

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.11>

УДК: 621.391.64

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА СВЧ-ГЕТЕРОДИНА ДЛЯ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук

Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
220072, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 68-1

Статья поступила в редакцию 23 февраля 2023 г.

Аннотация. В статье исследуются различные архитектуры волоконно-оптических систем распределения СВЧ-сигналов для активных фазированных антенных решеток. Представлена волоконно-оптическая система с полностью оптическим усилением для распределения сигналов СВЧ-гетеродина. Реализован и исследован фрагмент предлагаемой системы. Экспериментально показано, что разработанная система распределения обеспечивает отношение шум-сигнал -150 дБн/Гц, выходную мощность канала около 1 мВт и дрейф фазы между каналами менее 1° .

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия передачи, волоконно-оптическая система распределения, оптическое усиление, активные фазированные антенные решетки (АФАР), радиопотоника.

Автор для переписки: Чиж Александр Леонидович, chizh@oelt.basnet.by

Введение

Большой проблемой при проектировании и создании активных фазированных антенных решеток (АФАР) является сложность разводки сигналов по приемопередающим модулям. Если управляющие сигналы достаточно удобно разводить с помощью цифровых линий связи (как на основе

витой пары, так и волоконно-оптических), то разводка сигнала СВЧ-гетеродина или синхросигнала СВЧ-диапазона представляет достаточно серьезную задачу, сложность которой возрастает при увеличении частоты передаваемых СВЧ-сигналов [1,2]. Основными требованиями к распределительной системе АФАР являются: низкое значение отношения шум-сигнал и фазового шума на выходе системы, а также низкое значение относительной флуктуации фазы сигнала гетеродина между каналами. Последнее особенно важно, так как любые флуктуации фазы сигнала гетеродина между каналами, которые остались после калибровки, приводят к увеличению уровня боковых лепестков АФАР [3].

Аналоговые волоконно-оптические линии являются альтернативой коаксиальным кабелям при передаче СВЧ-сигналов на расстояние более нескольких десятков метров [4-6]. С повышением сложности бортовых радиоэлектронных систем, где вес и габаритные размеры являются чрезвычайно важными параметрами, аналоговые волоконно-оптические линии передачи СВЧ-сигналов благодаря малой массе и высокой устойчивости к электромагнитным помехам становятся ещё более привлекательными [7-10]. Следует отметить, что замена коаксиальных кабелей волоконно-оптической линией позволяет осуществлять передачу сверхширокополосных СВЧ-сигналов на расстояние свыше 1 км, многоканальную передачу СВЧ-сигналов с использованием мультиплексирования по длине волны, а также оптическую обработку СВЧ-сигналов. Важным достоинством аналоговых волоконно-оптических линий является низкий уровень фазового шума при передаче СВЧ-сигналов, связанный с невосприимчивостью процесса прямого детектирования оптического сигнала к фазе оптической несущей. Использование волоконно-оптической системы распределения СВЧ-сигналов в активных антенных решетках позволит значительно повысить их устойчивость к электромагнитным помехам. Главным преимуществом волоконно-оптической системы распределения является высокая временная стабильность фазового распределения по полотну антенной решетки [7,8].

На основе волоконно-оптических лазерных и фотодиодных модулей с использованием пассивных волоконно-оптических компонентов могут быть построены системы распределения СВЧ-сигналов [9,10]. Наиболее простая схема сверхширокополосной волоконно-оптической системы распределения СВЧ-сигнала гетеродина на N каналов для активных фазированных антенных решеток показана на рис. 1. Волоконно-оптическая система состоит из электрооптического преобразователя, оптического разветвителя $1 \times N$ и N оптоэлектронных преобразователей, соединенных между собой одномодовыми волоконно-оптическими кабелями. Электрооптический преобразователь обычно представлен волоконно-оптическим лазерным модулем с прямой модуляцией интенсивности током накачки или с внешней модуляцией интенсивности с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера. В качестве оптоэлектронного преобразователя обычно используется СВЧ-фотодиод. Однако эта простейшая архитектура распределительной системы имеет большой недостаток, связанный с числом каналов N , ограниченным из-за квадратичного закона фотодетектирования между выходной СВЧ-мощностью P_{mw} и входной оптической мощностью P_{opt} . В данной работе для преодоления ограничения по числу каналов N рассматривается двухкаскадная волоконно-оптическая система распределения с оптическим усилением.

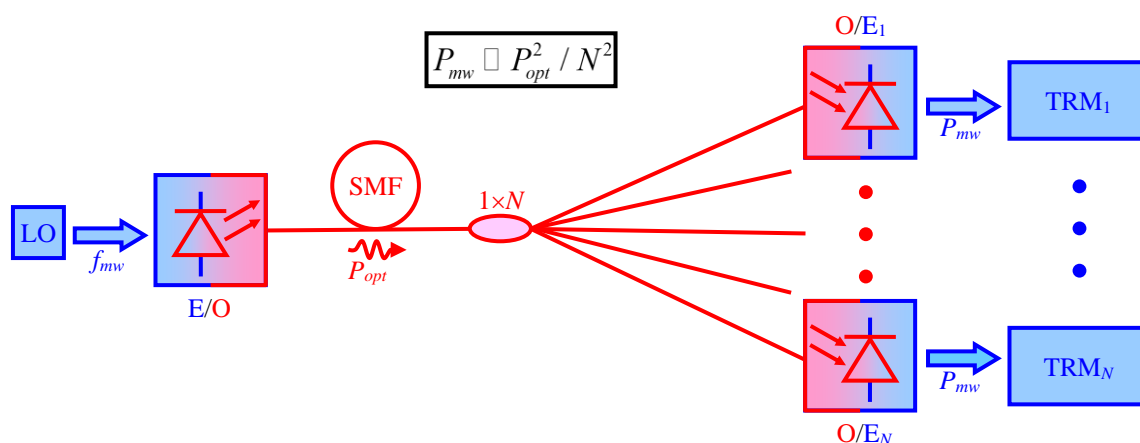


Рис. 1. Схема волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с частотой f_{mw} : LO – СВЧ-гетеродин, E/O – электрооптический преобразователь, SMF – одномодовое оптическое волокно, $1 \times N$ – волоконно-оптический разветвитель на N каналов, O/E₁, ..., O/E_N – оптоэлектронные преобразователи, TRM₁, ..., TRM_N – приемопередающие модули АФАР

1. Архитектуры волоконно-оптических систем распределения

Для компенсации потерь при оптическом разветвлении и потерь на электрооптическое и оптоэлектронное преобразования в каждом канале системы может использоваться трансимпедансный усилитель. Схема такой волоконно-оптической системы распределения с полностью электронным усилением представлена на рис. 2. Трансимпедансные усилители должны иметь достаточно большое усиление (более 30 дБ) даже для небольшого количества каналов (от 4 до 8). Это связано с тем, что потери на оптическое разделение увеличиваются пропорционально квадрату числа каналов N , а потери на электрооптическое и оптоэлектронное преобразования находятся в диапазоне от 10 до 30 дБ. Кроме того, на такую архитектуру системы влияют нелинейности и фазовые шумы трансимпедансного усилителя.

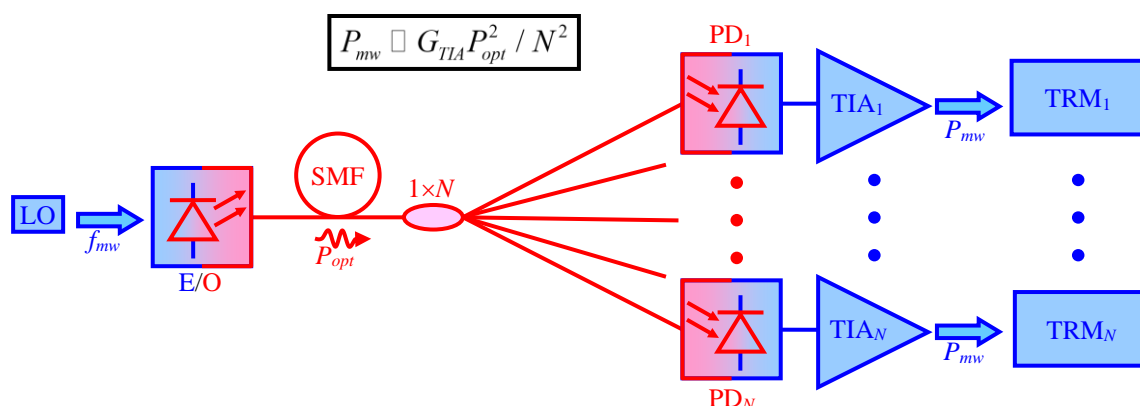


Рис. 2. Схема волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с электронным усилением: E/O – электрооптический преобразователь, SMF – одномодовое оптическое волокно, $1 \times N$ – волоконно-оптический разветвитель на N каналов, PD_1, \dots, PD_N – СВЧ-фотодиоды, TIA_1, \dots, TIA_N – трансимпедансные усилители, TRM_1, \dots, TRM_N – приемопередающие модули АФАР

Используя мощные СВЧ-фотодиоды и оптические усилители на легированном Er волокне, можно построить эффективную волоконно-оптическую систему распределения СВЧ-сигналов, схема которой показана на рис. 3. Оптический усилитель на легированном Er волокне с оптическим коэффициентом усиления G_{EDFA} имеет эквивалентное усиление G_{EDFA}^2 для СВЧ-сигналов, при этом коэффициент усиления не зависит от частоты СВЧ-сигнала

[11]. В этой архитектуре максимальное количество каналов ограничено мощностью насыщения оптического усилителя P_{EDFA} и требуемой мощностью P_{mw} СВЧ-сигнала на выходе мощного СВЧ-фотодиода, которая может быть выражена следующей формулой:

$$P_{mw} = I_{AC}^2 Z_0 / 2 = (R_{PD}^2 m_{opt}^2 Z_0 / 2) P_{EDFA}^2 / N^2, \quad (1)$$

где I_{AC} – переменный фототок фотодиода, Z_0 – сопротивление нагрузки, которое обычно равно 50 Ом для СВЧ-фотодиодов, R_{PD} – чувствительность фотодиода на частоте f_{mw} , m_{opt} – глубина оптической модуляции. Как правило, для приемопередающих модулей АФАР мощность сигнала СВЧ-гетеродина должна быть не менее 1 мВт ($P_{mw,min}=1$ мВт). Следовательно, максимальное количество каналов N_{max} для волоконно-оптической системы распределения с оптическим усилением определяется следующим выражением:

$$N_{max} = (R_{PD} m_{opt} \sqrt{Z_0 / 2}) P_{EDFA} / \sqrt{P_{mw,min}}. \quad (2)$$

Максимальная мощность насыщения оптического усилителя на легированном Er волокне с низким уровнем фазового шума составляет не более 100–300 мВт. Согласно (2), максимальное количество каналов ограничено 16-ю для типичной чувствительности мощного фотодиодного модуля 0.6 А/Вт на частоте 10 ГГц и глубине оптической модуляции около 100%.

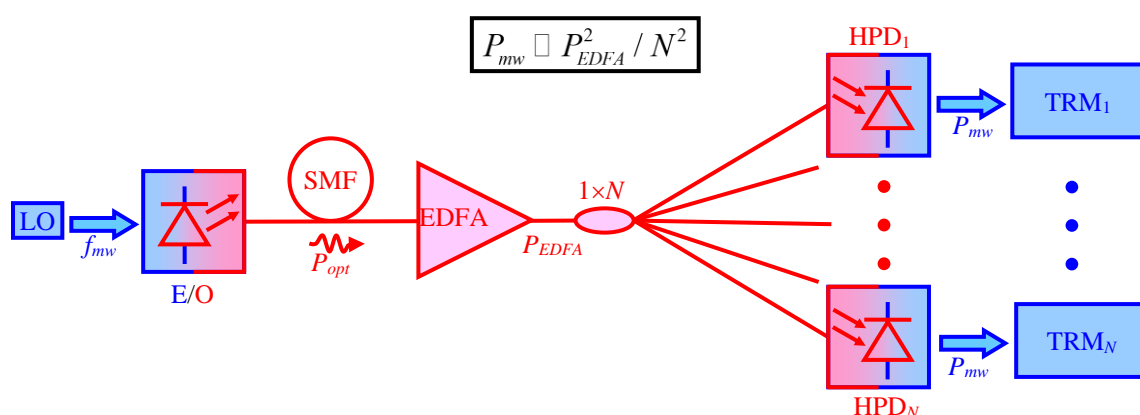


Рис. 3. Схема волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с оптическим усилением: E/O – электрооптический преобразователь, SMF – одномодовое оптическое волокно, EDFA – оптический усилитель на легированном Er волокне, $1 \times N$ – волоконно-оптический разветвитель на N каналов, HPD_1, \dots, HPD_N – мощные СВЧ-фотодиоды, TRM_1, \dots, TRM_N – приемопередающие модули АФАР

Чтобы увеличить количество каналов, необходимо использовать двухкаскадную схему оптического усиления, показанную на рис. 4 [12]. В этом случае модулированный оптический сигнал от электрооптического преобразователя усиливается первым оптическим усилителем на легированном Er волокне, затем усиленный оптический сигнал разделяется на K каналов, каждый из которых снова усиливается и разделяется еще на M каналов во втором каскаде усиления, после чего оптический сигнал преобразуется в СВЧ-сигнал в мощном СВЧ-фотодиоде. Таким образом, данная архитектура, основанная на $K+1$ оптических усилителях на легированном Er волокне, позволяет реализовать общее количество каналов $N = K \times M$. Максимальное количество каналов M_{\max} во втором каскаде усиления описывается выражением (2) и ограничено 16 каналами для малошумящих оптических усилителей на легированном Er волокне.

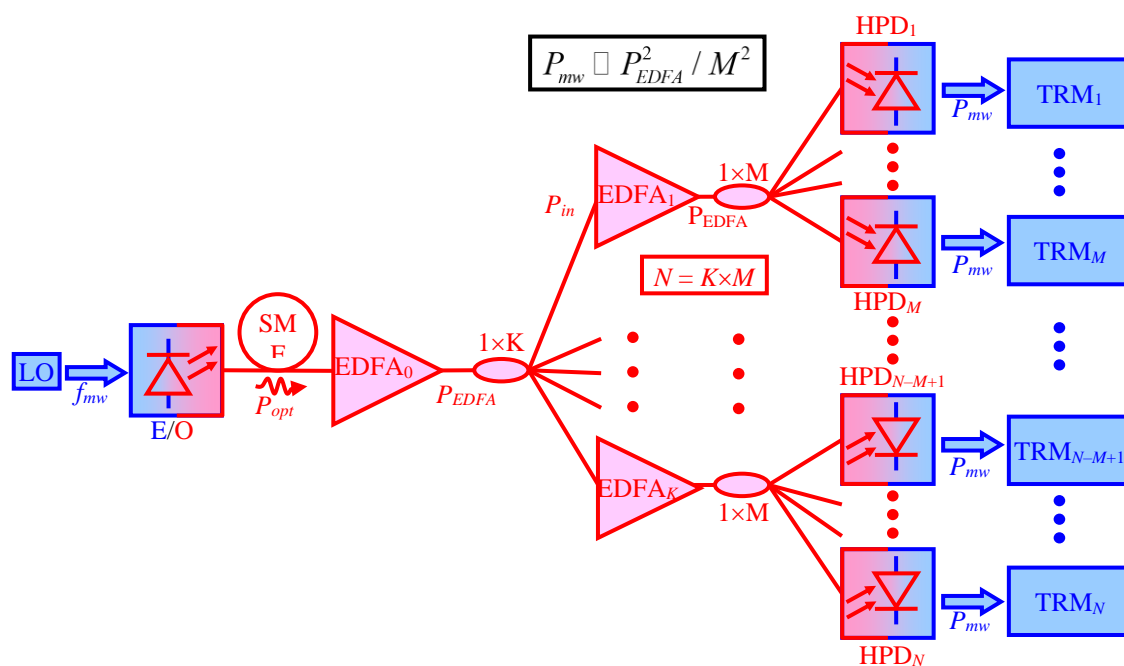


Рис. 4. Схема волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с двухкаскадным оптическим усилением: E/O – электрооптический преобразователь, SMF – одномодовое оптическое волокно, EDFA₀, ..., EDFA_K – оптические усилители на легированном Er волокне, 1×K – волоконно-оптический разветвитель на K каналов, 1×M – волоконно-оптический разветвитель на M каналов, HPD₁, ..., HPD_N – мощные СВЧ-фотодиоды, TRM₁, ..., TRM_N – приемопередающие модули АФАР

Максимальное количество каналов K_{\max} на первом каскаде усиления ограничено необходимостью обеспечения низкого фазового шума распределяемого СВЧ-сигнала. Эквивалентный аддитивный фазовый шум оптического усилителя на легированном Er волокне может быть выражен с помощью следующего выражения [12]:

$$L_{EDFA} = \frac{2h\nu_{opt}NF_{EDFA}}{(m_{opt}^2/2)P_{in}} = \frac{4h\nu_{opt}NF_{EDFA}}{m_{opt}^2P_{EDFA}} K, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, ν_{opt} – частота усиленного оптического сигнала (≈ 193 ТГц), NF_{EDFA} – оптический коэффициент шума EDFA, P_{in} – средняя оптическая мощность на входе EDFA равная P_{EDFA}/K . Для современных систем распределения минимальный уровень шума сигнала СВЧ-гетеродина должен быть меньше $L_{\max} = -150$ дБн/Гц. Следовательно, максимальное количество каналов K_{\max} в первом каскаде усиления определяется следующим выражением:

$$K_{\max} = \frac{m_{opt}^2 P_{EDFA}}{4h\nu_{opt} NF_{EDFA}} L_{\max}. \quad (4)$$

Как правило, оптический коэффициент шума малошумящих оптических усилителей на легированном Er волокне составляет 4–6 дБ, тогда, согласно (4), максимальное число каналов K_{\max} в первом каскаде ограничено 128, что приводит к общему максимальному количеству каналов $N_{\max} = 2048$. Таким образом, использование двухкаскадной схемы усиления позволяет обеспечить работу оптических усилителей в режиме насыщения, для которого шум, обусловленный биением усиливаемого оптического сигнала со спонтанным излучением, не вносит значительный вклад в общий шум на выходе фотодиодных модулей, что дает возможность получить низкий уровень собственных шумов на выходе каждого канала распределительной системы и обеспечить разводку опорного СВЧ-сигнала на тысячи каналов. Следует отметить, что, используя мультиплексирование с разделением по длине волны, можно одновременно распределять сигналы нескольких СВЧ-гетеродинов, как показано на рис. 5.

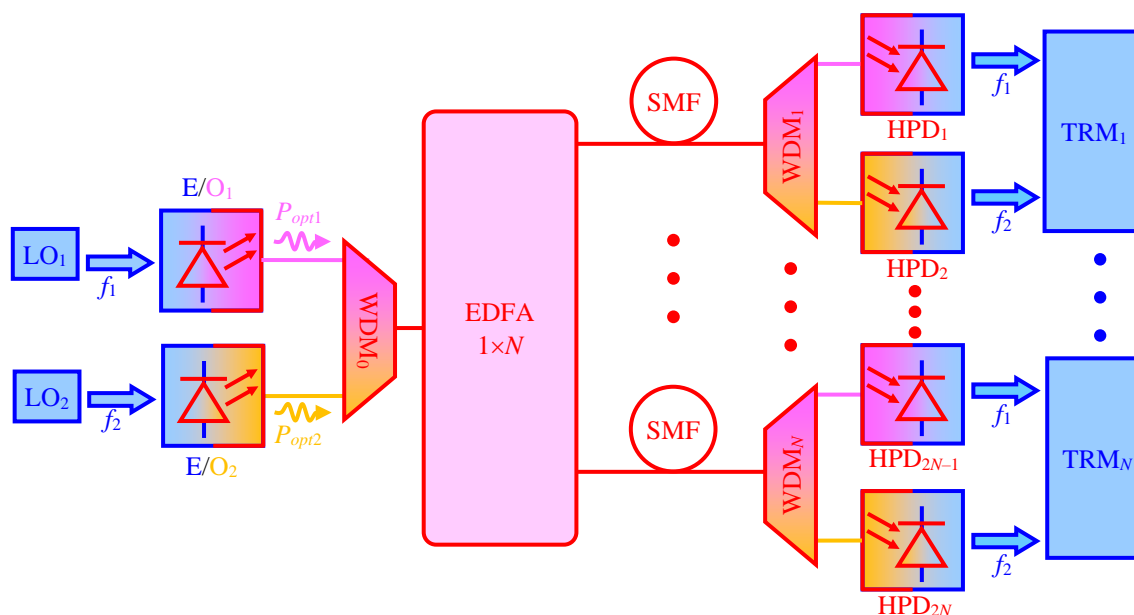


Рис. 5. Схема волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с различными частотами f_1 и f_2 на основе мультиплексирования по оптической длине волн: E/O_1 , E/O_2 – электрооптические преобразователи, работающие на разных длинах волн λ_1 и λ_2 , WDM_0 , WDM_1, \dots, WDM_N – оптические мультиплексоры по длинам волн λ_1 и λ_2 , $EDFA 1 \times N$ – волоконно-оптический модуль усиления с разделением на N каналов, SMF – одномодовое оптическое волокно, HPD_1, \dots, HPD_{2N} – мощные СВЧ-фотодиоды, TRM_1, \dots, TRM_N – приемопередающие модули АФАР

2. Конструкция модулей системы распределения

Для исследования волоконно-оптической системы распределения опорных СВЧ-сигналов с оптическим усилением был создан 4-канальный фрагмент системы распределения, представленный на рис. 6. Фрагмент состоит из электрооптического преобразователя, оптического усилителя на легированном E_r волокне, волоконно-оптического разветвителя 1×4 и 4-х мощных СВЧ-фотодиодных модулей. Для соединения волоконно-оптического разветвителя с мощными СВЧ-фотодиодными модулями используются одномодовые волоконно-оптические кабели одинаковой длины 2 ± 0.002 м. Следует отметить, что электрооптический преобразователь и оптический усилитель, которые имеют габаритные размеры значительно превышающие размеры фотодиодных модулей, могут быть расположены за пределами полотна АФАР.

В качестве электрооптического преобразователя используется волоконно-оптический лазерный диодный модуль с внешней модуляцией оптического

излучения, на СВЧ-вход которого подается опорный СВЧ-сигнал, а с оптического выхода снимается модулированный по интенсивности оптический сигнал. Волоконно-оптический лазерный модуль состоит из InGaAsP/InP лазерного диода с распределенной обратной связью (DFB), излучение которого мощностью 15 мВт на длине волны 1550 нм модулируется с помощью LiNbO₃ электрооптического модулятора Маха–Цендера, имеющего предельную частоту 20 ГГц и полуволновое напряжение 6 В (рис. 7). Для регулировки и стабилизации мощности излучения лазерного диода, а также фазы смещения модулятора Маха–Цендера применяется плата управления, которая изменяет ток накачки лазерного диода и напряжение смещения модулятора Маха–Цендера в соответствии с сигналами фотодиодов обратной связи.

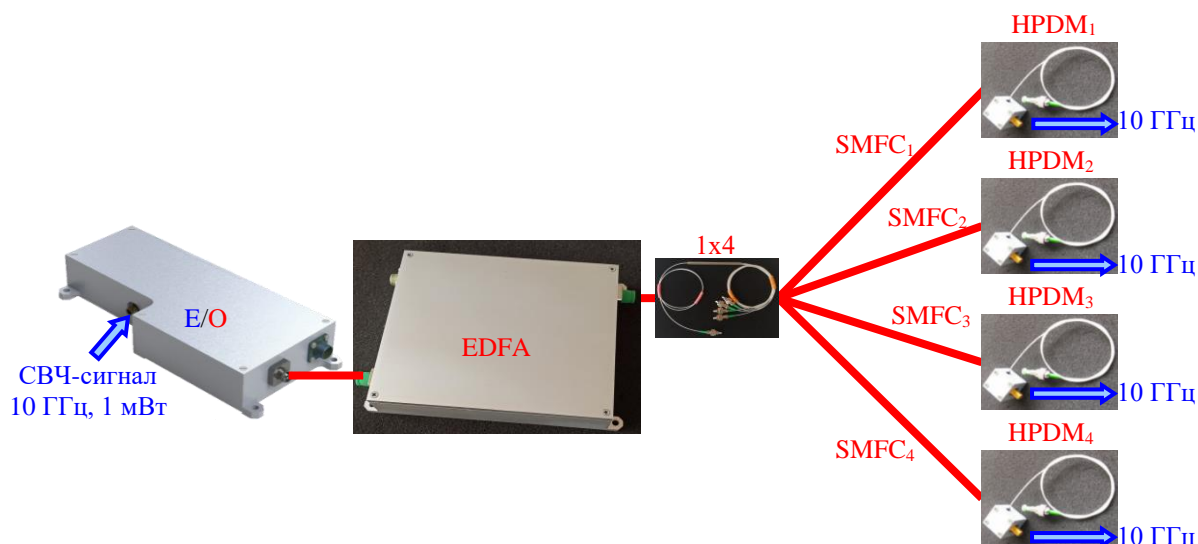


Рис. 6. Фрагмент волоконно-оптической системы распределения СВЧ-сигнала с полностью оптическим усилением. E/O – волоконно-оптический лазерный модуль с внешней модуляцией излучения, EDFA – оптический усилитель на легированном Er волокне с выходной мощностью 100 мВт, 1×4 – волоконно-оптический разветвитель на 4 канала, SMFC₁,...,SMFC₄ – одномодовые волоконно-оптические кабели длиной 2 ± 0.002 м, HPDM₁,...,HPDM₄ – мощные СВЧ-фотодиодные модули

Малозумящий оптический усилитель на легированном Er волокне был разработан и изготовлен с использованием двунаправленной накачки на основе одночастотных лазерных диодов с распределенной обратной связью, излучающих на длинах волн 1470 и 1490 нм, что позволило обеспечить

мощность насыщения 100 мВт [11]. Для обеспечения стабильной мощности насыщения в широком температурном диапазоне в модуле оптического усилителя используется плата управления лазерными диодами с активной термостабилизацией на основе элементов Пельтье и малошумящих источников тока (рис. 8).

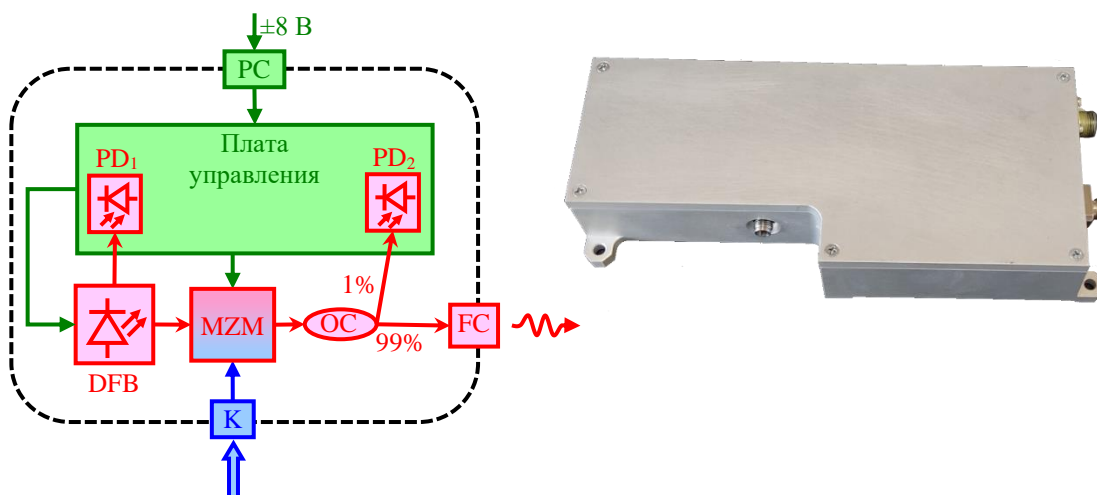


Рис. 7. Схема и фотография волоконно-оптического лазерного модуля: DFB – лазерный диод с распределенной обратной связью, MZM – оптический модулятор Маха-Цендера, OC – волоконно-оптический разветвитель, PD₁, PD₂ – фотодиоды обратной связи, FC – выходной оптический разъем FC/APC, K – входной СВЧ-разъем 2.92 мм, PC – разъем питания

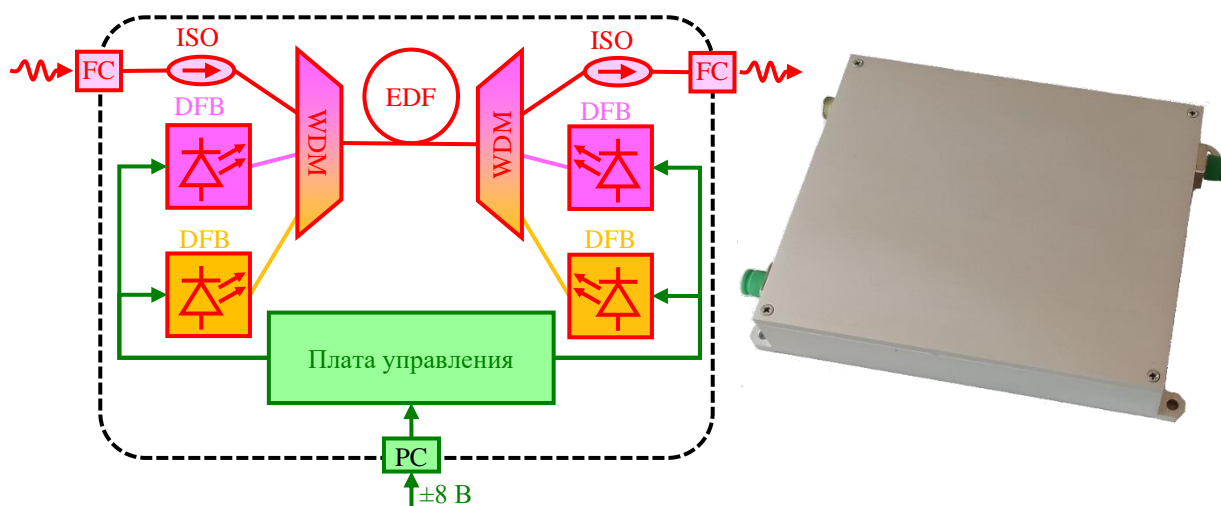


Рис. 8. Схема и фотография малошумящего оптического усилителя на легированном Er волокне: FC – входной и выходной оптические разъемы FC/APC, ISO – волоконно-оптический изолятор для длин волн 1550 ± 20 нм, DFB – лазерные диоды накачки распределенной обратной связью на длинах волн 1470 ± 5 и 1490 ± 5 нм, WDM – оптические мультиплексоры по длинам волн 1550 ± 20 и 1480 ± 20 нм, EDF – легированное Er оптическое волокно, PC – разъем питания

Мощный фотодиодный модуль с оптоволоконным вводом излучения представляет собой узел распределительной системы, на оптический вход которого подается модулированный по интенсивности оптический сигнал, а с СВЧ-выхода которого снимается детектированный СВЧ-сигнал достаточной мощности (более 1 мВт). В разработанных мощных фотодиодных модулях использованы InGaAs/InP фотодиоды с частично обедненным поглощающим слоем с предельной частотой 23 ГГц (рис. 9) [13]. Энергетические характеристики мощного фотодиодного модуля на разных частотах представлены на рис. 10. Из рисунка видно, что фотодиодный модуль обеспечивает выходную СВЧ-мощность более 5 мВт при нагрузке 50 Ом. Насыщение выходной СВЧ-мощности происходит при входной оптической мощности 18–22 мВт, что хорошо соответствует 1/4 мощности насыщения оптического усилителя, используемого в фрагменте распределительной системы.

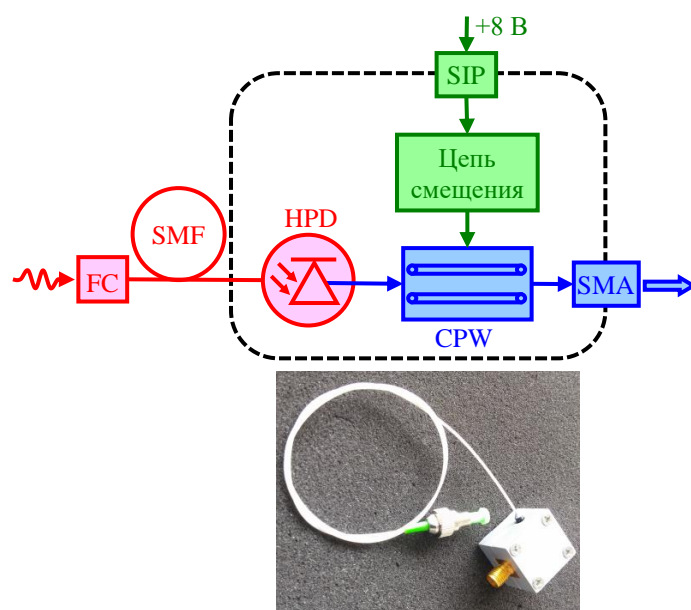


Рис. 9. Схема и фотография мощного фотодиодного модуля с оптоволоконным вводом излучения: FC – входной оптический разъем FC/APC, SMF – одномодовое оптическое волокно, HPD – мощный фотодиод, CPW – копланарная СВЧ-линия передачи, SMA – выходной СВЧ-разъем, SIP – разъем питания

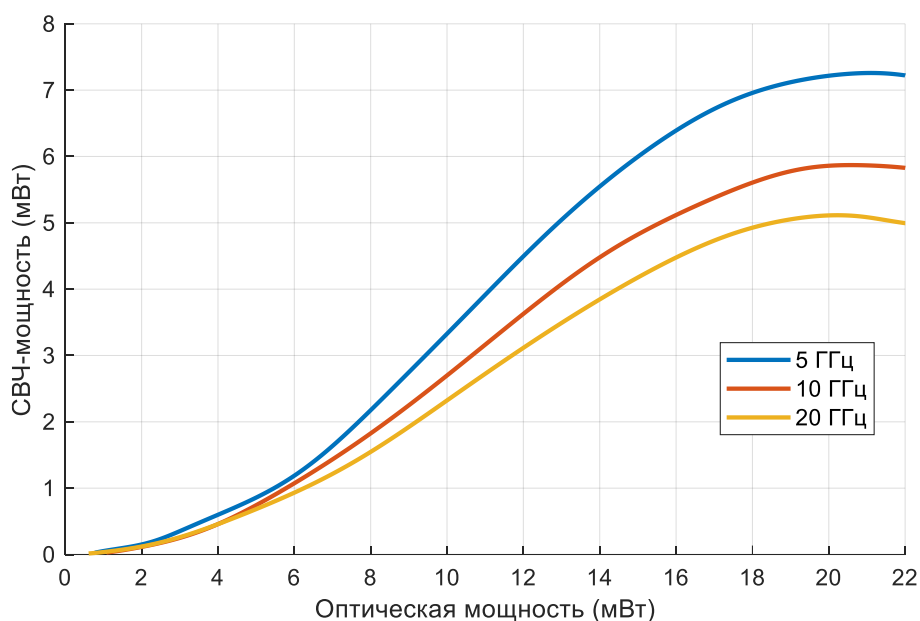


Рис. 10. Энергетические характеристики мощного волоконно-оптического фотодиодного модуля на разных частотах

3. Характеристики системы распределения

Частотная характеристика канала разработанной волоконно-оптической системы распределения с полностью оптическим усилением представлена на рис. 11. Можно видеть, что полоса пропускания системы распределения по уровню -3 дБ превышает 16 ГГц, а полезная полоса пропускания по уровню -10 дБ превышает 22 ГГц. На исследуемой частоте 10 ГГц вносимые потери канала составляют около 5 дБ.

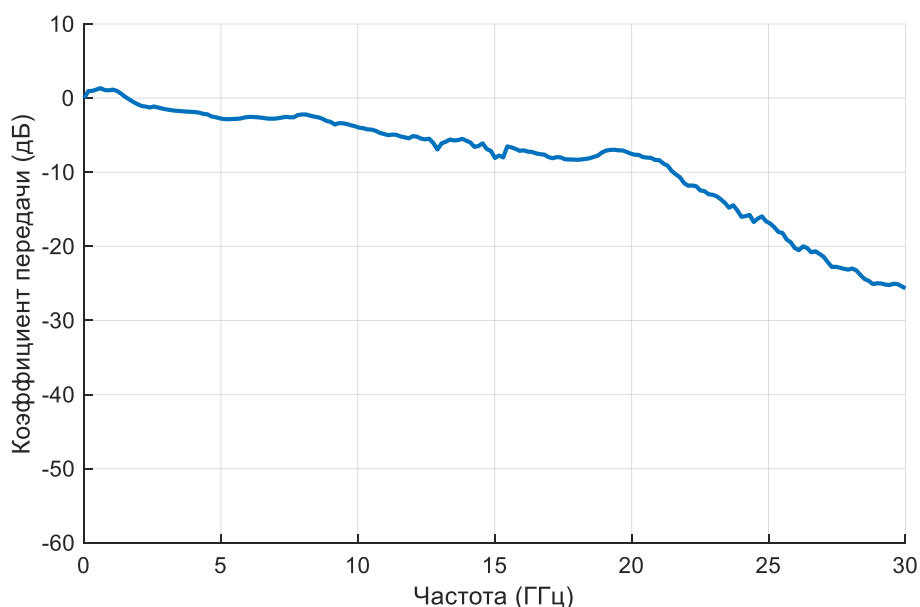


Рис. 11. Частотная характеристика канала волоконно-оптической системы распределения с оптическим усилением

Временная стабильность амплитуды распределяемого волоконно-оптической системой опорного СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц в одном из каналов представлена на рис. 12. Из рисунка видно, что максимальная флуктуация амплитуды в течение 12 часов не превышает ± 0.6 дБ.

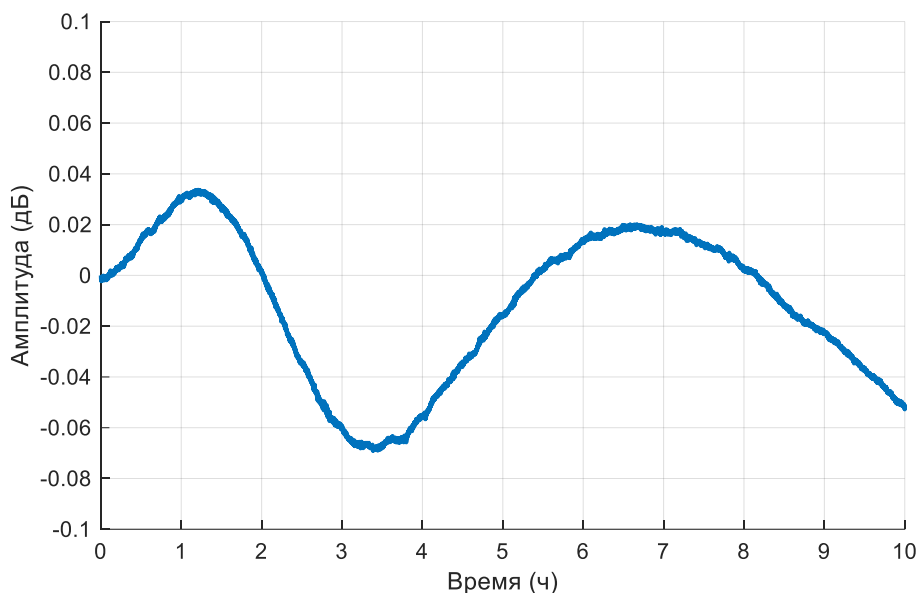


Рис. 12. Дрейф амплитуды СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц, передаваемого волоконно-оптической системой распределения с оптическим усилением

Временная стабильность фазы распределяемого волоконно-оптической системой опорного СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц представлена на рис. 13. Флуктуация фазы в каждом канале достаточно высокая (десятки градусов), однако относительный фазовый дрейф между каналами распределительной системы намного меньше и не превышает $\pm 0.5^\circ$ в течение 12 часов. Следует отметить, что для уменьшения влияния окружающей среды на изменение фазы передаваемого СВЧ-сигнала между каналами распределительной системы длины одномодовых волоконно-оптических кабелей, соединяющих оптический усилитель с мощными фотодиодными модулями, должны быть одинаковыми [14,15].

Рис. 14 показывает фазовый шум опорного СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц на входе и на выходе волоконно-оптической системы распределения с оптическим усилением. Из измерений следует, что уровень собственных фазовых шумов волоконно-оптической системы распределения не превышает

–150 дБн/Гц на частотах отстройки свыше 1 МГц, при этом уровень фазовых шумов передаваемого опорного СВЧ-сигнала на частотах отстройки менее 500 кГц не изменился. Это подтверждает низкий уровень эквивалентных фазовых шумов оптического усилителя используемого в системе распределения.

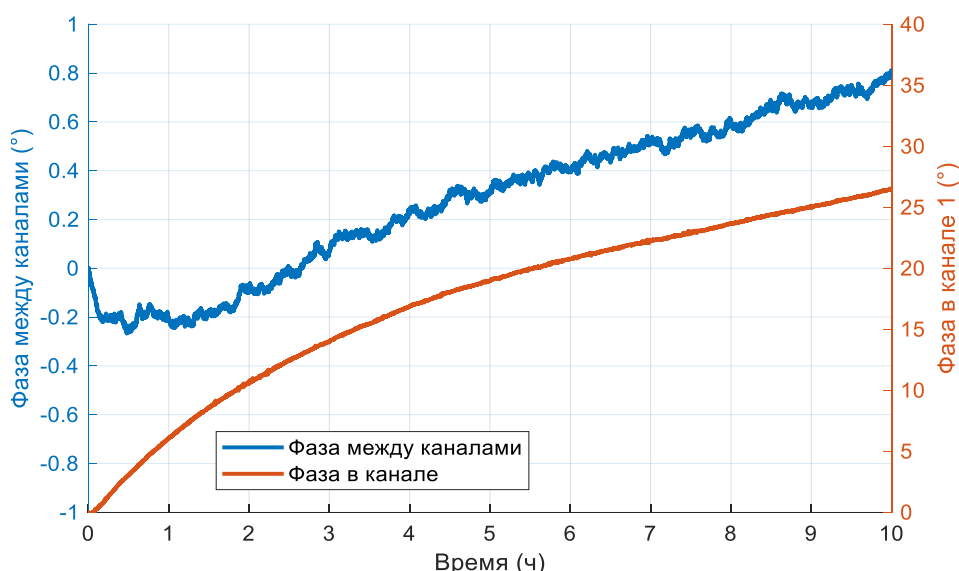


Рис. 13. Дрейф фазы опорного СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц, передаваемого волоконно-оптической системой распределения с оптическим усилением

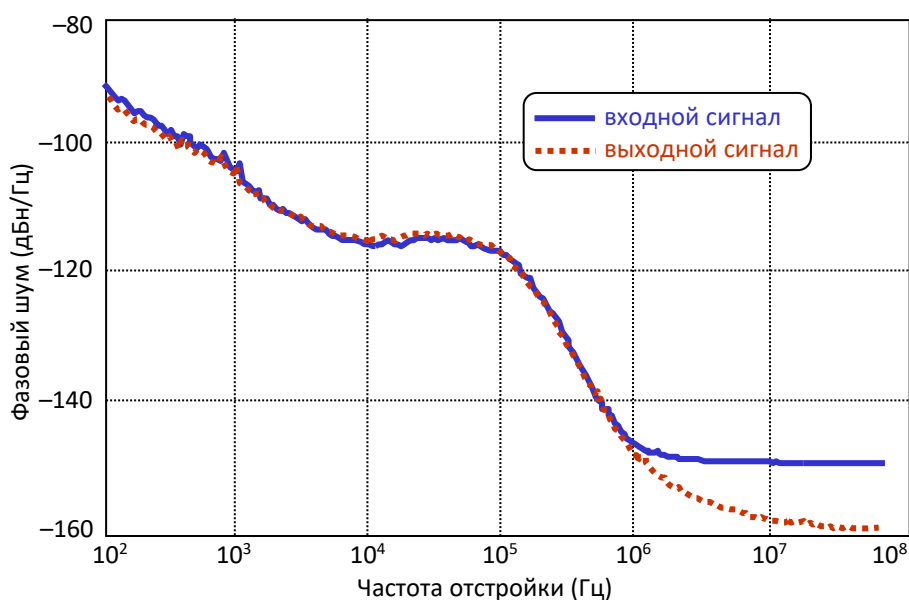


Рис. 14. Фазовый шум опорного СВЧ-сигнала на частоте 10 ГГц на входе (пунктирная кривая) и на выходе (сплошная кривая) волоконно-оптической системы распределения с оптическим усилением

Заключение

В статье представлено несколько архитектур волоконно-оптических систем распределения СВЧ-сигналов для АФАР. Показано, что двухкаскадная волоконно-оптическая система с оптическим усилением может обеспечить распределение сигналов СВЧ-гетеродина по тысячам приемопередающих модулей АФАР с низким фазовым шумом и достаточной СВЧ-мощностью милливаттного уровня. Использование таких систем позволяет повысить невосприимчивость АФАР к электромагнитным помехам, уменьшить их вес и габариты. Главным преимуществом волоконно-оптической системы распределения является высокая временная стабильность фазового распределения по полотну антенной решетки. Экспериментальное исследование фрагмента системы показывает, что в течение 10 часов наблюдения фазовый дрейф между каналами не превышает 1 градуса на частоте 10 ГГц, а амплитудный дрейф в каждом канале составляет менее 0.1 дБ, в то время как уровень фазового шума на частотах отстройки выше 1 МГц от СВЧ-несущей составляет -150 дБн/Гц.

Литература

1. Под ред. Воскресенского Д.И. *Проектирование фазированных антенных решеток. Издание 4-е.* Москва, Радиотехника. 2012. 744 с.
2. Гостюхин В.Л., Трусов В.И., Гостюхин А.В. *Активные фазированные антенные решетки. Издание 3-е.* Москва, Радиотехника. 2011. 304 с.
3. Skolnik M. *Radar handbook. Third edition.* McGraw-Hill. 2008. 1351 p.
4. Clark T., Waterhouse R. Photonics for RF front ends. *IEEE Microwave magazine.* 2011. V.12. №3. P.87-95. <https://doi.org/10.1109/MMM.2011.940319>
5. Ackerman E., Cox C. RF fiber-optic link performance. *IEEE Microwave Magazine.* 2001. V.2. №4. P.50-58. <https://doi.org/10.1109/6668.969935>
6. Berceli T., Herczfeld P. Microwave photonics – a historical perspective. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 2010. V.58, №11. P.2992-3000. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2076932>

7. Cox C. *Analog optical links (theory and practice)*. Cambridge University Press. 2004. 288 p.
8. Tangonan G., Willie Ng, Yap D., Stephens R. *System design and performance of wideband photonic phased array antennas, in RF photonic technology in optical fiber links*. Cambridge University Press. 2002. P.377-399.
9. Chazelas J., Ziaei A., Dolti D., Merlet T. Potential technological breakthroughs for phased array antennas. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2009. V.24. №11. P.22-27. <https://doi.org/10.1109/MAES.2009.5344178>
10. Daryoush A., Saedi R., Samant N., Herczfild P., Belaga M. Fiber optic fed C-band active phased array antennas. *IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*. 1992. V.1. P.437-440. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1992.188006>
11. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. Noise and gain of an erbium-doped fiber amplifier for delay-line optoelectronic oscillator. *IEEE International Conference on Noise and Fluctuations*. 2017. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ICNF.2017.7985957>
12. Chizh A., Malyshev S. Fiber-optic system for local-oscillator signal distribution in active phased arrays. *11th European Radar Conference*. 2014. P.439-442. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991301>
13. Malyshev S., Chizh A., Vasileuski Y. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation. *Journal of Lightwave Technology*. 2008. V.26. №15. P.2732-2739. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.927594>
14. Roman J., Frankel M., Williams K., Esman R. Optical fiber cables for synchronous remoting of numerous transmitters/receivers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1998. V.10. №4. P.591-593. <https://doi.org/10.1109/68.662604>
15. Campillo A., Funk E., Tulchinsky D., Dexter J., Williams K. Phase performance of an eight-channel wavelength-division-multiplexed analog-delay line. *Journal of Lightwave Technology*. 2004. V.22. №2. P.440-447. <https://doi.org/10.1109/JLT.2004.824460>

Для цитирования:

Чиж А.Л., Микитчук К.Б. Волоконно-оптическая система распределения сигнала СВЧ-гетеродина для активных фазированных антенных решеток. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.11>