

# Волоконно-оптическая система передачи информации для схемы компенсации помех в малогабаритной активной фазированной антенной решетке

А.В. Мороз<sup>1,2</sup>, В.В. Давыдов<sup>1,3</sup>, Р.В. Давыдов<sup>1</sup>, К.Ю. Маланин<sup>2</sup>, В.Д. Купцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

<sup>2</sup>АО «Заслон», Коли Томчака 9, Санкт-Петербург, Россия, 196084

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Институт 5, Большие Вяземы, Россия, 143050

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние активных и пассивных помех на работу радиолокационной станции X диапазона. Обоснована необходимость использования блока компенсации помех в радиолокационной станции с малогабаритной активной фазированной антенной решеткой. Для изготовленного ранее нами нового блока компенсации помех на основе рупорных антенн разработана волоконно-оптическая система передачи информации. Представлены результаты экспериментальных исследований её работы. Показано преимущество её использование в радиолокационной станции по сравнению с коаксиальным кабелем.

## 1. Введение

Постоянное введение в эксплуатацию новых различных станций, а также увеличение количества активных объектов, которым необходим обмен информацией и другие факторы приводят к увеличению числа излучаемых и отраженных сигналов [6, 15]. Это еще больше увеличивает загруженности частотных диапазонов работы радиолокационных станций (РЛС), а так же создает дополнительные помехи различного рода [1, 2, 6].

В настоящее время сильно перегруженным оказалась полоса частот от 8 до 12 ГГц (X диапазон) [7-12]. Поэтому модернизация эксплуатируемых и разработка новых устройств защиты радиолокационных станций от помех являются актуальными задачами. В такой ситуации наиболее уязвимыми оказались малогабаритные РЛС морского и воздушного базирования. Эти станции эксплуатируются в сложных условиях. Их антенные системы имеют ограничения по размеру и весу, а приемные тракты более чувствительны к воздействиям, чем тракты РЛС наземного базирования. Работе этих станций активно противодействуют.

Наиболее сложной является защита от активной помехи, которая передается на частоте РЛС или близкой к ней [3, 10, 11]. Постановщик помех пытается настроится на эту частоту. В результате такого воздействия на индикаторах РЛС создается шумовой фон, в котором исчезает полезный сигнал и появляются ложные отметки целей. Сопровождение целей становится невозможным. Так как помехи вызывают перегрузку устройств автоматической обработки данных, срыв автоматического сопровождения объектов, внести большие ошибки в определение местоположения и параметров движения объектов.

Радиолокационным станциям с активными фазированными антенными решетками (АФАР), работающим в режиме обзора при воздействии данной помехи в устройствах обработки происходит «подавление» полезного сигнала, что затрудняет оператору обнаружение цели, а в автоматизированных системах нарушается работа вычислительных средств [5, 6, 18-20, 23, 24]. Использование разработанной нами компенсационной антенны позволяет осуществить защиту устройства обработки сигнала РЛС от активной и других помех. При эксплуатации данного блока возник ряд проблем, связанных с наводками на соединительные элементы коаксиальных кабелей и т.д. Информация от рупорных антенн компенсационного блока передается в устройства обработки через зоны с повышенной электромагнитной нагрузкой и сигналами СВЧ. Это приводит к сбою в работе компенсатора помех. Одно из возможных решений этой проблемы с использованием волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) представлено в нашей работе.

## **2. Особенности передачи СВЧ сигналов и лабораторный макет волоконно-оптической системы передачи**

В работах [4, 13- 17, 21, 22] подробно рассмотрена структура и основные элементы волокон для передачи СВЧ сигналов в различных типах РЛС. Анализ полученных в них результатов показал, что наиболее сложным является термостабилизация лазерного передающего модуля при размещении его в сложных условиях, например, на подвижном объекте с малогабаритной АФАР.

Проведенные нами эксперименты позволили установить особенность использования режима термостабилизации при передаче СВЧ сигнала по ВОСП для случая размещения лазера и электрооптического модулятора в одном экранированном корпусе. При длительной работе источник лазерного излучения нагревается. Изменяется также температура в экранированном корпусе и рабочая точка электрооптического модулятора. Необходимо, используя петлю обратной связи, подстроить рабочую точку модулятора без термостабилизации температуры лазера. Если длина волны лазерного излучения изменится от температуры, то это не повлияет на результат передачи СВЧ сигнала по ВОСП. Расстояние передачи оптического сигнала по ВОСП на подвижном объекте с РЛС, в которых используются АФАР, менее 100 м. За такое время передачи дисперсия в передаваемом оптическом сигнале сформироваться не успеет. Это является одной из особенностей передачи СВЧ сигнала.

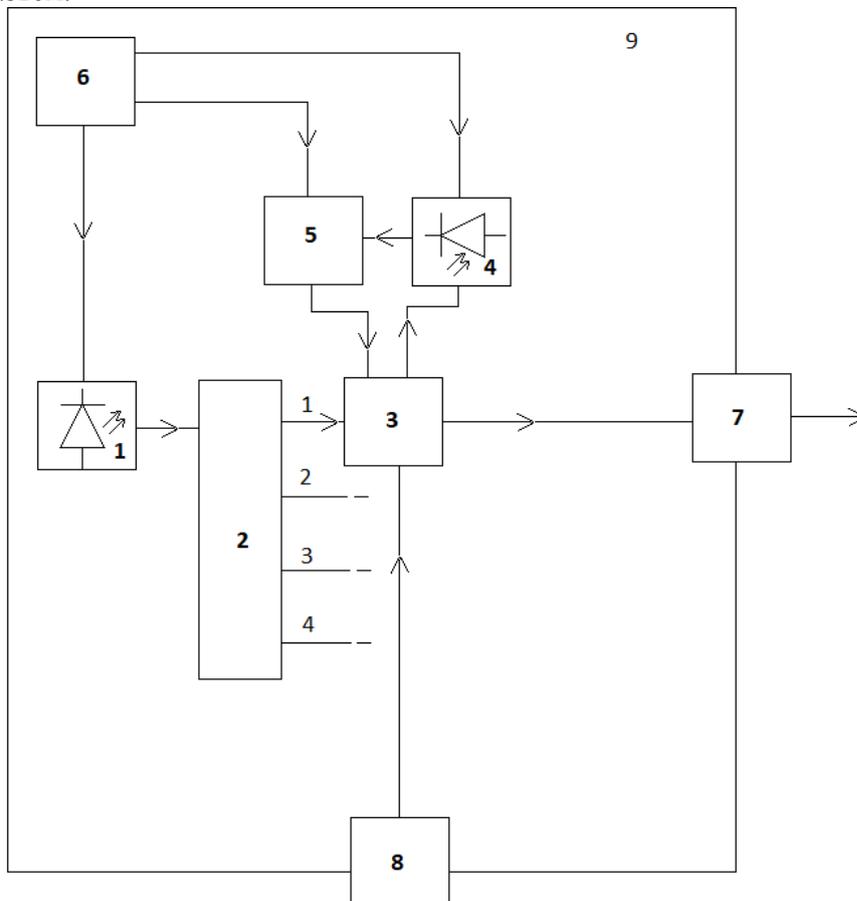
Другой особенностью является то, что в разработанном блоке компенсации используются четыре рупорные антенны. Иногда необходимо использовать восемь. Для передачи сигналов СВЧ от них потребуется четыре или восемь источников лазерного излучения. Количество тепла может увеличиться, что усложняет подстройку рабочей точки электрооптического модулятора. Кроме того, существуют ограничения по размещению элементов.

Поэтому нами было предложено использовать один источник лазерного излучения. Его излучение через оптический делитель подавать на электрооптические модуляторы. Так как затухание в оптическом волокне на 100 м менее 0.05 дБ, без существенного ухудшения отношения сигнал/шум разделить лазерное излучения, например, на 4, 8 или 12 каналов при мощности в 2 мВт.

С учетом этих особенностей нами была разработана новая конструкция передающего модуля для ВОСП, который размещается в непосредственной близости к рупорным антеннам. Его структурная схема представлена на рисунке 1.

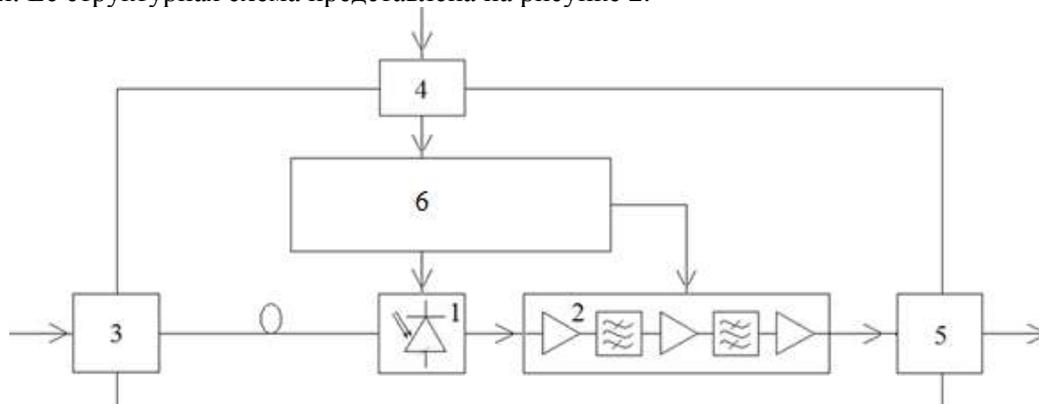
Передающий модуль состоит из лазера с оптоволоконным выводом на основе гетероструктуры InGaAsP/InP [20-22]. Излучение через оптический делитель подается на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера. Туда же поступает сигнал СВЧ с рупорной антенны. Эффективность модуляции электрооптического модулятора Маха-Цендера зависит от напряжения смещения, которое изменяется при изменении температуры  $T$ . При передаче СВЧ сигнала в данных условиях крайне важно стабилизировать положение рабочей точки модулятора. В разработанной нами конструкции для решения этой задачи используется фотодиод с обратной связью. Обратная связь реализована за счет подачи на его вход части выходного оптического излучения с выхода модулятора. По уровню сигнала на фотодиоде

электронная схема управления подстраивает напряжение смещения. Выходной сигнал подается на оптический разъем.



**Рисунок 1.** Структурная схема передающего модуля: 1 – лазер; 2 – оптический делитель; 3 – электрооптический модулятор Маха-Цендера; 4 – фотодиод, обеспечивающий обратную связь; 5 – схема управления напряжением питания; 6 – многофункциональный блок питания; 7 – оптический разъем; 8 – СВЧ-разъем; 9 – экранированный корпус.

Для улучшения характеристик ВОСП нами была разработана новая конструкция приемного модуля. Её структурная схема представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Структурная схема приемного модуля: 1 – p-i-n диод на основе InGaAs/InP; 2 – усилители мощности и полосовые фильтры; 3 – входной оптический разъем; 4 – разъем питания; 5 – выходной СВЧ-разъем; 6 – плата стабилизации напряжения смещения.

На вход приемного модуля по оптическому волокну поступает модулированный по интенсивности оптический сигнал от модулятора. Приемный модуль состоит из р–i–п фотодиодом на основе нанoeлектронной гетероструктуры InGaAs/InP, включенным в компланарную линию передачи, согласующую его с 50-омным коаксиальным СВЧ-разъемом на выходе. Для получения необходимого по мощности детектированного СВЧ-сигнала используется последовательность из электрических усилителей и СВЧ-фильтров. Для подавления помех на фотодиод подается напряжение смещения.

### 3. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Одним из важных параметров, который характеризует работу ВОСП, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). На рисунке 3 представлена АЧХ разработанной нами ВОСП в диапазоне частот 8 – 12 ГГц.

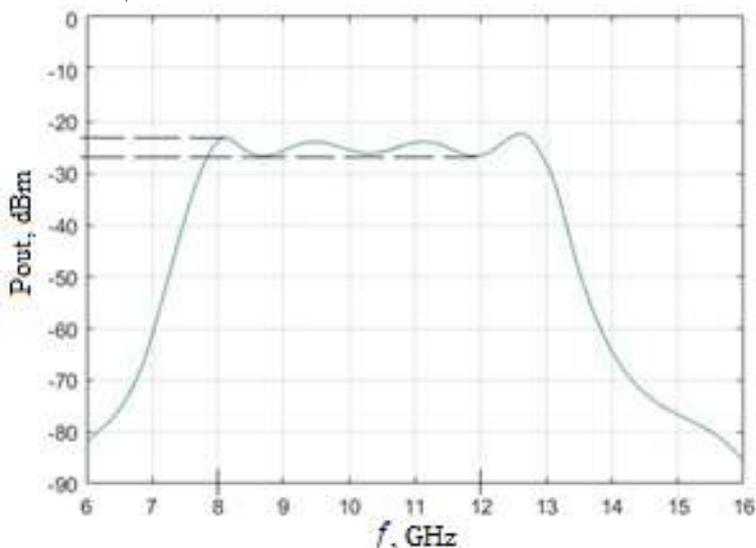


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика ВОСП.

Полученный результат показывает, что неравномерность АЧХ ВОСП в диапазоне частот (8 – 12 ГГц) составляет порядка 4 – 5 дБм. Фильтры, которые используются после фотоприемного устройства для формирования АЧХ не вносят существенных искажений в неравномерность характеристики. Это позволяет реализовать передачу СВЧ сигналов от рупорной антенны к устройствам обработки, расположенным в экранированном корпусе с системами защиты.

Другой важной характеристикой работы ВОСП является тангенциальная чувствительность  $G$  приемного тракта. При подключении к тракту разработанной нами ВОСП значение  $G$  существенно не изменилось и составляет величину порядка 78 дБм. На рисунке 4 представлена зависимость тангенциальной чувствительности  $G$  приемного тракта от частоты СВЧ сигнала.

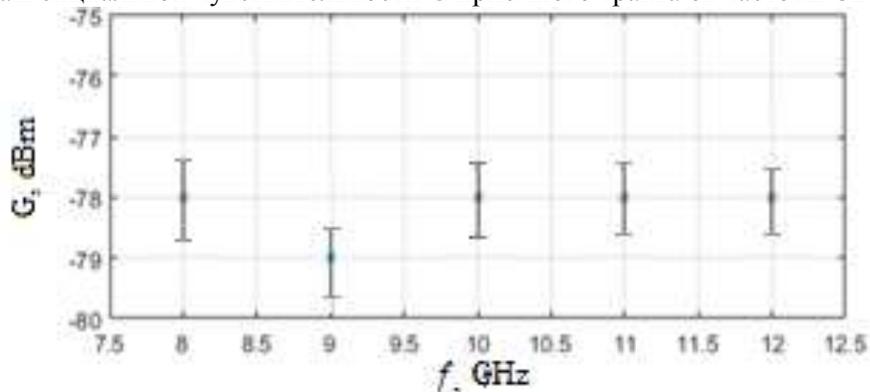
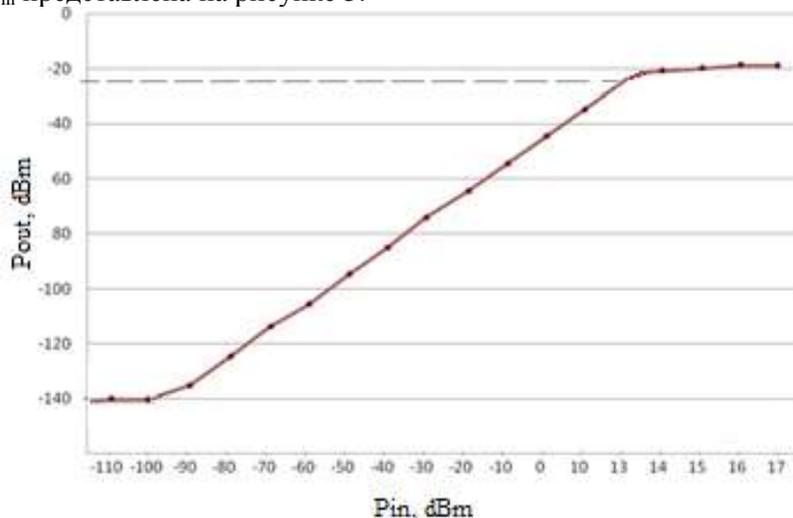


Рисунок 4. Зависимость тангенциальной чувствительности приемного тракта от частоты СВЧ-сигнала.

При небольших расстояниях передачи сигнала СВЧ можно исключить из конструкции приемной части антенны маломощный усилитель (МШУ). Проведенные эксперименты показали, что МШУ в условиях повышенного уровня электромагнитных помех может нести дополнительные искажения в передаваемый сигнал.

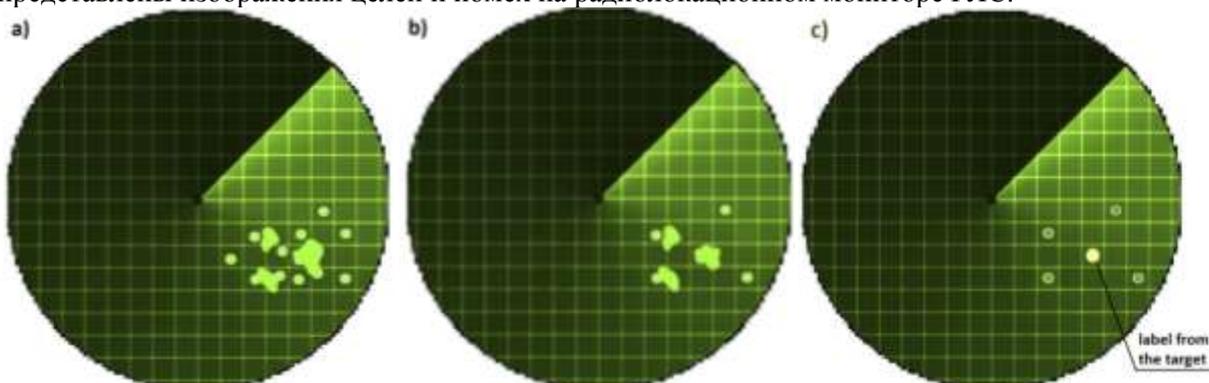
В ходе исследования разработанной конструкции ВОСП был определен её динамический диапазон. Экспериментальная зависимость мощности выходного сигнала  $P_{out}$  от мощности входного сигнала  $P_{in}$  представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Динамическая характеристика ВОСП.

Динамический диапазон устойчивой работы ВОСП составил порядка 112 дБм. Данное значение по линейности характеристики не хуже, чем у коаксиального кабеля. Необходимо отметить, что ВОСП обладает неоспоримым преимуществом перед коаксиальным кабелем (несущественное увеличение потерь с ростом частоты передаваемого сигнала СВЧ). Гибкость и компактность ВОСП сравнивать с кабелем не имеет смысла.

Разработанная нами ВОСП в составе блока компенсации помех была проверена на макете АФАР воздушного базирования в условиях полигона. На рисунке 6 в качестве примера представлены изображения целей и помех на радиолокационном мониторе РЛС.



**Рисунок 6 (а, б, в).** Изображения целей и помех на мониторе: (а) – без использования разработанного блока компенсации помех, (б) – с использованием в составе АФАР разработанного нами блока компенсации помех без ВОСП, (в) – с использованием разработанной ВОСП в блоке компенсации помех.

Проведенные эксперименты показали, что использование разработанной нами ВОСП в блоке компенсации помех позволяет компенсировать существенную часть активных и пассивных помех. Это позволяет получить на радиолокационном индикаторе четкое положение

цели (рисунок 6(с)). Полученное изображение позволяет идентифицировать цель, определить параметры её движения и осуществлять сопровождение.

#### 4. Заключение

Полученные результаты показали, что использование разработанной нами ВОСП в составе блока компенсации помех позволяет повысить эффективность компенсации помех в радиолокационной станции.

Кроме того, использование разработанной конструкции ВОСП позволяет при модернизации блока компенсации помех без внесения принципиальных изменений в конструкцию оптической схемы увеличить число оптических каналов до 8 или 12 с увеличением числа рупорных антенн до 8 или 12. Проведенные эксперименты показали, что увеличение числа рупорных антенн будет следующим этапом работы и дальнейших исследований. Это связано с тем, что если на основную антенну АФАР действует узкополосная помеха высокой мощности, то для её компенсации более эффективно использовать рупорные антенны с зоной ответственности менее 20 градусов. Использование коаксиальных кабелей в блоке компенсации создаст ряд неразрешимых проблем по сравнению с применением ВОСП.

Основным ограничением использования разработанных нами типов компенсационных антенн в АФАР воздушного базирования с ВОСП является наличие необходимого места для их установки.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-29-06034).

#### 6. 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 переотраженных сигналов «посторонних» РЛС для скрытного определения координат кораблей и летательных аппаратов // Информационно-измерительные системы. – 2015. – № 4. – С. 108-113.
- [3] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. – Vol. 10531 LNCS. – P. 227-232.
- [8] Davydov, R.V. Monitoring of flowing media state by refraction phenomenon / R.V. Davydov, V.I. Antonov, A.V. Moroz // Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. – 2018. – Vol. 8564378. – P. 236-239.

- [9] Davydov, V.V. Fiber-optics system for the radar station work control / V.V. Davydov, N.V. Sharova, E.V. Fedorova, V.A. Vologdin, A.Yu. Karseev // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2015. – Vol. 9247. – P. 712-721.
- [10] 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. – Vol. 11118 LNCS. – P. 509-515.
- [11] Fadeenko, V.B. New design of fiber-optic communication line for the transmission of microwave signals in the X-band / V.B. Fadeenko, V.A. Kuts, D.A. Vasiliev, V.V. Davydov // Journal Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135(1) – P. 012053.
- [12] 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. – Vol. 10531 LNCS. – P. 482-489.
- [13] Nepomnyashchay, E.K. Fiber – Optic Super – High – Frequency Signal Transmission System for Sea – Based Radar Station / V.V. Davydov, A.Yu. Karseev, E.K. Nepomnyashchay, A.A. Petrov, E.N. Velichko // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2014. – Vol. 8638 – P. 694-702.
- [14] 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. – Vol. 11118 LNCS. – P. 624-630.
- [15] Davydov, V.V. Features of transmission at analog intermediate frequency signals on fiber – optical communication lines in radar station / D.L. Filatov, A.A. Galichina, M.G. Vysoczky, T.R. Yalunina, V.V. Davydov, V.Yu. Rud' // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917(8). – P. 082005.
- [16] 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.
- [17] 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. – Vol. 10531 LNCS. – P. 177-183.
- [18] Rykin, E. V. The development of a new method for making justified decisions by municipal authorities in the management of territories on the basis of the results of the environmental express-control of the state of various media / E.V. Rykin, A.V. Moroz, K.J. Smirnov, V.V. Davydov, V.V. Yushkova // MATEC Web of Conference. – 2018. – Vol. 245. – P. 12002.
- [19] Давыдов, В.В. Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости / В.В. Давыдов, С.В. Кружалов, Н.М. Гребеникова, К.Я. Смирнов // Измерительная техника. – 2018 – Т. 4. – С. 33-39.
- [20] Nepomnyashchaya, E.K. Spectroscopic techniques to study the immune response in human saliva / E.K. Nepomnyashchaya, E.A. Savchenko, E.N. Velichko, E.T. Bogomaz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 956(1). – P. 012009.
- [21] 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. – Т. 1. – С. 24-30.
- [22] 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. – Vol. 9870 LNCS. – P. 670-679.
- [23] 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.
- [24] Андреев, В.А. Исследование характеристик полупроводникового оптического усилителя как многофункционального устройства волоконно-эфирной структуры / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, К.А. Волков, В.П. Кубанов, А.И. Тяжев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 844-849. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-844-849.

## Fiber-optic information transmission system for interference compensation circuitry in a small-sized active phased array antenna

A.V. Moroz<sup>1,2</sup>, V.V. Davydov<sup>1,3</sup>, R.V. Davydov<sup>1</sup>, K.Y. Malanin<sup>2</sup>, V.D. Kuptsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnic 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

<sup>2</sup>JSC Zaslou, Koli Tomchaka 9, Saint Petersburg, Russia, 196084

<sup>3</sup>All-Russian research Institute of Phytopathology, Institute 5, Bolshye Vyazemye, Russia, 143050

**Abstract.** The article considers the influence of active and passive interference on the operation of the X-band radar. The necessity of using an interference compensation unit in a radar station with a small-sized active phased antenna array is substantiated. For the previously produced new block of interference compensation based on horn antennas, a fiber-optic information transmission system has been developed. The results of experimental studies of her work are presented. The advantage of its use in a radar station in comparison with a coaxial cable is shown.