

УДК 621.37

С. А. Богданов, П. В. Куприянов, С. В. Николаев
 АО «НПП "Исток" им. Шокина»
 ул. Вокзальная, д. 2а, корп. 1, Фрязино, 141190, Россия
 С. А. Петров
 АО «НПК "ТРИСТАН"»
 ул. 2-я Боевская, д. 2, с. 1, Москва, 107014, Россия

Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме

Аннотация. *Исследуются пути расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ. Поставлена задача ограничения выходных сигналов при увеличении верхней границы динамического диапазона по критерию подавления интермодуляционных составляющих третьего порядка. Представлены основные соотношения, определяющие граничные условия динамического диапазона. Проведены экспериментальные исследования трех вариантов построения выходного тракта широкополосных приемных устройств СВЧ в двухтональном режиме работы:*

- выходного усилителя с точкой 1 дБ компрессии мощности по выходу на уровне, соответствующем безопасной выходной мощности;
- мощного выходного усилителя с пассивным диодным ограничителем по выходу;
- мощного выходного усилителя с цепью автоматической регулировки ослабления, подключенной к его входу.

Приведены результаты измерений подавления интермодуляционных искажений и выходной мощности в зависимости от уровня входного сигнала для различных нелинейных элементов. На основе анализа измеренных характеристик найдено оптимальное техническое решение построения выходного тракта. Динамический диапазон расширен более чем на 20 дБ. Подавление интермодуляционных составляющих третьего порядка при заданном безопасном уровне выходного сигнала +10 дБм составило более 60 дБ. Обеспечено эффективное функционирование широкополосного приемного устройства в многосигнальном режиме.

Ключевые слова: широкополосное приемное устройство СВЧ, расширенный динамический диапазон, интермодуляционные искажения

Для цитирования: Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме / С. А. Богданов, П. В. Куприянов, С. В. Николаев, С. А. Петров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 85–90.

S. A. Bogdanov, P. V. Kupriyanov, S. V. Nikolaev
 JSC "RPC "Istok" named after Shokin"
 2A, Vokzalnaya Str., 141190, Fryazino, Russia
 S. A. Petrov
 JSC "NPK" TRISTAN "
 2, 2-ya Bоеvskaya Str., 107014, Moscow, Russia

Investigation of Ways of Dynamic Range Expansion for Broadband Receiver Microwave Devices in Multi-Signal Mode

Abstract. *The article investigates ways to expand the dynamic range of broadband microwave receiving devices. The task is to limit the output signals while increasing the upper boundary of the dynamic range by the criterion of the third-order inter-modulation component suppression. The main relations determining the dynamic range boundary conditions are pre-sented. Experimental studies of three variants of constructing the broadband microwave receiver output path in two-ton mode of operation are carried out for:*

- an output amplifier with a point of 1 dB of output power compression at the level corresponding to safe output power;
- a powerful output amplifier with a passive diode limiter on the output;
- a powerful output amplifier with an automatic attenuation adjustment circuit connected to its input.

The measurement results of the magnitude of intermodulation distortions suppression and output power are presented as a function of the input signal level for various nonlinear elements. Based on the analysis of the measured char-

acteristics, an optimal technical solution is found for constructing an output path. The dynamic range is extended by more than 20 dB. Suppression of intermodulation components of the third order exceeds 60 dB. Effective functioning of the broadband receiver in multisign mode is ensured.

Key words: broadband microwave receiver, extended dynamic range, intermodulation distortions

For citation: Bogdanov S. A., Kupriyanov P. V., Nikolaev S. V., Petrov S. A. Investigation of Ways of Dynamic Range Expansion for Broadband Receiver Microwave Devices in Multi-Signal Mode. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics], 2018, no. 3, pp. 85–90. (In Russian)

Введение. Техника широкополосного приема на СВЧ, применительно к пассивной радиолокации (ПР), развивается в последнее время бурными темпами. Это является следствием роста номенклатуры, количества и качества излучающих радиоэлектронных средств, являющихся информационными источниками средств ПР и радиотехнического мониторинга.

Тактико-технические характеристики (ТТХ) радиоэлектронных средств (РЭС) ПР должны постоянно улучшаться, чтобы обеспечивать соответствие требованиям назначения в новых, все более жестких условиях применения. Соответственно возрастают требования к основным техническим характеристикам широкополосных приемных устройств (ШПУ) СВЧ [1]. В первую очередь это касается электрических параметров, в частности динамического диапазона (ДД) входных сигналов – определяющего параметра ШПУ.

Постановка задачи. В настоящей статье рассматривается одна техническая возможность расширения ДД выходных сигналов ШПУ СВЧ. Речь идет об увеличении верхней границы ДД по критерию заданного уровня интермодуляционных составляющих третьего порядка (Third-Order spurs of Intermodulation) IM_3 . Данный критерий определяется мнимой точкой пересечения экстраполированных амплитудных характеристик основного сигнала (Third-Order Intercept Point) IP_3 и IM_3 [2], приведенной ко входу (Input IP_3) IP_3 или выходу (Output IP_3) OIP_3 устройства. Он наиболее адекватно соответствует реальным условиям эксплуатации ШПУ СВЧ, характеризующимся, как правило, многосигнальным режимом работы.

Даже если РЭС ПР ориентированы на прием разнесенных во времени импульсных сигналов, в реальных современных условиях применения вероятность многосигнального режима работы довольно высока. Она обусловлена ростом загруженности эфира за счет увеличения количества радиолокационных средств с малой скважностью и квазинепрерывных, а также источников преднамеренных и непреднамеренных помех. Тенденция дальнейшего развития вполне очевидна.

Выходные каскады радиоприемного тракта современных ШПУ СВЧ нагружаются, как правило, на высокоскоростные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), находящиеся на входе аппаратуры цифровой обработки сигнала. АЦП представляют собой сложные, высокотехнологичные и крайне чувствительные к формату входного сигнала устройства. Так, например, превышение мощности входного сигнала, соответствующего верхнему разряду АЦП [3], всего на 3...6 дБ ведет к необратимым последствиям – устройство выгорает.

Решение проблемы с первого взгляда очевидно и лежит в плоскости ограничения выходного сигнала ШПУ СВЧ, например, выбором значения верхней границы линейности амплитудной характеристики, обеспечивающей компрессию коэффициента передачи выходного усилителя на 1 дБ (P_{1dB}). Однако более глубокое рассмотрение проблемы показывает, что реализуемый в точке P_{1dB} уровень подавления $IM_3 - L_{IM_3}$ недостаточен для эффективного функционирования РЭС ПР. Предметом исследования настоящей публикации является поиск возможностей увеличения L_{IM_3} при заданном безопасном уровне выходной мощности ШПУ СВЧ.

Основные соотношения. Верхняя граница динамического диапазона усилителя при наличии двухтонального сигнала на входе ограничена интермодуляционными искажениями 3-го порядка, уровень которых можно оценить по положению точек пересечения IP_3 по входу или OIP_3 по выходу.

В широкополосном приемном устройстве, состоящем из маломощного входного линейного тракта (ВЛТ), характеризующегося уровнем $IP_{3ВЛТ}$ и коэффициентом усиления по мощности $G_{ВЛТ}$, и выходного тракта на основе усилителя мощности (УМ) с точкой перехвата по входу $IP_{3УМ}$ и коэффициентом усиления по мощности $G_{УМ}$, результирующий уровень IP_3 можно оценить из выражения [4], [5]

$$\frac{1}{IP_3} = \frac{1}{IP_{3ВЛТ}} + \frac{G_{ВЛТ}}{IP_{3УМ}}. \quad (1)$$

Таким образом, верхняя граница динамического диапазона UDR (Upper limit of Dynamic Range) ШПУ в основном определяется физическими свойствами его выходного каскада. Влияние предыдущих каскадов в соответствии с (1) существенно ослаблено.

UDR ШПУ по критерию заданного уровня L_{IM_3} связана с IP_3 соотношением

$$UDR = G_{ВЛТ} G_{УМ} IP_3 - \frac{1}{2} L_{IM_3}. \quad (2)$$

Данное соотношение справедливо [4] и практически выполняется во всем диапазоне значений L_{IM_3} , актуальных для ПР, как минимум до 60 дБ.

При существенном превышении этого значения соотношение (2) может нарушаться из-за конструктивных и технологических особенностей построения усилителей, связанных с контактными явлениями и т. п. [6], [7].

В свою очередь, OIP_3 и P_{1dB} по выходу также связаны соотношением

$$OIP_3 = P_{1dB} + C, \quad (3)$$

где значение C определяется физическими свойствами нелинейного элемента и схемотехнической реализацией усилителя. Наиболее типичные значения параметра C , наблюдаемые на практике, лежат в пределах $C = 10...15$ дБ, что с учетом (2) соответствует уровню подавления $L_{IM_3} = 20...30$ дБ [8].

Таким образом, на динамический диапазон накладываются ограничения, обусловленные заранее определенной выходной мощностью P_{1dB} .

Экспериментальные исследования. Рассмотрим три варианта построения выходного тракта ШПУ СВЧ, аналогичного [1], в диапазоне выходных частот 1.5...2 ГГц.

1. Выходной усилитель с уровнем P_{1dB} по выходу на уровне +13 дБм, соответствующем безопасной входной мощности АЦП.

Результаты измерений спектра сигнала на выходе рассматриваемого усилителя при наличии двухтонального сигнала на его входе приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что значение L_{IM_3} в точке P_{1dB} составило порядка -20 дБм. Такое значение L_{IM_3} ожидаемо в соответствии с (3) и приведенными ранее рассуждениями. В данном случае величина C составила 10 дБ, но этого оказалось недостаточно для обеспечения соответствия требованиям назначения современных РЭС ПР.

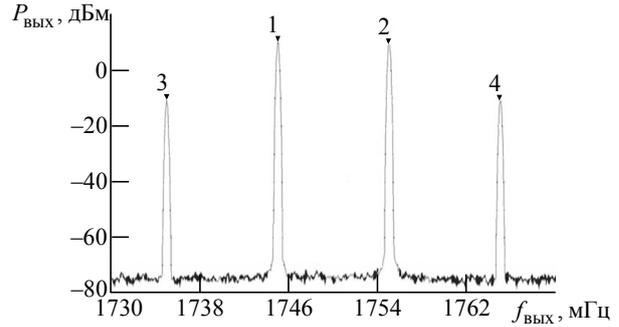


Рис. 1

2. Мощный выходной усилитель с $OIP_3 = 41$ дБм с пассивным диодным ограничителем по выходу.

Существовало предположение, что такое решение окажется более предпочтительным с точки зрения L_{IM_3} . Для такого усилителя, исходя из его OIP_3 , при указанных уровнях выходного сигнала величина L_{IM_3} ничтожно мала. Однако спектр сигнала на выходе тракта ШПУ СВЧ, реализованному по варианту 2, при наличии двухтонального сигнала на его входе практически совпал с результатом измерения для схемы выходного тракта по варианту 1, показанным на рис. 1. Маркерами 1 и 2 обозначены уровни мощности полезных сигналов, а маркерами 3 и 4 значения их интермодуляционных составляющих. Причиной стал выходной ограничитель мощности на основе *p-i-n*-диодов, обеспечивающий безопасный уровень выходной мощности. Именно он и определил L_{IM_3} вблизи точки P_{1dB} . Результат также оказался неудовлетворительным.

3. Схема автоматической регулировки ослабления (АРО) с мощным усилителем по выходу.

Для обеспечения соответствия требованиям назначения было выбрано еще одно, более сложное схемотехническое решение, но также на основе мощного усилителя. Приведенная на рис. 2 схема выходного тракта состоит из цепи автоматической регулировки ослабления, подключенной ко входу усилителя (1 – делитель мощности; 2 – детектор; 3 – операционный усилитель; 4 – фильтр

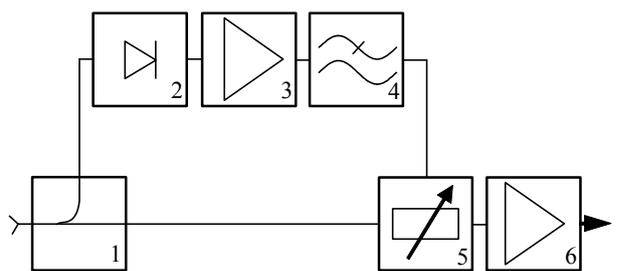


Рис. 2

нижних частот (НЧ); 5 – аттенюатор СВЧ; 6 – усилитель мощности). Напряжение управления аттенюатором формировалось в автоматическом режиме детектором и вспомогательным операционным усилителем. Выходной тракт имеет характеристики, показанные на рис. 3. Маркерами 1 и 2 обозначены уровни мощности полезных сигналов, а маркерами 3 и 4 – значения их интермодуляционных составляющих. ОИР₃ ШПУ СВЧ составил более 40 дБм, что обеспечило L_{IM_3} около –60 дБн при безопасном уровне выходной мощности.

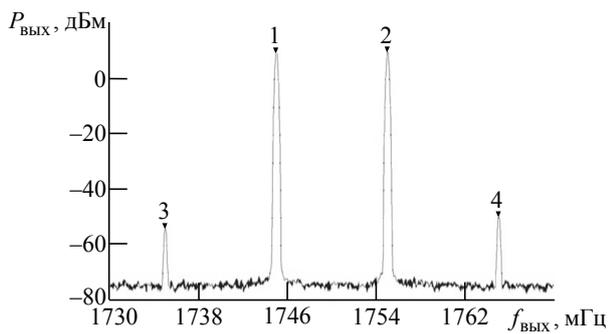


Рис. 3

Обсуждение результатов. Сравнительные амплитудные характеристики всех трех вариантов показаны на рис. 4. Черными линиями показаны зависимости L_{IM_3} , серыми – зависимости $P_{вых}$ от $P_{вх}$. Сплошными линиями показаны зависимости по варианту 1, штриховыми по варианту 2, штрихпунктирными по варианту 3. Из графиков видно, что усилитель по варианту 1 и ограничитель по варианту 2 имеют практически одинаковое подавление L_{IM_3} при равной входной мощности. При этом $P_{1дВ}$ во втором варианте несколько выше. Это означает, что параметр C у диодного ограничителя, использованного в эксперименте, меньше, чем у усилителя по варианту 1. По мнению авторов статьи, данный результат не является общим, а лишь отражает параметры конкретных реализаций усилителя на основе м/сх РНА-1+ и диодного ограничителя CLM-83-2W+ фирмы Mini-circuits.

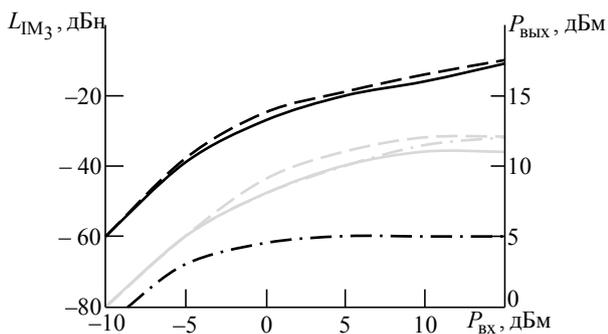


Рис. 4

На сегодняшний день наблюдается тенденция роста параметра C у современных усилителей СВЧ. Это достигается различными методами уменьшения нелинейных искажений [9]:

- выбором оптимального режима работы выходного каскада;
- технологическими методами формирования активных элементов монолитных интегральных схем усилителей СВЧ с наперед заданными значениями отдельных параметров;
- схмотехническими методами линеаризации с предварительным искажением входного сигнала, выделением и последующим вычитанием интермодуляционных искажений из усиленного сигнала.

Последняя группа методов широко используется в мощных усилителях, однако их применение в рассматриваемом приложении может оказаться проблематичным. Схмотехнические методы уменьшения нелинейных искажений эффективно работают лишь с относительно узкополосными сигналами и вносят существенные задержки на его прохождение. Кроме того, перспективные для аппаратуры ПР методы линеаризации, лежащие в основе систем с прямой связью, требуют от СВЧ-трактов обеспечения максимального рассогласования сигналов в цепях выделения и вычитания интермодуляционных искажений по амплитуде до 0.3 дБ, по фазе до 2° в рабочей полосе частот.

Что касается пассивных ограничителей СВЧ-сигнала, то вопрос оптимизации их структуры и схмотехники по критерию максимального C освещен на сегодняшний день недостаточно и требует проведения дополнительных исследований, лежащих за пределами данной публикации.

Наилучшие результаты ожидаемо были получены в схеме по варианту 3 с автоматической регулировкой ослабления и мощным усилителем по выходу. Она имеет гораздо лучшие характеристики по подавлению L_{IM_3} .

Это означает расширение UDR ШПУ СВЧ по критерию L_{IM_3} на 20 дБ, что является основным результатом настоящего исследования. РЭС ПР с таким ШПУ СВЧ будут иметь высокие тактико-технические характеристики при работе в много-сигнальном режиме.

Очевидными недостатками такой схемы построения выходного тракта являются искажение амплитуды выходного сигнала относительно входного и ограниченное быстродействие схемы автоматической регулировки ослабления. Оба недостатка в большинстве реальных применений РЭС ПР не являются принципиальными и могут быть устранены тем или иным схемным либо системным способом.

Амплитуда сигнала не является необходимым параметром в системах с фазовой или временной обработкой сигнала. К тому же истинная амплитуда может быть восстановлена аппаратурой обработки сигнала с использованием сигнала с детектора АРО. Что касается быстродействия, то возможности современной схемотехники, например с использованием транзисторов MAAVSS0004 фирмы MАСOM, позволяют реализовывать значения до единиц наносекунд. Это позволяет надежно защищаться от сигналов, поступающих на вход ШПУ СВЧ из эфира. Время нарастания реальных радиоимпульсов составляет, как правило, не менее нескольких десятков наносекунд, что обусловлено радиофизическими особенностями распространения СВЧ-сигналов в атмосфере [10].

Заключение. Проведенное в данной статье исследование расширения динамического диапазона ШПУ СВЧ имело своей целью улучшение

ТТХ РЭС ПР. В этом смысле достигнутый результат удовлетворяет требованиям эффективного функционирования ШПУ СВЧ в многосигнальном режиме и обеспечивает соответствие РЭС ПР реальным условиям применения. На основе анализа измеренных характеристик различных вариантов построения выходного тракта ШПУ СВЧ найдено техническое решение, наилучшим образом соответствующее поставленной задаче увеличения UDR по критерию L_{IM_3} . Подавление L_{IM_3} составило более 60 дБ, что соответствует увеличению UDR более чем на 20 дБ. Цель оказалась достигнутой, однако в ходе проведения указанных исследований возникло понимание необходимости дальнейшего, более детального изучения физических и схемотехнических возможностей расширения UDR ШПУ СВЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприянов П. В. Широкополосные приемные устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном // Радиотехника. 2006. Вып. 3. С. 8–13.

2. Doug Stuetzle. Understanding IP2 and IP3 Issues in Direct Conversion Receivers for WCDMA Wide Area Basestations // Linear Technology Magazine. 2008. Vol. 18, № 2. P. 10–27.

3. Datasheet. Texas Instruments, ADC12J2700. URL: <https://www.ti.com/product/ADC12J2700> (дата обращения: 20.06.2018).

4. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. С. 224.

5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. / пер. с нем. М.: Додэка-XX1, 2008. Т. 1. 832 с.

6. Hartman R. Passive Intermodulation (PIM) Testing Moves to the Base Station // Microwave J. 2011.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2018 г.

URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/11103-passive-intermodulation-pim-testing-moves-to-the-base-station?v=preview> (дата обращения: 29.06.2018).

7. Джуринский К. Б. Интермодуляции в радиочастотных соединителях для мобильной и сотовой связи // Компоненты и технологии. 2013. № 6 (107). С. 26–30.

8. Barkley K. Two Tone IMD Measurement Techniques // RF Design. June, 2001. P. 36–52.

9. Fan C. W., Cheng K. K. M. Theoretical and experimental study of amplifier linearization based on harmonic and baseband signal injection technique // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 7. P. 1801–1806.

10. Назаров Л. Е., Батанов В. В., Зудилин А. С. Искажения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/win/feb16/1/text.pdf> (дата обращения: 29.06.2018).

Богданов Сергей Александрович – кандидат технических наук (2007), доцент (2010), ведущий инженер АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор более 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – полупроводниковая гетероструктурная наноэлектроника; моделирование электрофизических свойств и характеристик структур твердотельной электроники и приборов на их основе; оптимизация характеристик функциональных узлов аналоговой техники.

E-mail: bogdanov_sa@mail.ru

Куприянов Павел Васильевич – доктор технических наук (2010), начальник отделения АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – физика и техника инфраинфракрасных широкополосных приемных устройств СВЧ приборов и устройств миллиметрового диапазона длин волн.

E-mail: kupriyanov64@mail.ru

Николаев Сергей Владимирович – инженер по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" (2006, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики), начальник лаборатории АО «НПП "Исток" им. Шокина». Сфера научных интересов – физика и техника инфраинфракрасных широкополосных приемных устройств СВЧ приборов и устройств миллиметрового диапазона длин волн.

E-mail: sergei_post@list.ru

Петров Сергей Александрович – инженер по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" (2009, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики), начальник сектора разработки РЭА СВЧ АО «НПК "ТРИСТАН"». Автор четырех научных работ. Сфера научных интересов – инфраничные широкополосные приемные устройства СВЧ и устройства миллиметрового диапазона длин волн.
E-mail: s__petrov@mail.ru

REFERENCES

1. Kupriyanov P. V. Broadband Microwave Receivers with Expanded Dynamic Range. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering]. 2006, no. 3, pp. 8–13. (In Russian)
2. Doug Stuetzle. Understanding IP2 and IP3 Issues in Direct Conversion Receivers for WCDMA Wide Area Basestations. *Linear Technology Magazine*. 2008, vol. 18, no. 2, pp. 10–27.
3. Datasheet. Texas Instruments, ADC12J2700. Available at: <https://www.ti.com/product/ADC12J2700> (accessed: 20.06.2018).
4. Knyazev A. D., Kechiev L. N., Petrov B. V. *Konstruirovaniye radioelektronnoi i elektronno-vychislitel'noi apparatury s uchetom elektromagnitnoi sovместимости* [Design of Electronic and Electronic Computing Equipment in View of Electromagnetic Compatibility]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1989, p. 224. (In Russian)
5. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: v 2 t.: per. s nem. T. 1* [Semiconductor circuitry]. Moscow, *Dodeka -XX1*, 2008, 832 p. (In Russian)
6. Hartman R. Passive Intermodulation (PIM) Testing Moves to the Base Station. *Microwave Journal*, 2011. Available at: <http://www.microwavejournal.com/articles/11103-passive-intermodulation-pim-testing-moves-to-the-base-station?v=preview> (accessed: 29.06.1990).
7. Dzhurinskii K. B. Intermodulation in Radio Frequency Connectors for Mobile and Cellular Communication. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies]. 2013, no. 6 (107), pp. 26–30. (In Russian)
8. Barkley K. Two Tone IMD Measurement Techniques. *RF Design*. June, 2001, pp. 36–52.
9. Fan C. W., Cheng K. K. M. Theoretical and experimental study of amplifier linearization based on harmonic and baseband signal injection technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002, vol. 50, no. 7, pp. 1801–1806.
10. Nazarov L. E., Batanov V. V., Zudilin A. S. Radio Pulse Distortions under the Conditions of Propagation along Satellite Communication System Ionospheric Lines. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics]. 2016. № 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/win/feb16/1/text.pdf> (accessed: 29.06.2018) (In Russian)

Received April, 23, 2018

Sergey A. Bogdanov – Ph.D. in Engineering (2007), Associate Professor (2010), leading research of JSC RPC "Istok" named after Shokin. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: semiconductor heterostructural nanoelectronics; modeling of electrophysical properties and characteristics of structures of solid-state electronics and devices on their basis; performance optimization for functional nodes of analog engineering.
E-mail: bogdanov_sa@mail.ru

Pavel V. Kupriyanov – D.Sc. in Engineering (2010), Department Director of JSC RPC "Istok" named after Shokin. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: physics and technology of infradin broadband receiving devices of microwave devices and mm-band wavelength devices.
E-mail: kupriyanov64@mail.ru

Sergey V. Nikolaev – Engineer in Design and Technology of Radioelectronic Facilities (2006, MIREA – Russian Technological University), head of laboratory of JSC RPC "Istok" named after Shokin. Area of expertise: physics and technology of infradin broadband receiving devices of microwave devices and mm-band wavelength devices.
E-mail: sergei_post@list.ru

Sergey A. Petrov – Engineer in Design and Technology of Radioelectronic Facilities (2009, MIREA – Russian Technological University), head of R&D sector of REA Microwave of JSC "NPK" TRISTAN", Moscow. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: physics and technology of infradin broadband receiving devices of microwave devices and mm-band wavelength devices.
E-mail: s__petrov@mail.ru
