

Плёнкин Антон Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: pljonkin@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 89054592158; кафедра ИБТКС; к.т.н.; старший преподаватель.

Гупта Бридж Бхошан – Департамент компьютерной инженерии; Национальный институт технологии, Курукшетра; e-mail: gupta.brij@gmail.com; Курукшетра-136119, Хараяна, Индия; тел.: +919896004357; ассистент профессора.

Pljonkin Anton Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: pljonkin@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79054592158; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

Gupta Brij Bhooshan – Department of Computer Engineering; National Institute of Technology, Kurukshetra; e-mail: gupta.brij@gmail.com; Kurukshetra-136119, Haryana, India; phone: +919896004357; assistant professor.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2017-5-115-122

А.В. Помазанов, С.С. Шибяев, Д.П. Волик

МАКЕТ НАЗЕМНОГО ТЕРМИНАЛА СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Спутниковые системы связи являются неотъемлемой частью современных информационных систем, включающих в себя как низкоскоростные (телефонные и пейджинговые системы и т.п.), так и высокоскоростные (интернет, телевидение высокого разрешения и т.п.) сервисы. В результате всё возрастающих потребностей в качестве, скоростях и объёмах передаваемой информации спутниковыми системами связи освоена большая часть СВЧ диапазона. Данные системы состоят из группировки спутников на околоземной орбите и наземных терминалов. Одной из задач, решаемой при разработке, является анализ устойчивости последних к различного рода электромагнитным воздействиям. Для решения этой задачи сотрудниками лаборатории «Нанопластики и оптоэлектроники» Южного федерального университета разработан и исследован макет наземного терминала системы космической связи с использованием технологии передачи радиосигналов по оптическим волокнам. Разработанный макет состоит из двух блоков, базовой станции и передающего устройства, соединённых одномодовым волоконнооптическим кабелем, между которыми осуществляется передача СВЧ сигналов в диапазоне частот 1500–2500 МГц. Использование волоконнооптической линии связи для соединения модулей системы обусловлена ее высокой помехозащищённостью. Информация передается в виде двухуровневой фазокодовой манипуляции, предварительно дифференциально кодируемой. Передающее устройство содержит конечные каскады усиления и элементы защиты от мощных помех. Контроль рабочих режимов и установка параметров системы осуществляется посредством персонального компьютера (ПК), подключенного к базовой станции. Приводятся результаты экспериментального исследования чувствительности макета, показавшие пригодность устройства для проведения натурных испытаний.

Радиооптическая линия; радиолокация; космическая связь; фазовая модуляция; квадратурный детектор.

A.V. Pomazanov, S.S. Shibaev, D.P. Volik

PROTOTYPE OF SURFACE STATION OF SPACE COMMUNICATION SYSTEM

Space communication systems are the integral part of modern informational systems, including low rate (telephone and paging) as well as high rate (internet, high resolution TV) services. As a result of omni-increasing needs in quality, rates and capacity of transmitted information, space systems draw a large part of SHF range. These systems consist of shuttle group near the Earth orbit and surface stations. One of the tasks being solved at development is the

analysis of stability of last-named to electromagnetic influences of different kinds. For solving this task the collaborators of "Nanophotonics and optoelectronics" laboratory of Southern federal university have developed and examined the prototype of surface station of space communication system using "radio over fiber" technology. Designed prototype consists of two blocks – base station and transmitting device, connected to each other with singlemode fiber optic cable. Between them occurs the SHF signals transmission in the range of 1500–2500 MHz. The use of fiberoptic link for modules connection is caused with its high noise immunity. The information is transmitted in the form of two level phase code manipulation, preliminarily differentially coded. Transmitting device contains terminal cascades of amplification and element of power interferences protection. Working modes control and system parameters settings are implemented with means of personal computer, linked to base station. Given are the results of prototype sensitivity experimental examination, which have shown the device compatibility for holding full-sized testing.

Radiooptic link; radiolocation; space communication; phase modulation; quadrature detector.

Введение. Наземные терминалы космической связи представляют собой сложные радиотехнические системы [1], состоящие из многоэлементных антенных систем с электрическим управлением диаграммой направленности – фазированных антенных решеток (ФАР), передающих и приемных устройств. ФАР являются наиболее эффективными антенными системами, которые совмещают в себе быстрый обзор пространства, многофункциональность и предварительную обработку СВЧ сигналов. Требования к параметрам антенной системы объясняются ее назначением, условиями размещения, режимами работы, допустимыми затратами.

Современные системы спутниковой связи осуществляют обмен информацией в широком спектральном диапазоне от 300 МГц до 70 ГГц [2–4], который разделён на поддиапазоны, каждый из которых служит для передачи разного типа данных и с определенной скоростью. Низшие частотные диапазоны L (0,5÷1,5 ГГц) и S (1,5÷2,5 ГГц) используются в подвижных системах связи для телефонии, пейджинговой связи и т.п. Два средних диапазона C (4÷8 ГГц) и Ku (12÷18 ГГц) поддерживают сервис телефонии, телевидения, VSAT и интернет в фиксированных системах связи. Частоты от 20 до 40 ГГц (диапазоны Ka, Q и V) используются в широкоэмитательных высокоскоростных системах для передачи аудио-, видеографических данных и интернета и т.п. При построении наземных терминалов спутниковой связи используются похожие структурные схемы не зависимо от частотного диапазона, различие состоит лишь в параметрах используемой элементной базы, таких как частотный диапазон, быстродействие, уровень нелинейных искажений, и т.п.

Среди существующих типов модуляции наибольшее применение в спутниковых системах связи находят методы фазовой манипуляции (ФМ), которые являются частным случаем фазовой модуляции, отличающиеся тем, что изменение фазы происходит скачкообразно. Основными достоинствами ФМ являются повышенная помехоустойчивость и малые энергетические потери при модуляции [5].

В зависимости от величины минимального перескока фазы ФМ бывает бинарная (BPSK), квадратурная (QPSK), 8-PSK и т.д. Увеличение разрядности фазовой манипуляции приводит к росту скорости передачи через выбранный канал связи, но при этом растёт вероятность ошибки на бит передаваемой информации (BER), поэтому для передачи сервисных сигналов, в которых не содержатся большие объёмы информации, в спутниковых системах связи используются радиосигналы L и S диапазонов с использованием бинарной ФМ при скоростях не выше 100 кбит/с [1].

Разработка современных наземных терминалов космической связи (НТКС) является трудоемкой и дорогостоящей задачей. Основными элементами, используемыми в НТКС, являются источник СВЧ сигнала, усилители, фазовращатели, коммутаторы, элементы защиты приемного и передающего тракта [2], обязательным в современных антенных системах является радиооптическая линия передачи, обеспечивающая передачу цифровых сигналов [6–9], а также плата управления элементами НТКС.

Исследование основных технических характеристик НТКС, таких как помехоустойчивость, скорость передачи информации, вероятность правильного приема и ошибки при передаче и других, возможно на сравнительно более дешевом оборудовании – макете наземных терминалов космической связи.

Целью статьи является описание макета наземных терминалов космической связи и исследование его характеристик. Макет реализуется на современной элементной базе преимущественно иностранного производства [10–15].

Описание макета. В задачи макета входят передача и прием фазомодулированных радиосигналов в диапазоне частот 1500–2500 МГц. Обработка принятых сигналов обеспечивает когерентное квадратурное детектирование сигналов и цифровое декодирование. Макет должен обеспечивать наблюдение аналоговых сигналов в основных узлах структурной схемы макета, а также измерения результатов детектирования в цифровом виде. Управление режимами работы макета и наблюдение за результатами измеренных сигналов должно осуществляться с помощью персонального компьютера (ПК).

Обычно в НТКС передатчик и приёмник выполняются в одном модуле [1, 6] а управление осуществляется по волоконно-оптической линии длиной 100 ÷ 600 м, но для проведения исследований на помехоустойчивость необходимы передатчик и приёмник, которые обменивались бы сигналами с заранее известными параметрами. Схема разработанного макета показана на рис. 1.

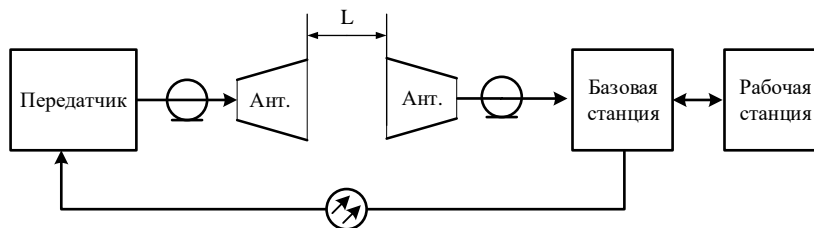


Рис. 1. Упрощенная схема макета

Макет состоит из передающего устройства (ПУ), излучающему радиосигналы посредством передающей антенны (Ант.), базовой станции (БС), имеющей приемный канал, на который сигналы подводятся с приемной антенны (Ант.). При выполнении испытаний расстояние между передающей и приемными антеннами может быть в пределах десяти и более метров. Так как основная функциональная нагрузка ложится на БС, то решено источник сигнала расположить в ней и передавать его в ПУ посредством устойчивой к электромагнитным воздействиям волоконно-оптической линии (ВОЛ).

Рабочая станция (РС) управляет параметрами передаваемых радиосигналов макета, производит окончательную обработку и отображение измеряемых величин, представляет собой ПК (ноутбук).

В качестве передающей и приемной антенн макета было решено использовать идентичные рупорные антенны, обеспечивающие максимальную направленность и минимальные перекрестные помехи П6-123 [10].

В задачи ПУ (рис.2 и рис.3) входят: прием фазомодулированных радиосигналов по ВОЛ, их усиление и трансляция к передающей антенне.

ПУ обладает следующими основными параметрами:

1. Диапазон частот: (1500÷2500) МГц;
2. Выходная мощность: 27,5± 1,5 дБм;
3. Питающее напряжение: ~ 220 В.

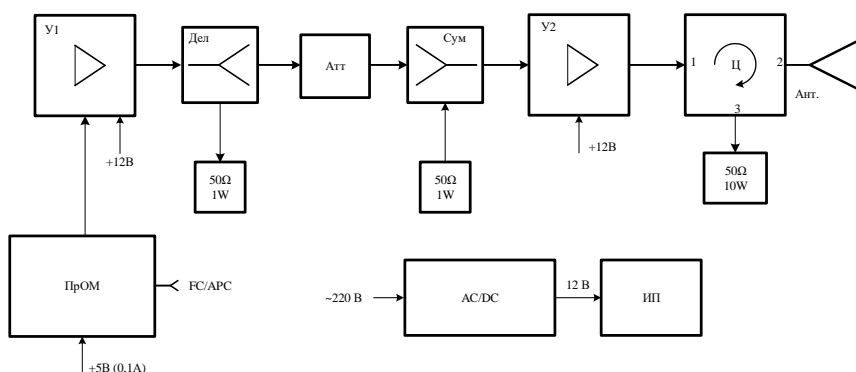


Рис. 2. Функциональная схема передающего устройства

Сигнал подводится к передатчику по радиооптической линии через FC/APC адаптер и поступает на вход приемного оптического модуля (ПрОМ), с СВЧ выхода которого сигнал поступает на предварительный усилитель (У1) и далее на делитель мощности (Дел). Один из выходов делителя соединен с передней панелью ПУ для контроля. Второй выход через развязывающий аттенуатор (Атт) и сумматор (Сум) соединен с оконечным усилителем У2, сумматор в случае надобности использовать в качестве входного сигнала не оптический, а СВЧ сигнал. Коэффициент передачи оконечного усилителя в полосе рабочих частот макета в линейном режиме составляет величину 38 дБ. Для защиты выходного усилителя сигнал с его выхода подается на антенну через циркулятор (Ц), ко второму выходу которого подключена антенна, а к третьему – 10 ваттная согласованная нагрузка, предназначенная для рассеяния мощного помехового излучения, воздействующего на выход ПУ.

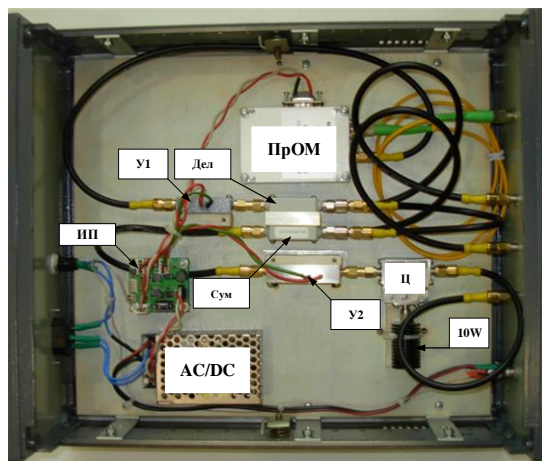


Рис. 3. Внутреннее расположение элементов передатчика

Базовая станция (БС) макета НТКС узлом макета и решает следующие задачи:

1. Формирование ФКМ радиосигналов в диапазоне частот 1500–2500 МГц (с шагом перестройки 1 МГц) и скоростей от 10–200 кбит/с.
2. Трансляция сформированных сигналов передатчику по ВОЛ.
3. Прием радиосигналов, переданных ПУ.
4. Демодуляция и декодирование принятых сигналов.
5. Обмен цифровыми данными с рабочей станцией.

Функциональная схема БС приведена на рис. 4, а фотография одной из ее внутренних частей – на рис. 5. Источником гармонического сигнала является синтезатор G, с одного выхода которого СВЧ сигнал подается на фазовый модулятор ФМ.

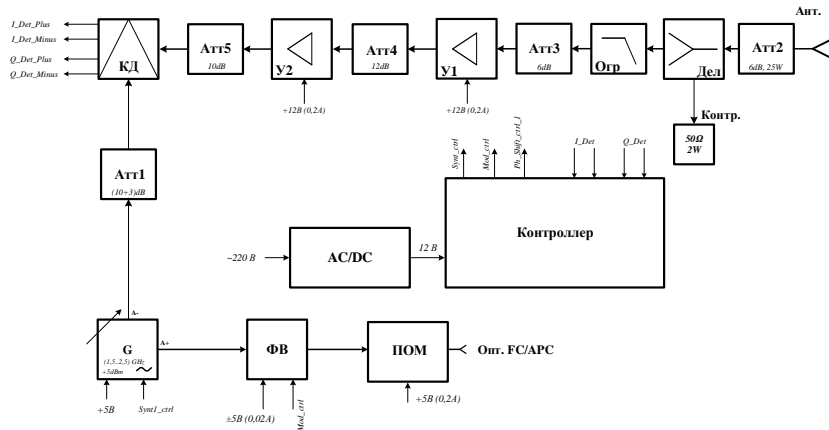


Рис. 4. Функциональная схема базовой станции

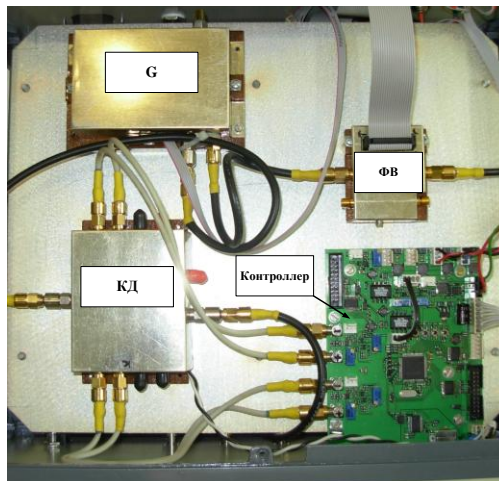


Рис. 5. Элементы базовой станции

К выходу модулятора подключен передающий оптический модуль (ПОМ), предназначенный для трансляции радиосигнала в ПУ на оптической несущей через расположенный на передней панели оптический адаптер FC/APC. Гармонический сигнал со второго выхода G подается через аттенюатор (Атт1) на гетеродинный вход квадратурного демодулятора (КД).

С антенны, принятый от ПУ сигнал поступает через аттенюатор (Атт2) и делитель (Дел) на контрольный выход и в основной приемный тракт, составленный из двух каскадов усиления (У1 и У2) и ряда согласующих аттенюаторов (Атт3-Атт5). Атт2, Дел и ограничитель (Огр) служат для защиты от мощной помехи. Коэффициент передачи приёмной СВЧ части БС в полосе рабочих частот составляет $27,75 \pm 1,25$ дБ. С выхода приемного тракта сигнал поступает на вход КД. Для демодуляции ФКМ сигналов в данном макете используется квадратурный детектор AD8347 фирмы «Analog devices» [14, 17].

«Мозгом» БС является контроллер. В его функции входят:

- ◆ управление частотой синтезатора;
- ◆ управление параметрами фазовой модуляции;
- ◆ предварительная обработка сигналов от КД;
- ◆ сопряжение макета с рабочей станцией (РС).

На плате контроллера (см. рис.5) расположены элементы приема и предварительной обработки результатов детектирования, элементы управления синтезатором, ФМ, микроконтроллер, элементы сопряжения БС с РС и вторичные источники питания.

Экспериментальные исследование макета. В качестве основных характеристик измерялась частотная зависимость чувствительности приемника – минимального уровня мощности входного радиосигнала, при котором макетом осуществлялся прием цифровых сигналов без потери информации. Измерения проводились в полосе рабочих частот макета с шагом 100 МГц. Сформированный в базовой станции (БС) радиосигнал передавался по оптическому кабелю передающему устройству (ПУ). Антенны ПУ и БС заменялись коаксиальным кабелем и регулируемым аттенуатором на выходе которого устанавливался делитель мощности, одно из плеч которого соединялось с антенным входом БС, а к другому подключался анализатор спектра (АС), фиксирующий величину мощности радиосигнала. Управление макетом выполнялось с помощью рабочей станции (РС), которая подключалась к USB-разъему БС, на ней же фиксировалась статистика принятых цифровых сигналов.

Чувствительность измерялась по критерию безошибочного приема ста переданных контрольных байтов макета. Измерения повторялись для трех значений байтов – «1», «85» и «255». Результаты измерений приведены на рис. 6.

Из полученных данных следует, что чувствительность макета находится на уровне порядка минус 90 дБВт.

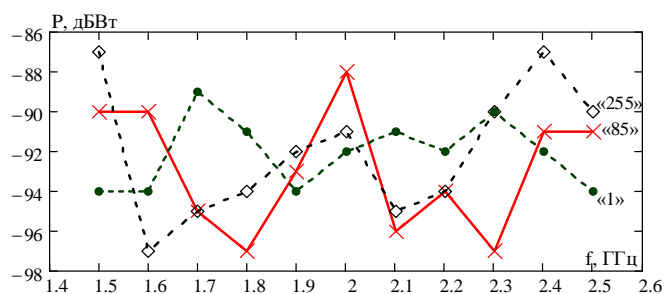


Рис. 6. Частотные зависимости чувствительности макета

Заключение. Разработанный макет способен выполнять задачу имитации работы наземного терминала космической связи, может служить стендом для испытаний подобных систем в условиях электромагнитных воздействий, а также для отработки аппаратурного и алгоритмического обеспечений. При необходимости миниатюризации возможна реализация передатчика и приемника полностью на отдельных платах.

Для обеспечения калибровки макета в частотном диапазоне, он может быть связан с внешним быстродействующим частотоопределяющим устройством, например, на основе акустооптических измерителей [18–21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ливанов И.* Терминалы спутниковой связи миллиметрового диапазона ВВС США // *Зарубежное военное обозрение*. – 2013. – № 12. – С. 63-68.
2. *Михайлов В.Ф., Мошкин В.И., Брагин И.В.* Космические системы связи: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2006. – 174 с.
3. *Дятлов А.П.* Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учеб. пособие. Ч. 1. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 95 с.
4. *Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е.* Системы связи: учеб. пособие для студентов (курсантов) вузов / под общ. ред. Макаренко С.И. – Воронеж: издание ВАИУ, 2011. – 285 с.
5. *Васильев К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г.* Теория электрической связи: учеб. пособие / под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УЛГТУ, 2008. – 452 с.
6. *Свистов П.* Состояние и перспективы развития американских военных систем спутниковой связи // *Зарубежное военное обозрение*. – 2013. – № 7. – С. 8-19.
7. *Денисюк И. Ю., Аснис Л.Н., Фокина М.И., Собошук Н.О.* Применение элементов фотоники в специальной аппаратуре. – СПб.: Изд-во СПбГУИТМО, 2008. – 122 с.
8. *Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов / под ред. Воскресенского Д.И.* – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника. – 2012. – 744 с.
9. *Цуканов В.А., Яковлев М.Я.* Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.
10. www.skard.ru.
11. www.rfoptic.com.
12. www.fairviewmicrowave.com.
13. www.micran.ru.
14. www.analog.com.
15. www.macom.com.
16. www.jfwindustries.com.
17. *Помазанов А.В., Шибяев С.С., Волик Д.П.* Особенности измерения фазы радиосигнала посредством квадратурного детектора AD8347 // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2016. – № 9 (182). – С. 93-102.
18. *Шибяев С.С., Помазанов А.В., Роздобудько В.В.* Акустооптические измерители параметров радиосигналов. Монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 233 с.
19. *Волик Д.П., Шибяев С.С., Помазанов А.В.* Принципы построения и реализация акустооптических измерителей параметров радиосигналов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 11 (148). – С. 175-182.
20. *Шибяев С.С., Новиков В.М., Волик Д.П., Роздобудько В.В.* Малогабаритный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // *Вопросы специальной радиоэлектроники. Общие вопросы радиоэлектроники*. – М.-Таганрог: ТНИИС, 2009. – Вып. 1. – С. 83-90.
21. *Шибяев С.С., Волик Д.П., Роздобудько В.В.* Акустооптический приемник-частотомер на основе дефлектора с противофазным возбуждением ультразвука // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2008. – Вып. 4. – С. 32-38.

REFERENCES

1. *Livanov I.* Terminaly sputnikovoy svyazi millimetrovogo diapazona VVS SShA [Satellite terminals millimeter range U.S. air force], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2013, No. 12, pp. 63-68.
2. *Mikhaylov V.F., Moshkin V.I., Bragin I.V.* Kosmicheskie sistemy svyazi: ucheb. Posobie [Space communications systems: textbook]. Saint-Petersburg: GUAP, 2006 174 p.
3. *Dyatlov A.P.* Sistemy sputnikovoy svyazi s podvizhnymi ob"ektami: ucheb. posobie [Satellite communication system with mobile objects: a tutorial]. Part 1. Taganrog: TRTU, 2004, 95 p.
4. *Makarenko S.I., Sapozhnikov V.I., Zakharenko G.I., Fedoseev V.E.* Sistemy svyazi: ucheb. posobie dlya studentov (kursantov) vuzov [Communication systems: textbook for students (cadets) of higher education institutions], under the general editorship of Makarenko S.I. Voronezh: izdanie VAIU, 2011. 285 p.
5. *Vasil'ev K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G.* Teoriya elektricheskoy svyazi: ucheb. posobie [Theory of telecommunications: the textbook], under the general editorship of Vasil'eva K.K. Ulyanovsk: UIGTU, 2008, 452 p.

6. *Svitov R.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya amerikanskikh voennykh sistem sputnikovoy svyazi [Status and prospects of the development of U.S. military satellite communication systems], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2013, No. 7, pp. 8-19.
7. *Denisyuk I. Yu., Asnis L.N., Fokina M.I., Sobeshchuk N.O.* Primenenie elementov fotoniki v spetsial'noy apparature [Use of photonics in special equipment]. – Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGUITMO, 2008, 122 p.
8. *Ustroystva SVCh i anteny.* Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok: ucheb. posobie dlya vuzov [Microwave device and antenna. Design of phased array antennas: proc. the allowance for high schools], under the ed. Voskresenskogo D.I. 4th ed. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 744 p.
9. *Tsukanov V.A., Yakovlev M.Ya.* Volokonno-opticheskaya tekhnika. Prakticheskoe rukovodstvo [Fiber-optic technology. A practical guide]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2014, 304 p.
10. Available at: www.skard.ru.
11. Available at: www.rfoptic.com.
12. Available at: www.fairviewmicrowave.com.
13. Available at: www.micran.ru.
14. Available at: www.analog.com.
15. Available at: www.macom.com.
16. Available at: www.jfwindustries.com.
17. *Pomazanov A.V., Shibaev S.S., Volik D.P.* Osobennosti izmereniya fazy radiosignala posredstvom kvadrurnogo detektora AD8347 [The features of radiosignal phase measurement by means of quadrature demodulator AD8347], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 9 (182), pp. 93-102.
18. *Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Rozdobud'ko V.V.* Akustoopticheskie izmeriteli parametrov radiosignalov: monografiya [Acousto-optical measuring parameters of radio signals: monograph], Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 233 p.
19. *Volik D.P., Shibaev S.S., Pomazanov A.V.* Printsipy postroeniya i realizatsiya akustoopticheskikh izmeriteley parametrov radiosignalov [Radiosignals parameters acoustooptic measurers implementation principles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 175-182.
20. *Shibaev S.S., Novikov V.M., Volik D.P., Rozdobud'ko V.V.* Malogabaritnyy akustoopticheskiy izmeritel' parametrov radiosignalov [Compact acousto-optic measuring parameters of radio signals], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Obshchie voprosy radioelektroniki* [Questions of special radio electronics. General questions of radio electronics]. Moscow-Taganrog: TNIS, 2009, Issue 1, pp. 83-90.
21. *Shibaev S.S., Volik D.P., Rozdobud'ko V.V.* Akustoopticheskiy priemnik-chastotomer na osnove deflektora s protivofaznym vzbuzhdeniem ul'trazvuka [Acoustooptic receiver-cymometer on the base of deflector with anti-phase excitation of ultrasound], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestia vuzov Rossii. Electronics], 2008, Issue 4, pp. 32-38.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Помазанов Александр Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: pav_tsure@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634361573; кафедра информационно-безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Шибяев Станислав Сергеевич – e-mail: sheab@list.ru; лаборатория нанофотоники и оптоэлектроники; с.н.с.; к.т.н.

Волк Денис Петрович – e-mail: DVLbest@mail.ru; кафедра радиотехнической электроники; ассистент.

Pomazanov Alexander Vasilievich – Southern Federal University; e-mail: pav_tsure@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634361573; the department of telecommunication systems information security; cand. of eng. sc.; associate professor.

Shibaev Stanislav Sergeyevich – e-mail: sheab@list.ru; laboratory of nanophotonics and optoelectronics; senior scientist; cand. of eng. sc.

Volik Denis Petrovich – e-mail: DVLbest@mail.ru; the department of radioengineering electronics; assistant.