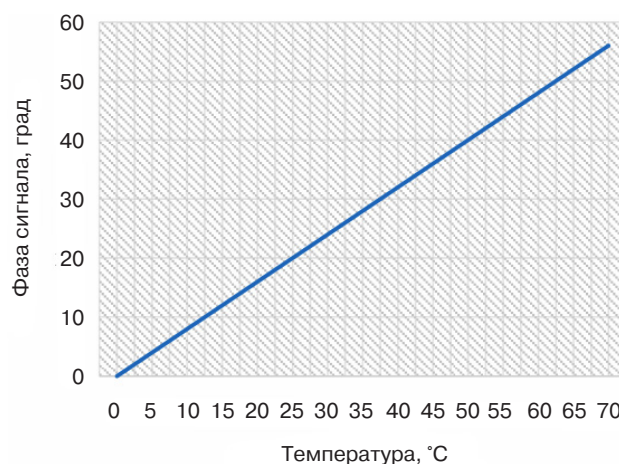


Рис. 5. Зависимость изменения фазы сигнала от температуры

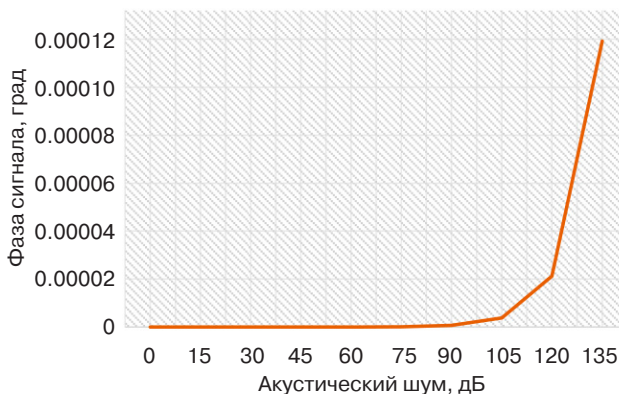


Рис. 6. Зависимость изменения фазы сигнала от уровня акустического шума

машин и центров обработки данных. Основным ограничением при наращивании полотна ЦАР является пропускная способность интерфейсов КИО. Дополнительно для построения диаграммы направленности и обеспечения электронного сканирования ЦАР требуется максимальная точность синхронизации АЦП и ЦАП. Структурная схема ЦАР на основе модульной архитектуры представлена на рис. 7, где ТАКТ1–ТАКТ n синхросигналы и сигналы сброса АЦП и ПЛИС, формируемые РФС.

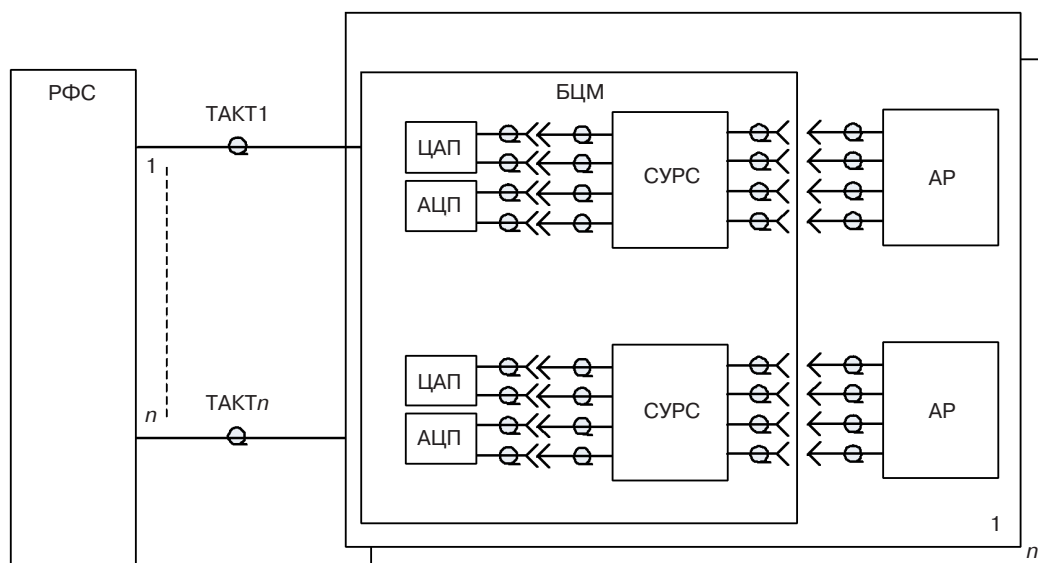


Рис. 7. Структурная схема ЦАР

Необходимые значения распределения фаз между каналами рассчитываются в зависимости от конструкции антенной решетки (АР), определяющей диаграмму направленности, угла обзора и необходимого числа положений луча. Для построения диаграммы направленности такой системы рассмотрена восьми-элементная антенная линейка на основе излучателей Вивальди, общий вид которой приведен на рис. 8.

Широкополосные излучатели на основе симметричных щелевых линий (излучатель Вивальди) хорошо известны, их разновидности широко представлены в [11, 12], методы ЦДФ описаны в [13–15], а варианты формирования луча, методы сканирования в АФАР и расчеты фазового распределения для такой решетки приведены в [12, 13].

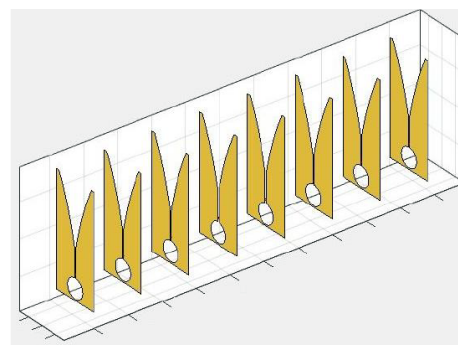


Рис. 8. Общий вид антенной линейки

Расчетная диаграмма направленности и отклонение луча восьмиэлементной АР представлены на рис. 9.

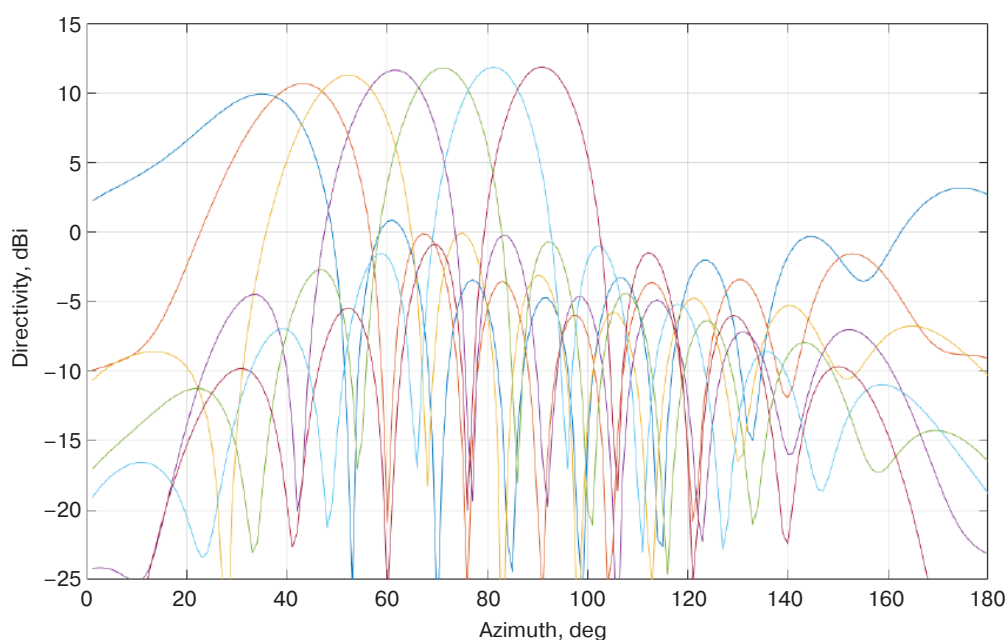
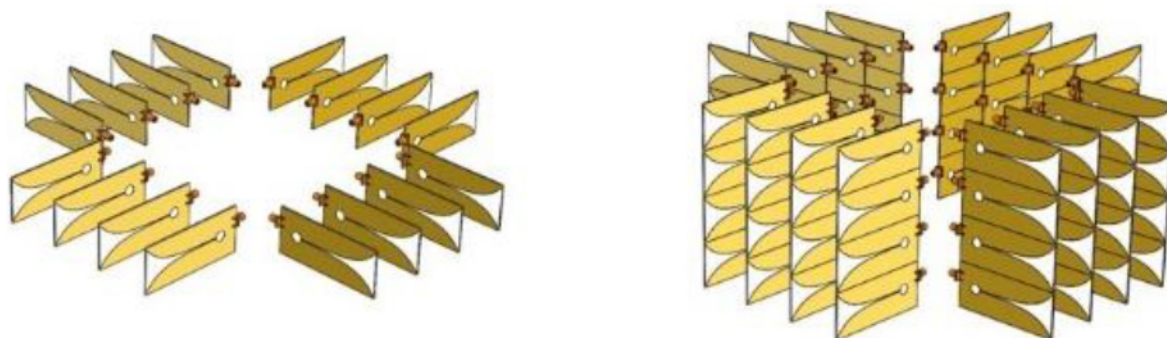


Рис. 9. Результаты расчета диаграмм направленности АР

**Рис. 10.** Антенные системы ЦАР

На рис. 10 представлены антенные системы, построенные по принципу комплексирования и масштабирования ЦАР на основе модульной архитектуры, обеспечивающие прием и передачу сигналов в диапазоне углов 360° в азимутальной и в угломестной плоскости. Каждый модуль имеет в своей основе излучатель типа Вивальди с экспоненциальным раскрытием, одним из достоинств которого является широкополосность [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные схемно-конструктивные решения позволят существенно сократить сроки разработки новых типов систем за счет линейки готовых

технических решений. Разработанные устройства обладают параметрами, не уступающими лучшим мировым аналогам, а в рамках интеграции в систему позволяют превзойти существующие решения. Апробирование разработок проведено в рамках НИОКР на базе АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» и ООО «ТАР», предложенные решения интегрированы на уровне подсистем в перспективных разработках продукции гражданского и специального назначения.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du J.F., Fan X.J., Cao X.H., Li M., Zhu N.H., Li W. Transmission of dual-chirp microwave signal over fiber with suppression chromatic-dispersion-induced power-fading based on stimulated Brillouin scattering. *Opt. Commun.* 2022;508:127787. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127787>
2. Mo Zh., Li R., Yang J., Dong J., Cao J., Li W. A photonics radar with remoting antenna based on photonic assisted signal generation and stretch processing. In: *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2019. Accession Number: 18993737. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835512>
3. Kashin V.A., Shurygina I.S. Synthesis of multibeam directivity patterns to improve performance of radar stations with an active phased antenna array. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(10):1155–1162. <https://doi.org/10.1134/S1064226921100089>
4. Быстров Р.П., Соколов С.А., Черепенин В.А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации. *Журнал радиоэлектроники*. 2017;6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>

REFERENCES

1. Du J.F., Fan X.J., Cao X.H., Li M., Zhu N.H., Li W. Transmission of dual-chirp microwave signal over fiber with suppression chromatic-dispersion-induced power-fading based on stimulated Brillouin scattering. *Opt. Commun.* 2022;508:127787. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127787>
2. Mo Zh., Li R., Yang J., Dong J., Cao J., Li W. A photonics radar with remoting antenna based on photonic assisted signal generation and stretch processing. In: *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2019. Accession Number: 18993737. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835512>
3. Kashin V.A., Shurygina I.S. Synthesis of multibeam directivity patterns to improve performance of radar stations with an active phased antenna array. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(10):1155–1162. <https://doi.org/10.1134/S1064226921100089>
4. Bystrov R.P., Sokolov S.A., Cherepenin V.A. On the possibility of radio photonics technique in radar applications. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2017;6 (in Russ.). Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>

5. Голов Н.А., Усачев В.А., Боев С.Ф., Савченко В.П., Шулунов А.Н., Зубарев Ю.Б. Эволюция радиофотоники и перспективы ее применения в радиолокации. *РТИ Системы ВКО – 2017: Труды V Всерос. научно-техн. конф.* 2018. С. 292–320.
6. Lee J.J., et al. Photonic wideband array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995;43(9):966–982. <https://doi.org/10.1109/8.410214>
7. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wideband microwave photonic phase and frequency shifter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997;45(6):1003–1006. <https://doi.org/10.1109/22.588620>
8. Yao J. Microwave photonics. *J. Lightwave Technology*. 2009;27(3):314–335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009551>
9. Унченко И.В. Модульная многопозиционная цифровая радиопотонная система. В сб.: *Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2020: Сборник аннотаций конкурсных работ. 12-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий.* 2020. 123 с.
10. Емельянов А.А. Белкин М.Е., Топорков Н.В., Масной В.А. Особенности построения бортовой волоконно-оптической синхросети. *Радиотехника*. 2017;8:121–126.
11. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Овчинникова Е.В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ). *Антенны*. 2005;11: 7–21.
12. Wang F., Wang P., Zhang X., Li H., Himed B. An overview of parametric modeling and methods for radar target detection with limited data. In: *IEEE Access*. 2021;9:60459–60469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074063>
13. Григорьев Л.Н. *Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках*. М.: Радиотехника; 2010. 144 с. ISBN 978-5-88070-243-5
14. Maltsev S.B., Shcherbakov M.V., Voitovych O.N., et al. Investigation and tuning procedure of Ka-band phased antenna array. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2021;64(9):501–508. <https://doi.org/10.3103/S0735272721090053>
15. Легкий Н.М., Унченко И.В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. *Российский технологический журнал*. 2019;7(2): 29–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
16. Gross F.B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies; 2011. 526 p.
17. Унченко И.В. Диаграммообразование активных фазированных антенных решеток. *Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта*. 2018;14:331–337.
5. Golov N.A., Usachev V.A., Boev S.F., Savchenko V.P., Shulunov A.N., Zubarev Yu.B. Evolution of radiophotonics and prospects for its application in radar. In: *RTI Systems VKO 2017: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical. Conf.* 2018. P. 292–320 (in Russ.).
6. Lee J.J., et al. Photonic wideband array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995;43(9):966–982. <https://doi.org/10.1109/8.410214>
7. Winnall S.T., Lindsay A.C., Knight G.A. A wideband microwave photonic phase and frequency shifter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997;45(6):1003–1006. <https://doi.org/10.1109/22.588620>
8. Yao J. Microwave photonics. *J. Lightwave Technology*. 2009;27(3):314–335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009551>
9. Unchenko I.V. Modular multi position digital radio frequency photonics system. In: *Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics 2020: Collection of abstracts of competitive works. The 12th All-Russian Intersectoral Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects in the Field of Aviation and Rocket and Space Technologies*. 2020. P. 123 (in Russ.).
10. Emel'yanov A.A. Belkin M.E., Toporkov N.V., Masnoi V.A. The features of designing onboard fiber-optic synchronetwork. *Radiotekhnika = J. Radioengineering*. 2017;8:121–126 (in Russ.).
11. Voskresenskii D.I., Kotov Yu.V., Ovchinnikova E.V. Trends in the development of broadband phased antenna arrays (review). *Antenny = J. Antennas*. 2005;11(102): 7–21 (in Russ.).
12. Wang F., Wang P., Zhang X., Li H., Himed B. An overview of parametric modeling and methods for radar target detection with limited data. In: *IEEE Access*. 2021;9:60459–60469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074063>
13. Grigor'ev L.N. *Tsifrovoye formirovaniye diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennoykh reshetkakh (Digital Beam Forming in Phased Antenna Arrays)*. Moscow: Radiotekhnika; 2010. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-243-5
14. Maltsev S.B., Shcherbakov M.V., Voitovych O.N., et al. Investigation and tuning procedure of Ka-band phased antenna array. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2021;64(9):501–508. <https://doi.org/10.3103/S0735272721090053>
15. Legkiy N.M., Unchenko I.V. Formation of the direction diagram in phased antenna arrays. *Russian Technological Journal*. 2019;7(2):29–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
16. Gross F.B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies; 2011. 526 p.
17. Unchenko I.V. Diagram formation of active phased antenna arrays. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta*. 2018;14:331–337 (in Russ.).

Об авторах

Унченко Иван Владимирович, старший преподаватель кафедры инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики, начальник отдела по разработке аппаратных средств Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра «Наука» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, г. Жуков, ул. Ленина, д. 2); генеральный директор ООО «Технологии аппаратных решений» (249096, Калужская область, г. Малоярославец, ул. Герцена, д. 60А). E-mail: unchenkoivan@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

Емельянов Андрей Александрович, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра «Наука» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); инженер АО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (249192, Калужская область, г. Жуков, ул. Ленина, д. 2); заместитель генерального директора, научный сотрудник ООО «Технологии аппаратных решений» (249096, Калужская область, г. Малоярославец, ул. Герцена, д. 60А). E-mail: nd1794@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 7890-4740, <https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>

About the authors

Ivan V. Unchenko, Senior Lecturer, Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, Head of the Hardware Development Department of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center “Science,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Engineer, Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology (2, Lenina ul., Zhukov, Kaluga oblast, 249192 Russia); General Director, Hardware Solutions Technologies (60A, Herzena ul., Maloyaroslavets, Kaluga oblast, 249096 Russia). E-mail: unchenkoivan@gmail.com. RSCI SPIN-code 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

Andrey A. Emelyanov, Senior Researcher, Research Laboratory of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center “Science,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Engineer, Kaluga Scientific Research Institute of Radio Technology (2, Lenina ul., Zhukov, Kaluga oblast, 249192 Russia); Deputy General Director, Researcher, Hardware Solutions Technologies (60A, Herzena ul., Maloyaroslavets, Kaluga oblast, 249096 Russia). E-mail: nd1794@yandex.ru. RSCI SPIN-code 7890-4740, <https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>