

# Волоконно-оптическая система для передачи гетеродинных сигналов в активных фазированных антенных решетках радиолокационных станций

А.В. Мороз<sup>1</sup>, В.В. Давыдов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Высшая школа прикладной физики и космических технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы, возникающие при модернизации активных фазированных антенных решеток (например, увеличение количества приемопередающих активных элементов, уменьшение массогабаритных размеров антенной системы и т. д.). Обосновано, что наиболее рациональное решение этих проблем – это использование для передачи гетеродинных сигналов волоконно-оптических систем связи. Разработана новая конструкция приемопередающего модуля с волоконно-оптической системой передачи для активной фазированной антенной решетки. Представлены результаты экспериментальных исследований.

## 1. Введение

В большинстве случаев эксплуатация радиолокационных станций (РЛС) производится в условиях высокой плотности помех различного рода. Поэтому, каналы связи и управления в РЛС защищены различными экранами (пассивными и активными) [1-6]. Степень защиты каналов связи и управления обеспечена в зависимости от функциональных задач, которые должны решаться с использованием сигналов, которые по ним передаются. Но это все равно, несущественно снижает вес и габариты коаксиальных кабелей [1, 2, 5-9].

Наибольшие сложности в РЛС возникают при передаче отраженных от различных целей сигналов от антенны до устройств обработки [1, 3, 5, 7, 10-12]. Для решения этой задачи, а также более удобной обработки принятых антенной отраженных от различных целей СВЧ сигналов в РЛС применяют супергетеродинные радиоприемники. Данный вид радиоприёмников, основан на принципе преобразования принимаемого сигнала в фиксированный сигнал промежуточной частоты с последующим её усилением. Основным преимуществом супергетеродинного приемника является отсутствие необходимости перестройки под разные частоты. К гетеродинам предъявляют высокие требования по стабильности частоты и амплитуды, а также спектральной чистоте гармонических колебаний. В канале передачи данных должны параметры гетеродинного сигнала в различных условиях эксплуатации РЛС (перепады температур, присутствие помех различного рода и т.д.) изменяться не должны [1, 3, 5, 10, 11, 13].

Особенно много проблем с сохранением параметров гетеродинного сигнала возникает при размещении РЛС или приемно-передающей станции на летательном аппарате (например,

спутники, самолеты, вертолеты и т.д.) [2, 3, 8, 14, 16]. В этом случае, кроме внешних помех, существенную роль начинают играть помехи, связанные с наводками от соседних каналов и т.д. Эти задачи решаются в зависимости от конструкции антенных систем. Наиболее сложными являются технические решения в активных антенных фазированных решетках (АФАР) для РЛС, работающих в S и X диапазонах. В АФАР очень высокая плотность размещения электронных элементов и фидерных трактов. Наиболее чувствительными к помехам в АФАР являются фидерные тракты супергетеродинных приемников. Для уменьшения влияния наведенных помех на фидерные тракты супергетеродинных приемников их «уязвимые» места в АФАР покрывают поглощающими материалами. Опыт эксплуатации АФАР показывает, что это временное решение проблемы. Поглощающие покрытия по различным причинам выходят из строя, теряют свою целостность при проведении ремонтных работ и т.д.

Поэтому для каждого приемно-передающего элемента АФАР используется свой гетеродин. Это частично позволяет уменьшить наводки фидерных трактов друг на друга в условиях высокой плотности расположения каналов. Такое построение каналов передачи гетеродинных сигналов привело к тому, что в действующих конструкциях АФАР свободного места для размещения новых узлов нет.

В настоящее время в связи с использованием при изготовлении различных объектов, которые должны быть обнаружены с помощью РЛС, новых поглощающих покрытий, требуется модернизация находящихся в эксплуатации АФАР. Одним из важнейших направлений этой модернизации является разработка АФАР с числом приемно – передающих элементов более 1000 при сохранении массогабаритных характеристик антенны. Если размеры приемно-передающих элементов можно уменьшить, сохранив их характеристики, используя новые материалы при их изготовлении, то с размещением дополнительных фидерных трактов, особенно супергетеродинных приемников в АФАРе, возникают большие сложности.

Один из вариантов решения данной проблемы рассматривается в нашей статье. Мы предлагаем заменить в АФАР фидерные тракты, передающие СВЧ сигналы, на волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) [10-12, 17-22]. Оптическое волокно не подвержено влиянию высокочастотных помех и имеет хорошие шумовые характеристики при передаче сигналов ВЧ диапазона, обладает высокой гибкостью и малой массой [20-22].

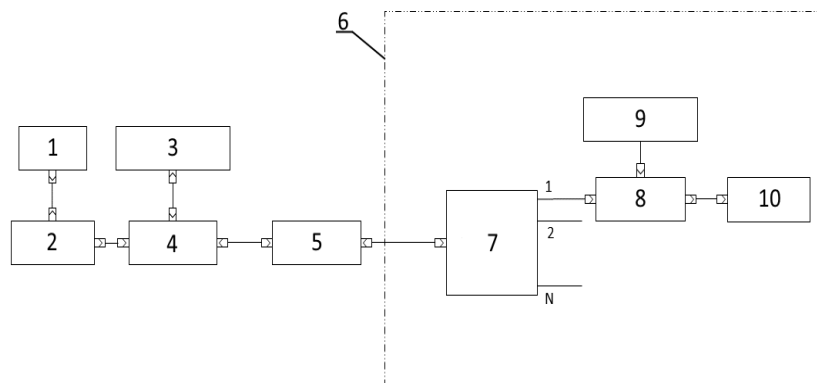
## **2. Особенности передачи гетеродинных сигналов по волоконно-оптической системе и её конструкция**

В случае передачи гетеродинных сигналов по ВОСП в радиолокационной станции с АФАР необходимо при её проектировании учесть ряд особенностей и рассчитать следующие параметры: фазовый шум, отношения сигнал/шум, временную стабильность передающего тракта и температурную стабильность.

Так как значения частот гетеродинных сигналов малы (не более 100 МГц) по сравнению с частотой излучения РЛС (более 8 ГГц), то можно пренебречь нелинейными эффектами в оптическом волокне и дисперсионными потерями. Это является одной из особенностей передачи этих сигналов в АФАР.

Кроме того, еще одной отличительной особенностью передачи гетеродинных сигналов является малая длина оптического волокна  $L$  (не более 15 м). Это обстоятельство также позволяет пренебречь отмеченными ранее нелинейными эффектами. Необходимо отметить, что на таких расстояниях  $L$  требования к оптическому передающему модулю и фотоприемнику по входной мощности, потерям на преобразование, быстродействию, коэффициенту преобразования при передаче данных сигналов на частотах менее 100 МГц невысокие, по сравнению с тем, когда по ВОСП передаются СВЧ сигналы с частотами 40 ГГц [4, 7, 8, 11, 12]. Использование ВОПС позволило нам разработать новую схему передачи гетеродинных сигналов к приемно-задающим модулям, каждый из которых подключен к приемно-передающему элементу АФАР. На рис. 1 представлена разработанная нами структурная схема.

Предложенная конструкция ВОПС позволяет сформировать сигнал с помощью одного гетеродина, далее преобразовать его оптический модулированный сигнал, который можно с помощью оптического делителя разделить на заданное число приемно-задающих модулей. Единственным условием данной реализации передачи является выбор оптических передающих (с заданным уровнем выходной мощности) и приемных (минимальная входная оптическая мощность) модулей, так чтобы при большом числе каналов  $N$  (оптический делитель  $1/N$ ) информация была утеряна.



**Рисунок 1.** Структурная схема волоконно-оптической системы передачи: 1- блок питания гетеродина; 2- гетеродин; 3 – драйвер питания; 4 - передающий лазерный модуль; 5 – оптический изолятор; 6 – корпус блока АФАР; 7 – оптический делитель; 8- приемный оптический модуль; 9 – драйвер питания; 10 – приемно-передающий модуль АФАР.

При таком построении ВОПС с оптическим делителем важной характеристикой становится собственный коэффициент шума канала линии  $K_n$ . Так как он при передаче гетеродинных сигналов также ограничивает число каналов, на которые можно делить оптический сигнал. Проведенные измерения показали, что  $K_n$  в канале разработанной ВОСП составляет менее 4 дБм. Собственный шум фидерного тракта для передачи гетеродинного сигнала в АФАР не ниже 6 дБм. Это показывает, что новая конструкция не только существенно увеличивает свободное пространство в блоке АФАР, но и улучшает характеристику канала передачи более чем на 30 %.

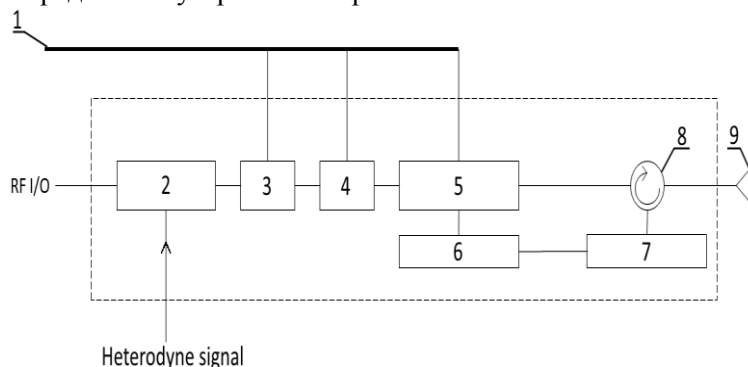
Кроме того, нами было установлено, что в разработанной новой конструкции ВОСП зависимость мощности сигнала на выходе системы от мощности сигнала на его входе является линейной от уровня  $-128$  дБм до уровня  $-22$  дБм. Это позволяет сделать вывод, что динамический диапазон (ДД) разработанной ВОСП с оптическим делителем превышает 105 дБм. Данного значения ДД достаточно для передачи гетеродинных сигналов по ВОПС. Стандартный ДД фидерных трактов составляет не более 110 дБм. Одна из основных характеристик гетеродинного канала связи в АФАР не ухудшилась.

Необходимо отметить, что каналы приемно-передающих модулей, куда поступает гетеродинный сигнал имеют оптическую развязку. Это исключает возможные наводки друг на друга, а также не требует дополнительных экранировок, как в фидерных трактах. Последнее также освобождает место для внесения дополнительных элементов в конструкцию АФАР.

Использование разработанной ВОСП в конструкции АФАР накладывает ряд особенностей на построение схемы приемно-передающего модуля (ППМ). На рис 2 представлена структурная схема разработанного нами приемно-передающего модуля.

Основная особенность новой схемы заключается в том, что в разработанном нами ППМ фазовращатель и аттенуатор находятся в одном приемно-передающем канале, когда в других конструкциях они разнесены по отдельным каналам. Второй особенностью является использование в ППМ смесителя. Это позволяет совместить канал приема и передачи в одном тракте, что существенно экономит место в конструкции АФАР и уменьшает её стоимость. На

вход смесителя с выхода ВОПС поступает гетеродинный сигнал. На смеситель в ППМ также поступает сигнал с приемной антенны отраженный от цели. Это позволяет на смесителе сформировать сигнал промежуточной частоты, в котором заложена информация о движении цели. Этот сигнал передается в устройства обработки РЛС.

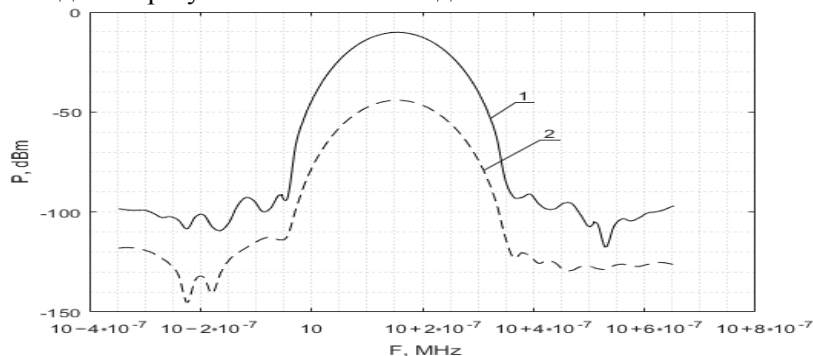


**Рисунок 2.** Структурная схема приемно-передающего модуля: 1- шина управления; 2 – смеситель; 3 – фазовращатель; 4 – аттенуатор; 5 – переключатель; 6 – малошумящий усилитель; 7 – устройство защиты приемника; 8 – циркулятор; 9 – приемно-передающий элемент АФАР.

Это позволяет на смесителе сформировать сигнал промежуточной частоты, в котором заложена информация о движении цели. Этот сигнал передается в устройства обработки РЛС.

### 3. Результаты экспериментальных исследований волоконно-оптической системы передачи и их обсуждение.

Наиболее важной характеристикой, которую необходимо исследовать, при передаче гетеродинного сигнала по ВОПС является зависимость мощности от частоты. Определить наличие искажений в спектре сигнала на выходе ВОПС [4, 11, 17, 18, 21]. На разработанном нами лабораторном макете ВОСП были исследованы возможные искажения в спектре при передаче гетеродинного сигнала по ВОС на рабочей частоте 10 МГц. На рисунке 3 в качестве примера представлен один из результатов этих исследований.

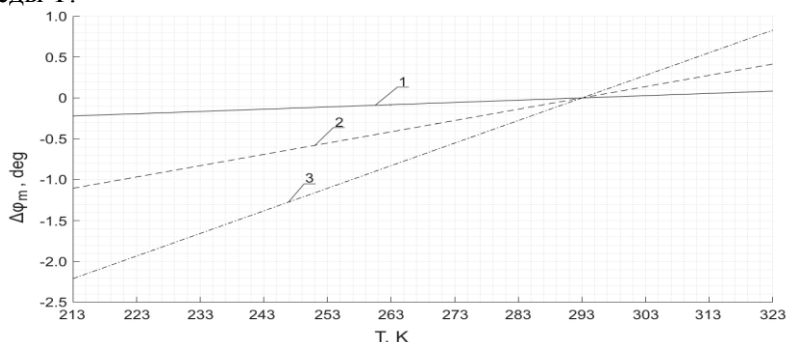


**Рисунок 3.** Спектры гетеродинного сигнала на входе (график 1) и выходе (график 2) ВОСП.

Сравнение полученных спектров (рисунок 3) показывает высокую эффективность передачи гетеродинного сигнала на несущей частоте 10 МГц по ВОСП. Искажения в спектре присутствуют только на боковых составляющих, что не влияет на точность определения расстояния до цели в РЛС.

Так как разработанная ВОСП предназначена для АФАР, которые размещаются на летательных аппаратах, то она будет эксплуатироваться в различных температурных условиях. Изменение температуры окружающей среды вызывает как изменение коэффициента преломления волокна,

так и дополнительное удлинение волокна вследствие теплового расширения или сжатия. Это приводит к изменению фазы света и, соответственно, к изменению фазы модуляции прошедшего через волокно излучения. Поэтому была проведена экспериментальная оценка температурного ухода фазы модуляции при распространении в волокне. На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость сдвига фазы модуляции света  $\Delta\varphi_m$  от температуры окружающей среды  $T$ .



**Рисунок 4.** Сдвиг фазы модуляции от температуры среды. Графикам 1, 2 и 3 соответствует частота гетеродинного сигнала в МГц: 10; 50; 100.

Результаты исследований показали, что температурная зависимость изменения фазы модуляции для волокна G.657 составляет не более 2 градусов в выбранном температурном интервале от  $-60$  до  $+50$  °С для различных частот гетеродинного сигнала.

#### 4. Заключение

Полученные результаты показали, что разработанная нами конструкция ВОСП может успешно эксплуатироваться в составе РЛС с АФАР. Установлено, что реализованные на основе проведенных исследований конструкторские решения при изготовлении ВОСП, обоснованы.

Использование в АФАР разработанной нами конструкции ВОСП дало возможность реализовать новое построение ППМ. Это позволило более компактно разместить в АФАР большое число ППМ по сравнению со случаем, когда использовались фидерные тракты. Кроме того, количество используемых гетеродинов в новой конструкции АФАР сократилось на порядок по сравнению со случаем использования фидерных трактов.

Так как оптические делители и волокно не нуждаются в защите от электромагнитного излучения, то часть канала передачи гетеродинного сигнала с этими элементами можно разместить за корпусом АФАР с тыловой её части (длина волокна в 5 м это позволяет сделать). В этом случае освобождается дополнительное место в корпусе АФАР.

Предложенные нами технические решения на основе проведенных исследований позволили увеличить число приемно-передающих элементов в АФАР до 1024 и обеспечить надежную работу антенного комплекса при сохранении его массо-габаритных характеристик в заданных пределах.

Необходимо также отметить, что при увеличении числа каналов в оптическом делителе  $K_n$  в каждом канале возрастает. Это факт вместе с уменьшением мощности оптического сигнала в каждом канале является ограничением на увеличение  $N$  в оптическом делителе при разработке ВОСП. В результате исследований было установлено, что наиболее оптимальным в настоящее время является в АФАР является использование оптического делителя на 10 каналов. Это позволяет использовать в новой конструкции АФАР всего 103 гетеродина. Ранее в конструкции АФАР с 256 приемно-передающими элементами использовалось 256 гетеродинов.

#### 5. Литература

- [1] Podstrigaev, A.S. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the

- Frequency Range / A.S. Podstrigaev, A.V. Smolyakov, V.V. Davydov, N.S. Myazin, M.G. Slobodyan // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 509-515.
- [2] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [3] Фокин, Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 2009.
- [4] Lenets, V.A. New method for testing of antenna phased array in X frequency range / V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, V.V. Davydov, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012037.
- [5] Lavrov, A. P. A method for measurement of the pulse arrival time of the radio emission of pulsars in a wideband optoelectronic processor / A.P. Lavrov, S.A. Molodyakov // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 59(10). – P. 1025-1033.
- [6] Ermolaev, A.N. Compensation of chromatic and polarization mode dispersion in fiber-optic communication lines in microwave signals transmission / A.N. Ermolaev, G.P. Krishpents, V.V. Davydov, M.G. Vysoczkiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741(1). – P. 012171.
- [7] Davydov, R.V. Fiber-optic transmission system for the testing of active phased antenna arrays in electronic chamber / R.V. Davydov, I.V. Saveliev, V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, T.R. Yalunina, V.V. Davydov, V.Yu. Rud' // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – 10531 LNCS. – P. 177-183.
- [8] Podstrigaev, A.S. Feature of transmission of intermediate frequency signals over fiber-optical communication system in radar station / A.S. Podstrigaev, R.V. Davydov, V.Yu. Rud', V.V. Davydov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 624-630.
- [9] Белкин, М.Е. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника / М.Е. Белкин, А.С. Сигов // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 8. – С. 901-914.
- [10] Векшин, Ю.В. Методика и результаты исследований амплитудной и фазовой стабильности супергетеродинного радиоастрономического приемника / Ю.В. Векшин, А.П. Лавров, Ю.В. Хвостов // Радиотехника. – 2018. – № 1. – С. 24-30.
- [11] Шишков, А.Н. Экспериментальное исследование характеристик волоконно-оптической линии для передачи аналоговых СВЧ сигналов / А.Н. Шишков, А.А. Галичина, С.И. Иванов, А.П. Лавров, И.И. Саенко // Фотон-экспресс. – 2017. – № 6(142). – С. 11.
- [12] Tarasenko, M.Yu. Feature of use direct and external modulation in fiber optical simulators of a false target for testing radar station / M.Yu. Tarasenko, V.V. Davydov, N.V. Sharova, V.A. Lenets, T.R. Yalunina // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – 10531 LNCS. – P. 227-232.
- [13] Ryazantsev, L.B. Assessment of Range and Radial Velocity of Objects of a Broadband Radar Station Under Conditions of Range Cell Migration / L.B. Ryazantsev, V.P. Lukashev // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 60(11). – P. 1158-1162.
- [14] Petrov, A.A. Rubidium atomic clock with improved metrological characteristics for satellite communication system / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.S. Myazin // Lecture Notes in Computer

- Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – 10531 LNCS. – P. 561-568.
- [15] Petrov, A.A. Some direction of quantum frequency standard modernization for telecommunication systems / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 641-648.
- [16] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012032.
- [17] Ivanov, S.I. Model of photonic beamformer for microwave phase array antenna / S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, I.I. Saenko // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – 10531 LNCS. – P. 482-489.
- [18] Ivanov, S.I. Application of microwave photonics components for ultrawideband antenna array beamforming / S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, I.I. Saenko // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – 9870 LNCS. – P. 670-679.
- [19] Myazin, N.S. / Spectral characteristic of InP photocathode with a surface grid electrode // N.S. Myazin, K.J. Smirnov, V.V. Davydov, S.E. Logunov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 929(1). – P. 012080.
- [20] Friman, R.L. Fiber–Optic Systems for Communications / R.L. Friman. – New York: Wiley-Interscience a John Wiley & Sons. Inc., 2012. – 574 p.
- [21] Silver, M. Optical Fiber Communication Systems / M. Silver. – New York: Clanrye International, 2015. – 442 p.
- [22] Reinhold, N. Essentials of Modern Optical Fiber // Communication Amsterdam: Springer, 2016. – 346 p.

# Fiber-optic communication system for transmitting heterodyne signals in active phased antenna arrays of radar stations

A. Moroz<sup>1</sup>, V. Davydov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Applied Physics and Space Technology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, St. Petersburg, Russia, 195251

**Abstract.** The paper deals with the problems arising from the modernization of active phased antenna arrays (for example, an increase in the number of transceiver active elements, a decrease in the weight and size of the antenna system, etc.). It is proved that the most rational solution of these problems is the use of fiber-optical communication systems for transmitting heterodyne signals. A new design of the transmit-receive module with a fiber-optic transmission system for an active phased antenna array has been developed. The results of experimental studies are presented.