

Метод улучшения разрешающей способности в радиолокаторах с фазокодовой манипуляцией

*К.С. Лялин, В.И. Орешкин, М.С. Хасанов,
Ю.М. Мелёшин, Т.А. Довгаль*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

ksl@miee.ru

Метод качественного улучшения технических характеристик многодиапазонных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) основывается на использовании быстрого преобразования Фурье для разложения исходного широкополосного импульса на N составляющих, которые в свою очередь используются в системе в качестве модулирующих сигналов. В работе проведен анализ современных решений в области построения многодиапазонных РСА. Предложен метод качественного улучшения технических характеристик РСА за счет системного подхода к синтезу и обработке сигналов. Показан алгоритм обработки принятых сигналов, который обеспечивает их соединение в исходный импульс с целью увеличения разрешающей способности. Приведены результаты экспериментального доказательства работоспособности метода. Эксперимент показал уменьшение ширины отклика от цели в семь раз при $N = 13$. Результаты применения метода эффективного использования полосы сигнала применительно к описанному алгоритму показали улучшение разрешающей способности на 8 % и увеличение амплитуды отклика на 0,7 дБ при незначительном увеличении уровня боковых лепестков.

Ключевые слова: многодиапазонный радар; многополосный радар; радиолокатор с синтезированной апертурой; разрешающая способность; быстрое преобразование Фурье

Для цитирования: Метод улучшения разрешающей способности в радиолокаторах с фазокодовой манипуляцией / К.С. Лялин, В.И. Орешкин, М.С. Хасанов и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 371–378. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378

Method to Improve Range Resolution of Phase-Shift Keying Radar

K.S. Lyalin, V.I. Oreshkin, M.S. Khasanov,
Y.M. Meleshin, T.A. Dovgal

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

ksl@miee.ru

Abstract: The analysis of the modern solutions in the area of building multiband radars has been performed, and the method for qualitative improvement of such systems technical characteristics due to the system approach to synthesis and processing of signals has been proposed. The method is based on using the fast Fourier transform to expand the initial wideband pulse into N components, which, in their turn are applied in the system as the modeling signals. The algorithm of processing of the received signals, which provides the harmonics gathering and by that the range resolution increase, has been shown. The results of the experimental proof of the method efficiency have been given. The experiment performed has shown a 7 times initial pulse width decrease with usage of $N=13$ harmonics. The results of its application have shown a 8% resolution improvement and an 0.7 dB main lobe magnitude increase with a slight sidelobes increase.

Keywords: multirange radar; multiband radar; synthetic aperture radar; resolution; Fourier transform

For citation: Lyalin K.S., Oreshkin V.I., Khasanov M.S., Meleshin Y.M., Dovgal T.A. Method to improve range resolution of phase-shift keying radar. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 371–378. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378

Введение. Многодиапазонные системы наиболее широко применяются в радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА), так как результатом работы таких систем, как правило, является радиолокационное изображение местности. Способность многодиапазонных систем обнаруживать различные объекты сильно зависит от их разрешающей способности и проникающих свойств электромагнитных волн в используемых частотных диапазонах. Проникающая способность системы зависит от выбранного частотного диапазона. В работах [1, 2] проведено исследование зависимости поглощения волн различными средами от частоты. Общий характер увеличения затухания электромагнитных волн в различных средах с ростом частоты наблюдается для всех групп грунтов, и потери в породах, содержащих много суглинков, глины, песка и песчаника, наиболее значимые. Представленные данные объясняют тенденцию применения РСА подповерхностного сканирования с частотными диапазонами в пределах 50–500 МГц. Это является компромиссом между глубиной зондирования в единицы – десятки метров и разрешающей способностью в единицы – десятки сантиметров для реальных геологических структур.

Анализ многодиапазонных систем. Разрешающая способность РСА по азимуту пропорциональна линейному размеру антенны и не зависит от используемых сигналов. Однако разрешение по дальности ΔR зависит от рабочей полосы частот [3]:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f},$$

где Δf – ширина спектра используемого сигнала.

Следовательно, для реализации систем с высокой разрешающей способностью разработчики стремятся реализовать большую рабочую полосу частот в более высоких частотных диапазонах. Поэтому системы радиолокационного картографирования часто реализуются в частотных X- и Ku-диапазонах [4, 5].

Таким образом, конкретный частотный диапазон для системы РСА выбирается в зависимости от задач, которые данная система должна решать. Однако в современной технике необходимо создавать универсальные системы для решения широкого спектра задач. Этим объясняется появление многодиапазонных РСА.

Классическим примером многодиапазонного РСА является семейство авиационных мобильных малогабаритных РСА семейства «Компакт» (разработки ФГУП НИИТП, г. Москва) [6]. В такой системе каждый модуль выполнен в виде отдельного радиочастотного блока, имеет свой аналоговый тракт и антенну. Формирование модулирующих сигналов и обработку полученных с приемника сигналов выполняет единое цифровое ядро. Данная система является хорошим примером системы, состоящей из разнодиапазонных подсистем, в которой общее качество системы достигается за счет обработки информации, полученной отдельно в разных подсистемах. Например, достигнута высокая разрешающая способность в X-диапазоне, а также возможность обнаруживать скрытые поверхностью объекты в VHF-диапазоне. Однако такие системы имеют ключевой недостаток – ограничение их технических характеристик, прежде всего разрешающей способности, характеристиками одной подсистемы. Например, даже при действовании частотных X-, P- и L- диапазонов максимальная разрешающая способность системы будет ограничена разрешающей способностью подсистемы частотного X-диапазона.

Для решения данной проблемы предлагаются различные методы построения многодиапазонных систем с соединением всех используемых в подсистемах сигналов в один с целью улучшения его итоговых характеристик. В последнее время эти методы реализуются только для многополосных систем, т.е. когда используемые полосы граничат друг с другом. Например, в работе [7] описана система РСА с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигналов, в которой используются три граничащие полосы сигнала для их объединения и достижения высокой разрешающей способности. Более подробно сам алгоритм работы такой системы описан в [8].

Как известно [9], использование ЛЧМ-сигналов имеет некоторые ограничения и не всегда может способствовать решению поставленной задачи. Поэтому существует потребность в реализации похожих методов синтеза и обработки многополосных сигналов для всех типов используемых сигналов.

В настоящей работе представлен новый метод синтеза и обработки сигналов для решения поставленной задачи. Основным преимуществом метода является возможность его применения в РСА с фазокодовыми сигнальными последовательностями.

Описание метода. Поскольку низкочастотным модулирующим сигналом в радиолокаторах с фазокодовой манипуляцией (phase-shift keying) является результат свертки между прямоугольным импульсом и модулирующей кодовой последовательностью (например, последовательностью Лежандра или *M*-последовательностью), для исследований корректно использовать только прямоугольный импульс для различных операций над ним. Все этапы прохождения сигнала в системе могут рассматриваться как ли-

нейные операции. Следовательно, сигнал можно разбить в частотной области на поддиапазоны и соединить их без искажений (рис.1). Однако в отличие от систем с ЛЧМ, где сигнал каждой части поддиапазона является ЛЧМ-сигналом, при расщеплении сигнала с фазовой манипуляцией получим сигналы со случайной модуляцией. Отсюда следует, что если использовать расщепление сигнала в прямом виде, то сигналы будут с неравномерным распределением мощности по времени. Это приведет к значительному падению эффективности системы. Таким образом, эффективнее использовать сигнал с малыми колебаниями мощности и регулировать его на стадии обработки.

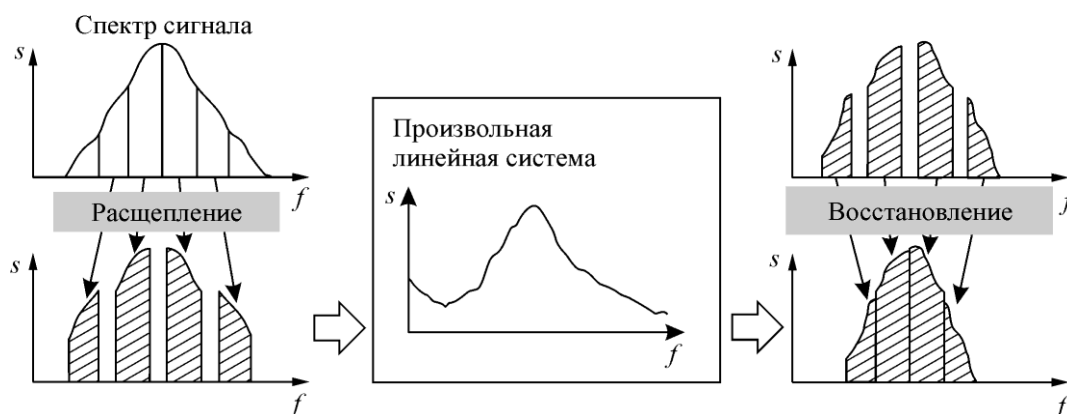


Рис.1. Процесс расщепления сигнала и его восстановления после прохождения через линейную систему

Fig.1. Decomposition of the signal and its composition after passing through a linear system

В рамках рассматриваемого метода предлагается использовать разложение Фурье для разделения спектра исходного широкополосного сигнала на компоненты. Разложение Фурье для периодического сигнала S_N записывается как

$$s_N(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \phi_n\right), \text{ для целых } N \geq 1,$$

где n – число гармоник; A_n – амплитуда гармоники; ϕ_n – фаза гармоники.

Разложение Фурье для периодического повторяющегося прямоугольного импульса с амплитудой A и коэффициентом заполнения D имеет вид

$$f(t) = A \left[D + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(k\pi D) \cdot \cos(2k\pi D t) \right].$$

Значение, обратное D , является коэффициентом сжатия импульса K . Огибающая узкополосного импульса служит оконной функцией, подавляющей побочные периоды восстановленного широкополосного импульса. Количество гармоник N в главном лепестке спектра сигнала (рис.2) равно:

$$N = 2K - 1.$$

Для описанного метода число N совпадает с количеством используемых поднесущих частот.

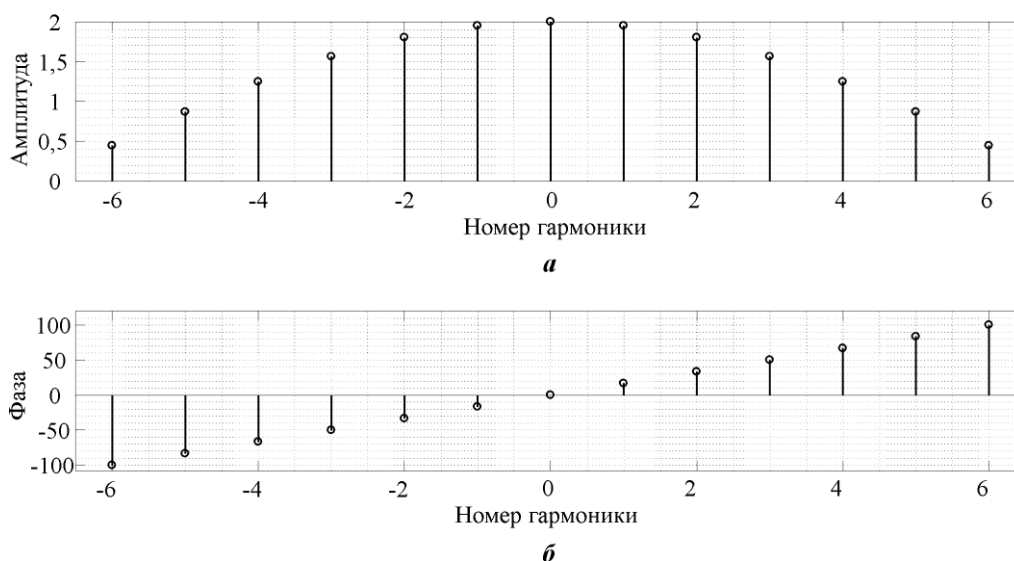


Рис.2. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры прямоугольного импульса для коэффициента компрессии $K=7$

Fig.2. Magnitude (a) and phase (b) spectrum of the rectangular pulse with $K=7$ compression factor

К недостаткам такого подхода можно отнести:

- чрезмерное перекрытие рабочих полос сигналов, так как сигнал каждой поднесущей имеет ширину главного лепестка спектра в два раза больше, чем шаг изменения несущей частоты;
- энергетические потери, связанные со спадом к краям амплитуды гармоник исходного сигнала.

Данные недостатки можно частично устранить с помощью метода эффективного ограничения спектра используемых сигналов [10]. Отметим, что это ограничение необходимо применять как в отношении исходного сигнала, что существенно увеличит энергетическую эффективность, так и в отношении поднесущих сигналов.

Проверка метода. Для проверки метода проведены эксперименты с использованием установки, структурная схема которой показана на рис.3.

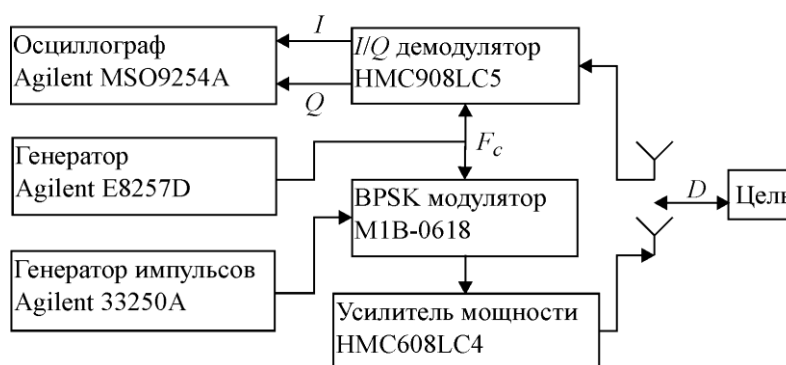


Рис.3. Структурная схема экспериментальной установки

Fig.3. Experiment structural scheme

На генераторе импульсов формируется модулирующий импульс, который переносится на центральную частоту F_c и излучается в пространство. В направлении главного лепестка антенны располагается цель на удалении D . Отраженный от цели сигнал при-

нимается и демодулируется, квадратуры с выхода демодулятора поступают на цифровой осциллограф и записываются для дальнейшей обработки.

Данные для трех положений цели на расстояниях 2; 2,5; 3 м записаны с осциллографа. В качестве модулирующего использовался импульс с полосой сигнала 75 МГц, что соответствует ширине отклика по дальности (по уровню -3 дБ), равной 1 м. Для каждой из целей снимались данные для $N=13$ центральных частот в диапазоне от 9 до 10 ГГц с шагом 75 МГц. Записанные данные объединялись по описанному методу. На рис.4 представлены графики зависимости амплитуды собранных откликов целей от расстояния. Калибровка по дальности проводилась по сигналу, наведенному с передающей антенны на приемную (для всех трех экспериментов данный сигнал совпадает).

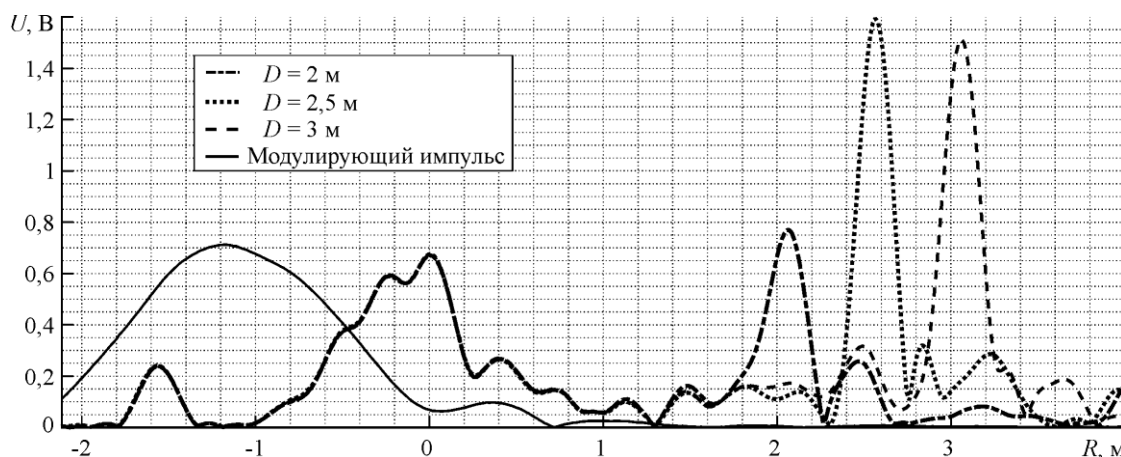


Рис.4. Отклики от целей для трех экспериментов
Fig.4. Target responses for the three experiments

На рис.4 видно обужение отклика от целей в $K=7$ раз после применения метода улучшения разрешающей способности по сравнению с модулирующим узкополосным импульсом. Это позволяет однозначно различать цели на разных дальностях. Таким образом, можно говорить о работоспособности представленного метода.

В ходе исследования опробован метод эффективного ограничения спектра [10] применительно к объединенному широкополосному импульсу. На рис.5 представлен отклик от цели на расстоянии 2,5 м для трех случаев использования полосы: 80, 90 и 100 %. За 100 % взята ширина спектра исходного расщепляемого сигнала по первым нулям его спектра (см. рис.2), случаи 80 и 90 % эквивалентны уменьшению длительно-

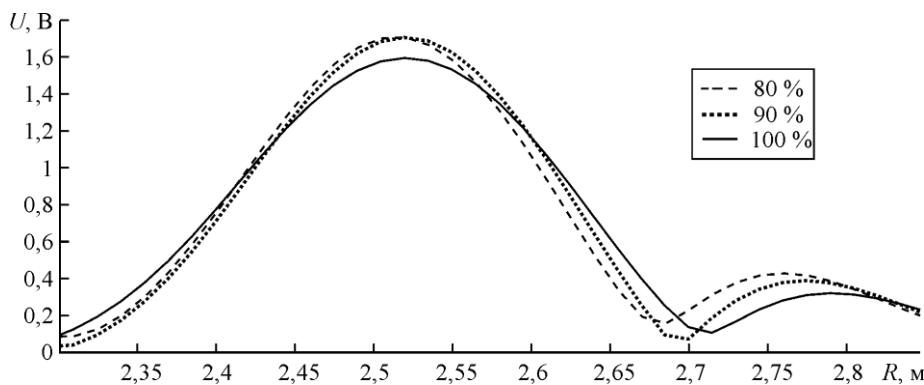


Рис.5. Влияние метода ограничения спектра на отклик от цели
Fig.5. Band limitation effect on the target responses

сти исходного расщепляемого сигнала, следовательно, и улучшению разрешающей способности без изменения излучающих сигналов.

Из рис.5 видно, что использование полосы на 80 % увеличивает амплитуду боковых лепестков, однако позволяет уменьшить ширину отклика по уровню -3 дБ на 8 % и увеличить амплитуду на 0,7 дБ. Это подтверждает возможность эффективного использования рабочей полосы частот системы.

Заключение. Предложенный метод улучшения разрешающей способности позволяет улучшить технические характеристики многополосных систем. Экспериментальные результаты, полученные в лабораторных условиях на установке, которая структурно наиболее приближена к реальным РЛС, доказывают работоспособность метода. В дальнейшем планируется продолжить исследования в данной области, а именно рассмотреть вопросы применения предлагаемого метода в системах с сильно различающимися частотными диапазонами (многодиапазонных РЛС) и исследовать особенности использования данного метода в РСА.

Литература

1. **Ефимов А. В.** Проблемы сверхширокополосного подповерхностного зондирования: материалы VII Всеросс. науч. конф. «VI Всероссийские Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром, 2016. – С. 451–461.
2. **Van der Sanden J.J., Hoekman D.H.** Multiband polarimetric SAR in support of tropical forest resources assessment // IGARSS '95 Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. – 1995. – Vol. 2. – P. 1207–1209.
3. **Нейман П.И., Нейман И.С.** Особенности построения и основные характеристики радиолокаторов с синтезированной апертурой: научно-технический отчет ОАО «НИИ ТП». – М., 2010.
4. **Шеремет А.Ю.** Передающая аппаратура бортовой РСА для малогабаритных БПЛА: разработка, отладка, эксперимент // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №12.
5. **Нейман П.И.** Особенности характеристик и применения авиационных РСА // Геоматика. – 2011. – №3. – С. 30–33.
6. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «КОМПАКТ» / **С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, А.В. Дьяков и др.** // Журнал радиоэлектроники. – 2009. – №10.
7. Precise calibration of channel imbalance for very high resolution SAR with stepped frequency / **Xiangyu Wang, Robert Wang, Yunkai Deng et al.** // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 8. – P. 4252–4261.
8. **Lord R.T., Ingg M.R.** High resolution SAR processing using stepped-frequencies // Proc. IGARSS '97 (Piscata-Way, NJ, USA, Aug. 1997). – 1997. – P. 490–492.
9. **Трухачев А.А.** Радиолокационные сигналы и их применения. – М.: Воениздат, 2005. – 320 с.
10. Spectral distortions of a phase-shift keying signal / **Y.M. Meleshin, M.S. Khasanov, V.I. Oreshkin et al.** // EIConRus. – 2017. – P. 1264–1266.

Поступила 01.03.2018 г.; принята к публикации 24.04.2018 г.

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), ksl@miee.ru

Орешкин Виталий Иванович – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1)

Хасанов Марат Салаватович – инженер Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1)

Мелёшин Юрий Михайлович – инженер Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1)

Довгаль Тимофей Алексеевич – инженер Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1)

References

1. Efimov A. V. Problems of ultra-wideband subsurface sounding. *VII All-Russian Scientific Conference «VI All-Russian Armand Readings. Radiophysical methods in remote sensing»*, Murom, 2016, pp. 451–461. (in Russian).
2. Van der Sanden J.J., Hoekman D.H. Multiband polarimetric SAR in support of tropical forest resources assessment. *IGARSS '95 Quantitative Remote Sensing for Science and Applications*, Jul 1995, vol. 2, pp. 1207–1209.
3. Neiman P. I., Neiman I. S. Features of construction and the main characteristics of synthetic aperture radars. *Scientific and technical report of JSC «NII TP»*, 2010. (in Russian).
4. Sheremet A. Y. Transmitting equipment of on-board SAR for small-size UAV: development, debugging, experiment. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*, 2013, no. 12. (in Russian).
5. Neiman P.I. Features of the characteristics and application of aircraft SAR. *Geomatics*, 2011, no. 3, pp. 30–33. (in Russian).
6. Vnotchenko S.L., Dostovalov M.Y., Dyakov A.V., Dyakov I.V., Ermakov R.V., Jarovskaya E.P., Kovalenko A.I., Musinyanc T.G., Neiman L.S., Riman V.V., Suslov V.E. Airborne mobile small-sized synthetic aperture radars of the "COMPACT" family. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*, 2009, no. 10, p. 3. (in Russian).
7. Xiangyu Wang, Robert Wang, Yunkai Deng, Pei Wang, Ning Li, Weidong Yu, Wei Wang. Precise calibration of channel imbalance for very high resolution SAR with stepped frequency. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, iss. 8, pp. 4252–4261.
8. Lord R.T., M.R. Ingg. High resolution SAR processing using stepped-frequencies. *IGARSS '97 Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development* (Piscata-Way, NY, USA, Aug. 1997), 1997, pp. 490–492.
9. Truhachev A.A. *Radar signals and their applications*. Moscow, Voenizdat, 2005. 320 p. (in Russian).
10. Meleshin, Y.M., Khasanov, M.S., Oreshkin, V.I., Tsvetkov, V.K., Chistukhin, V.V. Spectral distortions of a phase-shift keying signal. *ElConRus.*, 2017, pp. 1264–1266.

Submitted 01.03.2018; Accepted 24.04.2018.

Information about the authors:

Konstantin S. Lyalin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Vice-Director of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), ksl@miee.ru

Vitaliy I. Oreshkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1)

Marat S. Khasanov – engineer of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1)

Yury M. Meleshin – engineer of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1)

Timofey A. Dovgal – engineer of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1)