

О целесообразности использования волоконно-оптической линии связи в различных схемах приемного тракта комплекса радиомониторинга

А.С. Подстригаев¹, А.С. Лукиянов¹, А.В. Смоляков^{1,2}, А.Н. Шишков¹,
В.В. Давыдов³, М.И. Никитина³

¹АО «НИИ «Вектор», Академика Павлова 14 А, Санкт-Петербург, Россия, 197376

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

³Высшая школа прикладной физики и космических технологий, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Аннотация. В статье рассмотрены все варианты схем построения широкополосного и узкополосного приемного тракта для передачи СВЧ сигналов в комплексах радиомониторинга. Представлены характеристики приемного тракта, как с использованием волоконно-оптической линии связи, так и СВЧ кабеля в различных его частях. Отмечены особенности, достоинства и недостатки применения волоконно-оптической линии связи. Проведено сравнение характеристик исследуемых частей приемных трактов с зарубежными аналогами. Представлены результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов.

1. Введение

Для анализа электромагнитной обстановки, контроля функционирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических и телекоммуникационных источников радиоизлучения проводится радиомониторинг [1-3]. Комплекс радиомониторинга (КРМ) работает в широком диапазоне частот, что определяет построение его приемного тракта в виде приемника прямого усиления или сканирующего по частоте супергетеродинного приемника. При этом для увеличения зоны обзора, создания большой базы при пеленговании, а также для удобства размещения многоканальной аппаратуры приема и обработки информации в одном комплексе, антенны КРМ выносятся на значительную дальность от места размещения аппаратуры обработки сигналов, средств коммуникаций и других элементов комплекса, как это делается в различных РЛС [3-6]. Для передачи различных сигналов между антеннами и остальными частями КРМ широко используется волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС). Аналогичные системы передачи СВЧ сигналов используются на морских судах и больших летательных аппаратах [7-9]. Есть также частные применения специализированных ВОЛС для передачи СВЧ сигналов. Тем не менее, до сих пор отсутствует анализ изменения характеристик КРМ при использовании ВОЛС в различных частях его приемного тракта. Для других случаев применения ВОЛС, связанных с их применением для передачи СВЧ сигналов данный анализ также не проводился.

В данной ситуации целесообразно выполнить такой анализ для каждого варианта введения ВОЛС в тракт передачи сигнала в сравнении с использованием новых разработок СВЧ-кабеля. Так как в ряде случаев практика показывает, что эффективность использования СВЧ-кабеля выше чем ВОЛС, как по характеристикам, простоте конструкторских решений в различных случаях передачи СВЧ сигнала, так и по стоимости.

В анализе в первую очередь необходимо будет учесть частотные зависимости коэффициента передачи и шума для кабеля и оптической части. Это связано с тем, что для каждого частотного диапазона эти характеристики в передающем тракте будут отличаться.

Поэтому целью настоящей работы является выполнение сравнительного анализа двух вариантов тракта (широкополосного и узкополосного) при использовании в них ВОЛС и СВЧ-кабеля. В настоящее время для решения различных задач и в зависимости от конструкций антенной системы ВОЛС размещается в трех частях приемного тракта (непосредственно на выходе антенны до малошумящего усилителя (МШУ), после МШУ и на выходе преобразователя частоты – в приемнике с преобразованием). Большинство радиолокационных станции и комплексов радиомониторинга работают в диапазоне рабочих частот от 2 до 18 ГГц. При рассмотрении размещения ВОЛС после преобразователя частоты, исследования будут проводиться в диапазоне частот от 1.5 ГГц до 2 ГГц, в который переносится сигнал СВЧ в КРМ. Для различных типов РЛС СВЧ сигнал после преобразования может передаваться на более низких промежуточных частотах, например, 90 МГц в активной фазированной антенной решетке (АФАР). Для радиомониторинга в качестве критерия оценки успешной его работы выбраны чувствительность и соответствующая ей максимальная дальность обнаружения КРМ в свободном пространстве. Для большинства РЛС используются те же самые критерии.

2. Схемы построения приемных трактов СВЧ сигналов, методики их расчетов и измерения параметров.

Для исследований нами были собраны типовые схемы широкополосного и узкополосного трактов, используемые в аппаратуре радиотехнического мониторинга. В состав этих схем была включена конструкция опико-электронного тракта (ОЭТ). Данный тракт состоит из лазера со встроенным модулятором (трансммиттер OTS-2 T/3.5-0518-29-10-FA-1-00-1), оптического волокна, оптических изоляторов и фотоприемного устройства SIRU 3040 фирмы Emscore. Диапазоны рабочих частот трансмиттера и фотоприемного устройства составляют от 0,5 до 18 ГГц и от 0,3 до 40 ГГц соответственно.

На рис. 1 представлены варианты установки ОЭТ и СВЧ-кабеля широкополосном передающем тракте.

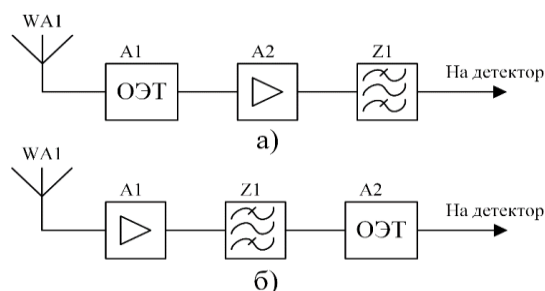


Рисунок 1. Структурные схемы широкополосного передающего тракта: а) - WA1 – приемная антенна; A1- ОЭТ; A2-МШУ; Z1-фильтр, б) - WA1 – приемная антенна; A1 – МШУ; Z1-фильтр; A2 – МШУ.

Нами были измерены коэффициент передачи K_i и коэффициент шума N_i каждого узла схемы. Для измерений КП оптического тракта использован векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVA20. В связи с высоким значением КШ для его измерения выбран метод с использованием генератора сигналов [7, 10], согласно которому КШ определяется по следующему выражению:

$$F = P_{ГЕН} / kT_0\Delta f ,$$

где $P_{ГЕН}$ – мощность генератора, при которой выходная мощность на 3 дБ выше уровня шума на согласованной нагрузке в отсутствие сигнала, Δf – полоса измерения.

В таблице 1 представлены результаты данных измерений.

Таблица 1. Характеристики элементов широкополосного тракта.

Хар-ка	Ед. измерения	Усилитель	Фильтр	ОЭТ
K_i	дБ	14	-3	-24,4
	разы	25,1	0,5	0,0037
N_i	дБ	3,5	3	52,1
	разы	2,24	2	162181

На рис. 2 представлены варианты установки ОЭТ и СВЧ-кабеля узкополосном передающем тракте.

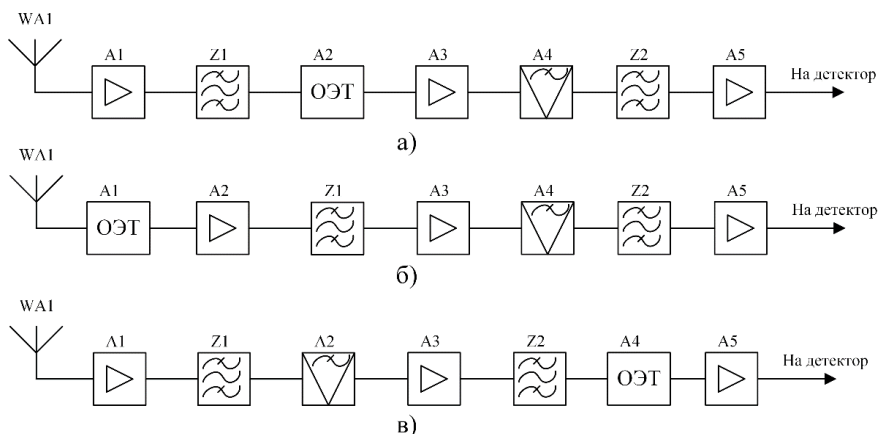


Рисунок 2. Структурные схемы широкополосного передающего тракта: а) - WA1 – приемная антенна; Z1-фильтр; A2- ОЭТ; A3-МШУ; A4 – смеситель; Z2-фильтр; A5 – МШУ, б) - WA1 – приемная антенна; A1 – ОЭТ; A2-МШУ; Z1-фильтр; A3 – МШУ; A4 – смеситель; Z2-фильтр; A5 – МШУ, в) - WA1 – приемная антенна; A1 – МШУ; Z1-фильтр; A2 – смеситель; A3 – МШУ; Z2-фильтр; A4 – ОЭТ; A5 – МШУ.

Для элементов этих схем также были измерены коэффициент передачи K_i и коэффициент шума N_i . Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики элементов узкополосного тракта.

Хар-ка	Ед. изм-ия	Усил-ль	Фильтр	Смеситель	Усилитель	Фильтр ПЧ	ОЭТ	Усил-ль
K_i	дБ	14	-3	-13	14	-2	-24,4	14
	разы	25,1	0,5	0,05	25,1	0,63	0,0037	25,1
N_i	дБ	3,5	3	13	3,5	2	52,1	3,5
	разы	2,24	2	20	2,24	1,58	162181	2,24

Проведенные эксперименты показали, что для расчета чувствительности конструкций рассматриваемых в статье приемных трактов СВЧ сигнала более целесообразно использовать следующее выражение:

$$P_0 = kT_0 \cdot \Delta f (N_0 - 1 + \frac{T_A}{T_0})q^2, \tag{1}$$

где N_0 – суммарное значение КШ, Δf – эффективная шумовая полоса приемника, T_A – шумовая температура антенны, q – отношение сигнал/шум.

Для дальности обнаружения расчет следует выполнять по следующей формуле, для которой значение P_0 определяется из (1):

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_1 \cdot G_{A1} \cdot G_{A2} \cdot \lambda^2 / P_0}{4\pi}}, \quad (2)$$

где P_1 – мощность G_{A1} и G_{A2} – коэффициент усиления передающей и приемной антенн соответственно, λ – длина волны.

Стоит отметить, что выражение (2) описывает дальность обнаружения в свободном пространстве, т.е. не учитывает кривизну земной поверхности, высоту расположения приемной и передающей антенн, а также частотно-зависимое затухание в атмосфере.

3. Результаты экспериментальных исследований и обсуждение полученных результатов

На рис. 3 в качестве примера представлены экспериментальные зависимости коэффициента шума (КШ) и коэффициента передачи (КП) от частоты СВЧ сигнала, используемой нами конструкции ОЭТ в схемах приемного тракта КРМ.

Анализ полученных результатов показывает, что в исследуемом частотном диапазоне (2 – 18 ГГц) коэффициент передачи изменяется в пределах от минус 22,3 до минус 19,1 дБ, а коэффициент шума – от 40,5 до 52 дБ. В полосе частот от 12 до 18 ГГц изменения этих параметров ОЭТ незначительные по сравнению с общим изменением во всей полосе частот.

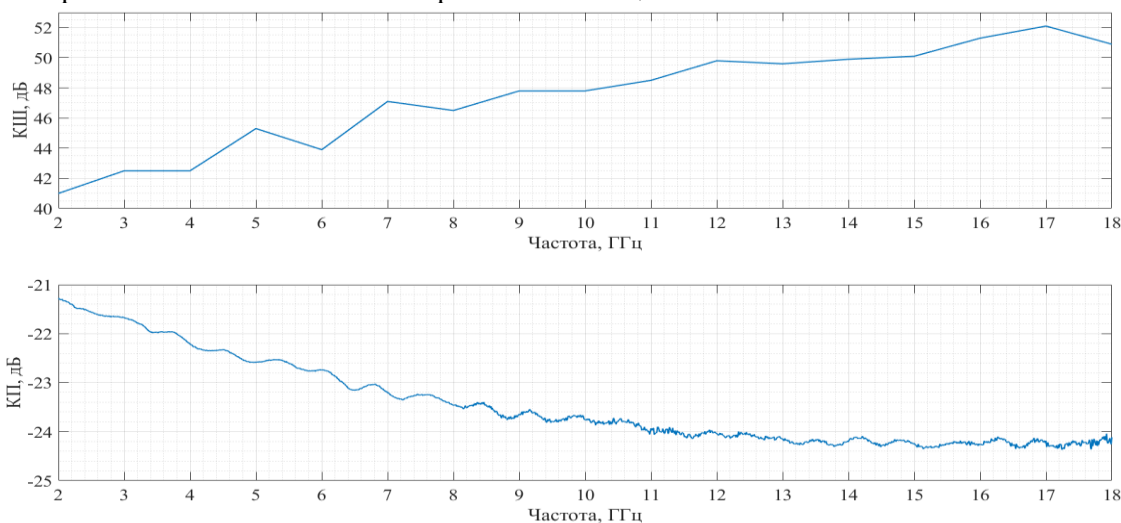


Рисунок 3. Зависимости коэффициента шума КШ и коэффициента передачи КП от частоты СВЧ сигнала ОЭТ при температуре окружающей среды $T = 293.4$ К.

Экспериментально полученные значения КП и КШ исследованного ОЭТ близки к паспортным данным аналогичных трактов зарубежного производства того же частотного диапазона, например, OTS-2 22 GHz [11], PSI-1601-20L [12]. Если учесть, то обстоятельство, что сигнал СВЧ в ряде случаев необходимо передавать на расстояния более 200 м, то данные характеристики с учетом затухания его в волокне не более 0.0001 дБ/м [13] вполне допустимы. Для сравнения на рис. 4 представлены данные по одному из лучших зарубежных моделей СВЧ-кабеля марок SUCOFLEX (SF) с малыми потерями.

Затухание в кабеле SF 406 на частоте 18 ГГц составляет порядка 0.5 дБ/м. При длине кабеля в 100 м – затухание будет более 50 дБ.

С использованием полученных результатов и выбранных нами, на основе проведенных исследований, соотношений (1) и (2) были рассчитаны значения чувствительности и дальности обнаружения с использованием ОЭТ и СВЧ-кабеля в приемном тракте.

Необходимо отметить, что в соответствии с принятыми методиками результаты расчетов для всех типов тракта с использованием СВЧ-кабеля получены исходя из длины кабеля 1 м. При расчетах в (1) значение $q = 13$ дБ. Данные расчетов представлены в таблице 3.

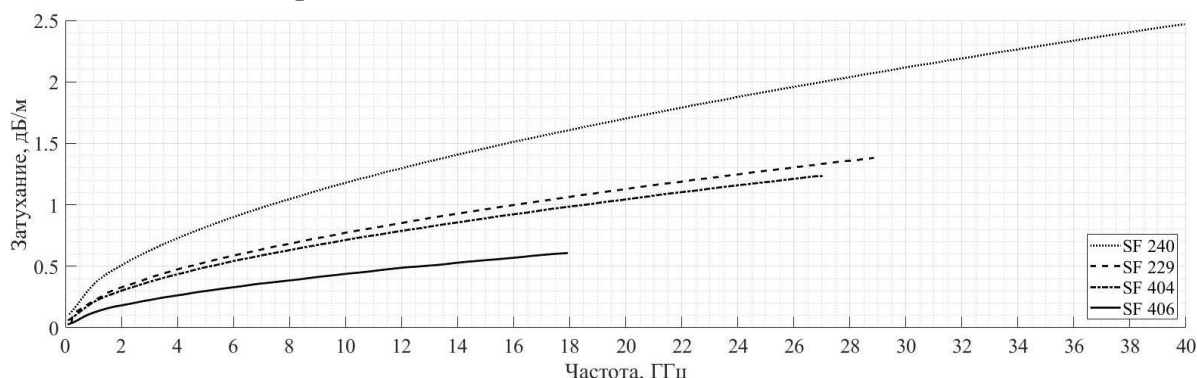


Рисунок 4. Зависимость коэффициента передачи КП (затухание) от частоты СВЧ сигнала СВЧ – кабелей различных марок при температуре окружающей среды $T = 293$ К.

Таблица 3. Результаты расчета чувствительности и дальности обнаружения для различных конструкций приемного тракта.

Тип тракта	Вариант схемы	Тип тракта	Чувствительность, дБ(Вт)	Дальность обнаружения, км
Широкополосный $\Delta f = 16$ ГГц	рис. 1.а	ОЭТ	-47,4	10
		СВЧ	-85,5	792
	рис. 1.б	ОЭТ	-36,4	3
		СВЧ	-84,9	734
Узкополосный $\Delta f = 0,5$ ГГц	рис. 2.а	ОЭТ	-62,4	55
		СВЧ	-99,8	4 114
	рис. 2.б	ОЭТ	-51,4	16
		СВЧ	-99,3	3 854
	рис. 2.в	ОЭТ	-61,4	49
		СВЧ	-96,0	2 649

Анализ результатов, представленных в таблицы 3 позволяет сделать ряд выводов, которые ранее были не установлены. В зависимости от места включения ОЭТ в приемный тракт вносимые потери во всю передающую СВЧ сигнал систему различаются. Кроме того, нами было установлено, что потери дополнительно зависят от коэффициентов передачи и коэффициентов шума других элементов приемного тракта, которые также при различных включениях немного изменяются при наличии ОЭТ. Поэтому оценить вносимое ОЭТ затухание напрямую затруднено. Соответственно, в случае такого рассмотрения затруднена и оценка необходимости использования ВОЛС в конкретных схемах приемных устройств.

Таблица 4. Характеристика тракта в эквивалентной длине СВЧ-кабеля L .

Тип тракта	Вариант схемы	L , м
Широкополосный ($\Delta f = 16$ ГГц)	рис. 1.а	86,9
	рис. 1.б	80,9
Узкополосный ($\Delta f = 0,5$ ГГц)	рис. 2.а	75,2
	рис. 2.б	80,0
	рис. 2.в	81,1

Поэтому нами для оценки обоснованности применения ОЭТ в КРМ предлагается использовать эквивалентную длину СВЧ-кабеля L , при которой значения чувствительности и дальности

обнаружения будут равны аналогичным значениям при использовании в приемном тракте КРМ ОЭТ. В таблице 4 представлены результаты расчета L для различных схем включения ОЭТ.

Полученные результаты показывают, что в случае использования для построения ОЭТ, рассмотренные нами компоненты, данные тракты по сравнению с СВЧ-кабелем целесообразнее использовать на расстояниях более 90 м, если нет резких изгибов и трудностей в прокладке СВЧ-кабеля, а также мощного фона помех различного рода.

Проведенные исследования показали, что использование ОЭТ со встроенными усилителями (предварительный и выходной) уменьшает коэффициент шума и увеличивает коэффициент передачи. Но в совокупности это приводит к меньшей эквивалентной длине СВЧ-кабеля L .

4. Заключение

Полученные экспериментальные результаты исследования характеристик ОЭТ при различных способах его включения в приемный тракт позволили выполнить сравнения чувствительности КРМ при использовании ВОЛС и СВЧ-кабеля. Для типовых вариантов построения приемного канала КРМ рассчитано максимальное значение длины СВЧ-кабеля, при превышении которой целесообразно использование ВОЛС. Необходимо также отметить, что последние разработки [14] в области модернизации параметров ОЭТ ($K_{OЭТ} = 13$ дБ и $N_{OЭТ} = 4$ дБ) показывают высокую перспективность их использования для передачи СВЧ сигналов. При таких параметрах эквивалентная длина кабеля в зависимости от условий эксплуатации уменьшается до 2 – 8 м. Это переводит возможность использования ОЭТ на новый качественный уровень.

5. Литература

- [1] Лихачев, В.П. Обоснование требований к взаимному расположению средств радиотехнического мониторинга и помех / В.П. Лихачев, Н.В. Лихачева // Научные технологии. – 2010. – Т. 11, № 9. – С. 51-54.
- [2] Мельников, Ю.П. Методы оценки погрешностей пассивного определения координат объектов при использовании сигналов удаленной обзорной РЛС / Ю.П. Мельников // Радиотехника. – 2000. – № 9. – С. 27-32.
- [3] 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.
- [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. Rodygina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012037.
- [5] 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.
- [6] Фокин, Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами / А.Г. Фокин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 2009.
- [7] 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.
- [8] Lukashov, N.A. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping / N.A. Lukashov, A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova, A.P. Valov // International Conference Laser Optics (ICLO 2018) Proceedings. – 2018. – P. 271.

- [9] Petrov, A.A. Some Directions 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.
- [10] Лихачев, В.П. Обоснование требований к взаимному расположению средств радиотехнического мониторинга и помех / В.П. Лихачев, Н.В. Лихачева // *Наукоемкие технологии*. – 2010. – Т. 11, № 9. – С. 51-54.
- [11] Optiva OTS-2 22 GHz Unamplified Microwave Band Fiber Optic Links [Electronic resource]. – Access mode: <http://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/Optiva-OTS-2-22GHz-Unamplified.pdf> (14.11.2018).
- [12] PSI-1600-20L RF Photonic Link Series [Electronic resource]. – PHOTONIC Systems, Inc. – Access mode: http://www.photonicsinc.com/pdfs/1600_20L/PSI-160020L%20RF%20Photonic%20Link%20Series%200813.pdf (15.11.2018).
- [13] Белкин, М.Е. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника / М.Е. Белкин, А.С. Сигов // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – Т. 54, № 8. – С. 901-914.
- [14] PSI-2600-20L RF Photonic Link Series [Electronic resource]. – Photonic Systems. – Access mode: http://www.photonicsinc.com/pdfs/2600_20L/PSI-2600-20L%20RF%20Photonic%20Link%20Series%200813.pdf (17.10.2018).

The expediency of fiber-optical communication line used in different schemes of reception tract of the radio monitoring complex

A.S. Podstrigaev^{1,2}, A.S. Lukiyanov¹, A.V. Smolyakov¹, A.N. Shishkov¹, V.V. Davydov³, M.I. Nikitina³

¹Scientific-Research Institute Vector OJSC, st. Academician Pavlov 14 A, St. Petersburg, Russia, 197376

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", st. Professor Popova 5, St. Petersburg, Russia, 197376

³Higher School of applied physics and space technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

Abstract. In the article the all variants of broadband and narrowband receiving tract design schemes for microwave signal transmission in radio monitoring complexes are considered. The characteristics of receiving tract with use of fiber-optic communication line or microwave cable in its various parts are presented. The features, advantages and disadvantages of using fiber-optic communication lines are marked. The comparison of the investigation characteristics of receiving tract parts with foreign analogues are performed. The results of experimental research and theoretical calculations are presented.