

Особенности передачи СВЧ сигналов на морских объектах

Г.А. Пчелкин^{1,2}, В.Б. Фадсенко^{1,2}, В.В. Давыдов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт Физики, Нанотехнологий и Телекоммуникаций, Высшая Школа Прикладной Физики и Космических Технологий, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

²АО ФНПЦ «Концерн «Гранит-Электрон», Госпитальная 3, Санкт-Петербург, Россия, 119014

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения волоконно-оптических линий связи для передачи СВЧ сигналов на морских объектах. Установлены особенности построения схемы передачи СВЧ сигнала от пассивной антенны по волоконно-оптической линии связи до устройств обработки. Предложены технические решения, позволяющие оптимизировать конструкцию волоконно-оптической линии связи. Представлены результаты исследований параметров волоконно-оптической линии связи.

1. Введение

В условиях непрерывного развития научно-технического прогресса изменяется форма и технические параметры различных подвижных объектов, которые необходимо обнаружить и идентифицировать [1-5]. Это обстоятельство постоянно ставит новые задачи перед разработчиками радиолокационных станций (РЛС). Современные конструкции РЛС, созданные на основе новейших научных разработок, позволяют обнаруживать различные объекты, за счет мощного электромагнитного излучения и определенной конфигурации диаграммы направленности излучающей антенны [1, 2, 5-9]. Для этого на морских объектах, а также в ряде моделей наземных РЛС разделяют приемные и излучающие (передающие) антенны. Это позволяет также увеличить обзор пространства и дальность обнаружения целей при одновременном контроле движения нескольких целей, как это реализовано на спутниковых системах [5, 6, 10-14].

Одной из наиболее сложно решаемых задач при эксплуатации морских РЛС является передача без искажений СВЧ сигналов между устройствами, входящими в её состав [1, 2, 11, 15, 16]. Особенно от приемной антенны, размещенной на верхней палубе мачты корабля к устройству обработки информации, которое расположено в его корпусе.

В радиолокационных станциях на морских объектах, введенных в эксплуатацию ранее и работающих по настоящее время, для передачи СВЧ сигналов используются коаксиальные кабели и волноводы [1, 4, 5, 10, 15-18]. Эти средства передачи СВЧ сигнала имеют большие недостатки. В коаксиальных кабелях величина затухания сигнала составляет то 1 до 2 дБ/м на частотах f_c до 12 ГГц и более 2 дБ/м на более высоких f_c . При передаче сигнала на расстояния более 50 м затухание в кабеле будут очень большим. Для его компенсации в линии передачи потребуется использовать дополнительные усилители, которые также обладают шумом и

имеют ограничения по полосе. В ряде случаев их придется размещать в зоне с высоким уровнем помех (между мачтой корабля и корпусом). Опыт эксплуатации таких линий связи показывает, что использование усилителя еще больше ухудшит устойчивость системы передачи СВЧ сигнала к электромагнитным помехам. Этих помех при скученности различных радиолокационных и электронных систем, как на мачтах корабля, так и по его площади очень много. Необходимо отметить, что экранированные коаксиальные кабели имеют плохую гибкость. В ряде случаев их прокладка по «прямой» затруднена. Необходимо сделать поворот. В этом случае приходится использовать соединительные разъемы, что существенно ухудшает защиту линии передачи от помех [5-7, 18, 19].

В отличие от коаксиальных кабелей волноводы обладают более лучшими характеристиками. Величина затухания сигнала не превышает 0.11 дБ/м. Однако их использование на морских объектах в условиях увеличения количества аппаратуры ставится под сомнение в связи с громоздкой конструкцией волноводной системы для передачи СВЧ сигнала.

Одним из решений этой задачи может быть использование для передачи СВЧ сигналов волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) – устройства радиопотоники. В настоящее время радиопотоника является одним из перспективных направлений радиофизики и оптики [16, 19-24]. Волоконно-оптические линии передачи превосходят по своим характеристикам коаксиальные кабели и волновые тракты [17-26]. Но при их использовании на морских объектах возникают особенности, которые необходимо учитывать, как при разработке ВОЛП, так и при последующей их эксплуатации. Поэтому целью нашей работы являлось выявление этих особенностей и учет их в конструкции разрабатываемой нами ВОЛП для РЛС морского базирования для повышения степени надежности её эксплуатации.

2. Конструкция волоконно-оптической линии передачи и особенности её построения

Особенностью эксплуатации РЛС морского базирования (для которых разрабатывается ВОЛП) является то, что в них для излучения СВЧ сигнала используется параболическая антенна непрерывного действия высокой мощности с широкой диаграммой направленности [1, 2, 5]. Отраженные сигналы от различных объектов принимаются приемной антенной в неперiodической последовательности [2, 4, 5]. Причем, в приемное устройство кроме отраженного основного сигнала от объекта поступают также различные зеркальные сигналы, которые образовались в результате отражений, например, от морской поверхности. Кроме того, диаграммой направленности параболической антенны одновременно облучаются несколько объектов. Часто происходит отражение сигнала от одного объекта на другом. Потом этот сигнал поступает на приемную антенну. Если в каналах связи при передаче таких сигналов возникнут дополнительные помехи, то обработать информацию будет крайне сложно.

Еще одной особенностью построения данных ВОЛП является то, что сигнал СВЧ необходимо передавать на расстояния не более 100 м. Потери в амплитуде сигнала при его затухании можно считать не существенными. Различные типы дисперсии вносят в форму передаваемого сигнала незначительные искажения по причине малого времени его распространения по оптическому волокну [10, 15, 17, 18]. Набег фазы в передаваемом оптическом сигнале может быть только по причине колебаний температуры T волокна [19, 20, 23, 26].

В отличие от наземных и РЛС летательных аппаратов в рассмотренных конструкциях морских РЛС для приема отраженных от различных целей используются несколько антенн. В устройство обработки от них одновременно передается по различным каналам информация. Причем в ряде случаев по нескольким целям одновременно. Также в этой информации находятся «метки», созданные сигналами после нескольких отражений. Некоторые из них имеют амплитуду ниже уровня шумов. В данной ситуации при обработке будет крайне сложно выделить сигналы, идущие непосредственно от цели с амплитудой, также ниже уровня шумов. Такой метод применяется в радиолокации одиночных целей на дальних расстояниях. Поэтому после малошумящего усилителя не имеет смысла ставить фильтр и смеситель с гетеродинным приемником. А сразу сигнал с выхода малошумящего усилителя подать сигнал на вход

оптического модулятора ВОЛП. Это является еще одной особенностью схемы построения регистрации сигнала в РЛС морского базирования в отличие от классических схем.

С учетом этих особенностей, а также проведенных ранее исследований различными авторами, нами была разработана конструкция лабораторного макета ВОЛП. Её структурная схема представлена на рис. 2.

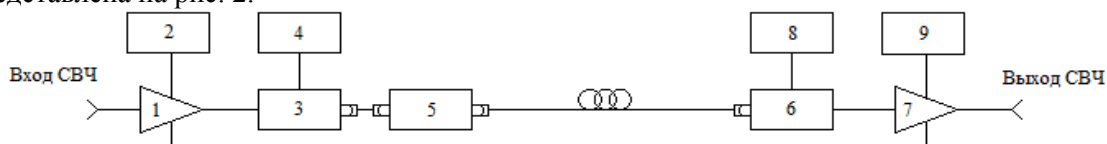


Рисунок 1. Структурная схема лабораторного макета волоконно-оптической линии передачи: 1, 7 – маломощные усилители, 2 – блок питания, 3 – передающий оптический модуль, 4 – драйвер питания передающего оптического модуля, 5 – оптический изолятор, 6 – приемный оптический модуль, 8, 9 – источники питания.

Оптический передающий модуль 3 состоит из: лазерного диода на основе InGaAsP/InP наногетероструктур и длиной волны генерации 1550 нм с оптоволоконным выводом излучения; электрооптического модулятора Маха–Цендера на основе LiNbO₃; согласующего СВЧ-устройства; платы управления и стабилизации рабочих точек лазерного диода и электрооптического модулятора. В его состав также входит входной коаксиальный СВЧ-разъем и выходной оптический разъем. Приемный оптический модуль 6 состоит из: фотодиода на основе InGaAsP/InP с оптоволоконным вводом излучения; буферного GaAs усилитель мощности; согласующего СВЧ-устройства; усилителя мощности, обеспечивающего необходимый коэффициент передачи; выходного коаксиального СВЧ-разъема и входного оптического разъема. Так как оптическое волокно при прокладке его по кораблю имеет изгибы, то устанавливается оптический изолятор 5. Он исключает попадание отраженного на изгибах волокна оптического сигнала в передающий модуль 3. Оптический изолятор и приемный модуль соединены между собой волоконно-оптическим кабелем FC/APC-FC/APC длиной 100 м. Соединение модулей и оптического изолятора с оптоволоконном осуществляется с помощью специальных соединительных коннекторов, потери в каждом соединителе составляют около 0.1 дБ. Потери на оптическом изоляторе составляют не более 0.6 дБ.

3. Результаты экспериментальных исследований работы волоконно-оптической системы передачи СВЧ сигнала и их обсуждение

Одним из важнейших параметров любой разработанной конструкции ВОЛП для передачи СВЧ сигналов является её амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). На рис. 2 в качестве примера представлена АЧХ разработанной нами ВОЛП при различных температурах T , так как эксплуатация РЛС будет проходить в различных климатических условиях.

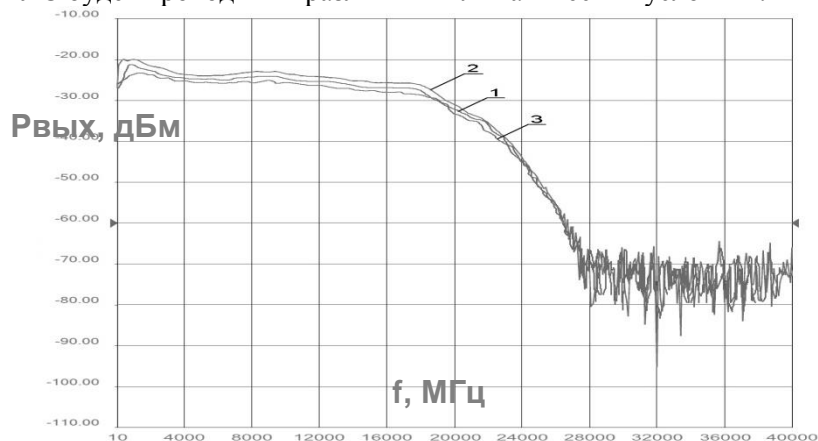


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптической линии передачи. Графикам 1, 2 и 3 соответствует температура в К: 231.2; 293.1; 333.4.

Анализ полученных результатов показал, что неравномерность АЧХ составляет порядка 8 дБ в диапазоне частот до 19 МГц для диапазона температур эксплуатации РЛС. Основным диапазоном для РЛС кругового обзора, для которых разрабатывается данная ВОЛП является X – диапазон. Полученные результат показывает, что разработанная ВОЛП позволяет передавать принимаемые отраженные сигналы от различных объектов с высокой степенью надежности. При разработке ВОЛП для РЛС морского базирования необходимо учитывать то, что с приемной антенны поступают на ВОЛП сигналы от различных целей с разной мощностью в силу особенностей эксплуатации РЛС. Поэтому в данной ситуации крайне важной характеристикой становится динамический диапазон. На рис. 3 в качестве примера представлены результаты исследования динамического диапазона ВОЛП от различных частот СВЧ сигнала при $T = 293.1$ К.

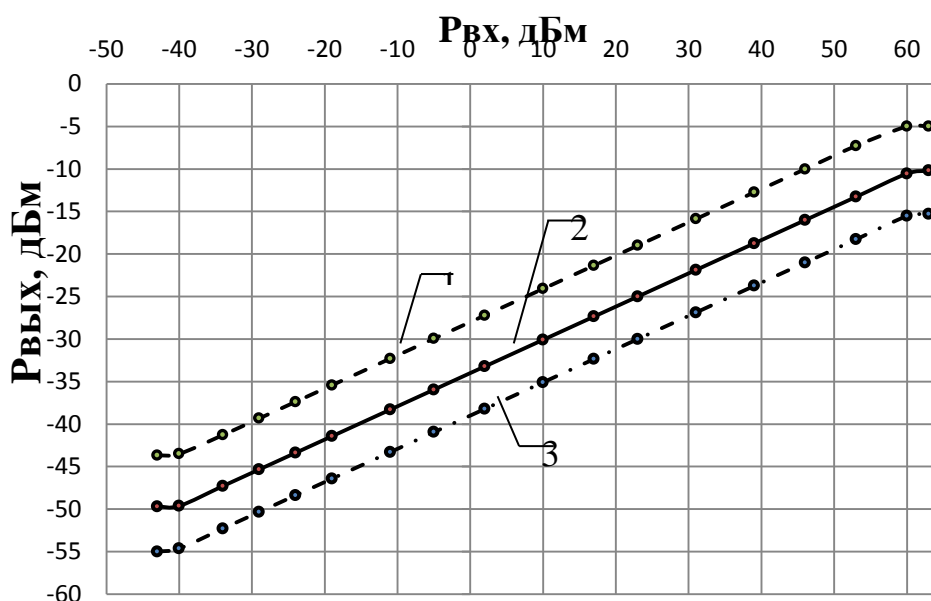


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности оптического сигнала СВЧ от входной. Графикам 1, 2 и 3 соответствует частоте входного сигнала в ГГц: 6; 12; 16.

Полученные результаты показывают, что динамический диапазон (ДД) превышает более 110 дБм. Полученного значения ДД достаточно для устойчивой передачи принимаемых отраженных сигналов от целей даже при изменениях температуры до критической. Проведенные эксперименты показали, что ДД при $T = 333.4$ К составляет менее 95 дБм, что несущественно ограничивает возможности эксплуатации РЛС.

Дополнительно нами был измерен собственный коэффициент шума ВОЛП, который составил менее 10 дБ. Коэффициент шума разработанной ВОЛП определялся методом Y-фактора на частоте 12 ГГц. Для измерений использовался анализатор спектра Agilent N9030A и источника шума Agilent N4002A SNS Series. Неравномерность коэффициента передачи K_n ВОЛП в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц составляет – 4 дБ. Это показывает устойчивость работы ВОЛП. Так как ВОЛП предназначена для морского базирования, то она будет находиться 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 оптического сигнала в волокне.

Излучение лазера, модулированное СВЧ сигналом на частоте 12 ГГц, проходило через волокно, 100 метровый участок которого помещается в климатическую камеру типа «Мини Сабзеро» МС-71. Температура в камере изменялась от комнатной до 333 К примерно за 4 часа в один

день и от комнатной температуры до 223 К в другой день. Температура климатической камеры измерялась по датчику. Одновременно с измерением температуры измерялась фаза модуляции выходного сигнала с волокна и сравнивалась с фазой управляющего сигнала. Для измерений использовался анализатор цепей PNA-L N5230C. На рис. 4 в качестве примера представлена экспериментальная зависимость сдвига фазы модуляции света $\Delta\phi_m$ от температуры окружающей среды T .



Рисунок 4. Сдвиг фазы модуляции $\Delta\phi_m$ от температуры T .

Результаты исследований показали, что диапазон изменения сдвига фазы модуляции во всем интервале температур T , при которых происходит эксплуатация одномодового оптического волокна Corning SMF - 28e (экстремальные условия - T волокна ниже -50 °С для случая использования специальных защитных оболочек не рассматриваются), составляет порядка 6 градусов. температурная зависимость изменения фазы модуляции для волокна Corning SMF - 28e составляет около 6 градусов. При расстоянии оптического волокна 100 м влияние данного фазового набега при изменении температуры на частотные и амплитудные характеристики передаваемого оптического сигнала будет несущественным.

4. Заключение

Полученные результаты показывают, что разработанная новая конструкция ВОЛП для РЛС морского базирования работоспособна и может надежно передавать СВЧ сигналы, а предложенные при её изготовлении конструкторские решения и выбранная элементная база на основе проведенных исследований, обоснованы.

В случае использования ВОЛП на морских объектах, где происходит погружение приемно-передающей части РЛС под воду и создается повышенное заборное давление, в разработанную конструкцию ВОЛП будут внесены дополнительные изменения для обеспечения её устойчивой работы. Принцип передачи и формирования оптического сигнала при этом не изменится.

Необходимо отметить, что полученное значение ДД для ВОЛП сравнимо с ДД коаксиального кабеля (не более 115-120 дБм), отличаясь от него низкой дисперсионностью (увеличением потерь с ростом частоты передаваемого сигнала СВЧ). Коэффициент передачи ухудшается на 4 дБ, когда как в лучших марках зарубежного СВЧ кабеля SUCOFLEX 406 при длине 100 м в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц перепад в затухании составляет более 60 дБ. Для специализированных СВЧ кабелей с повышенной степенью экранирования это значение еще выше, в некоторых случаях на порядок.

Это показывает, что использование разработанной нами конструкции ВОЛП, кроме повышения степени защиты от помех, снижения массогабаритных размеров, улучшения возможностей монтажа, позволяет также повысить характеристики устройства передачи сигнала СВЧ в РЛС.

5. Литература

- [1] Волобоев, В.П. Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях / В.П. Волобоев, В.П. Клименко, В.Д. Лосев // Математическое машиностроение и системы. – 2005. – № 4. – С. 131-142.
- [2] Мельников, Ю.П. Особенности оценки методики применения переполненных сигналов «посторонних» РЛС для скрытного определения координат кораблей и летательных аппаратов / Ю. П. Мельников // Информационно-измерительные системы. – 2015. – № 4. – С. 108-113.
- [3] Tapley, B.D. Statistical orbit determination / B.D. Tapley, B.E. Schutz, G.H. Born // Elsevier Academic Press. – 2013. – 547 p.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. – Санкт-Петербург, 2009.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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. – Vol. 60(11). – P. 1158-1162.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] Белкин, М.Е. Новое направление фотоники – сверхвысококачественная оптоэлектроника / М.Е. Белкин, А.С. Сигов // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – Т. 54, № 8. – С. 901-914.
- [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] 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.
- [19] 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.
- [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: Clarye International. – 2015. – 442 p.
- [22] 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.
- [23] Reinhold, N. *Essentials of Modern Optical Fiber* / N. Reinhold // Communication Amsterdam: Springer. – 2016. – 346 p.
- [24] Nepomnyashchaya, E.K. Combination of laser correlation and dielectric spectroscopy in albumin investigations / E.K. Nepomnyashchaya, A.V. Cheremiskina, E.N. Velichko, E.T. Aksenov, E.T. Bogomaz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 643(1). – P. 012018.
- [25] 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.
- [26] 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.

Features of the transmission of microwave signals at offshore facilities

G.A. Pchelkin^{1,2}, V.B. Fadeenko^{1,2}, V.V. Davydov²

¹Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Politehnicheskaya street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

²Stock Company «Concern «Granit-Electron», Federal Research and Production Centre, Gospitalnaya street 3, Saint Petersburg, Russia, 191014

Abstract. The purpose of the article is to consider the use of fiber-optic communication lines for the transmission of microwave signals at offshore facilities. The features of constructing a scheme for transmitting a microwave signal from a passive antenna over a fiber-optic communication line are considered. A new design solution has been proposed to optimize the design of fiber-optic communication lines.