

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-302-307

УДК 621.373–187.4

## Вспомогательный генератор сигнала произвольной формы для волоконно-оптического гироскопа

Владимир Николаевич Кузнецов<sup>1</sup>, Елисей Викторович Литвинов<sup>2</sup>✉, Евгений Владимирович Востриков<sup>3</sup>, Иван Геннадьевич Дейнека<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [vnkuznetcov@itmo.ru](mailto:vnkuznetcov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7565-2466>

<sup>2</sup> [elitvinov@itmo.ru](mailto:elitvinov@itmo.ru) ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3889-2628>

<sup>3</sup> [evvostrikov@itmo.ru](mailto:evvostrikov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>

<sup>4</sup> [igdeyneka@itmo.ru](mailto:igdeyneka@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>

### Аннотация

Фазовая модуляция лазерного излучения с использованием вспомогательного генератора позволяет улучшить точностные характеристики волоконно-оптических гироскопов. В работе предложен метод генерации сигнала фазовой модуляции, реализованный на базе параллельной архитектуры с возможностью динамического изменения параметров сигнала. Представлен прототип компактного встраиваемого генератора для формирования сигналов частотой до 2,5 ГГц. Генератор реализован на программируемой логической интегральной схеме, что обеспечило компактность конструкции, и сделало возможным включить его в конструкцию волоконно-оптического гироскопа. Динамическое изменение генерируемого сигнала осуществлено с применением персонального компьютера. Разработано специализированное программное обеспечение для генерирования сигналов произвольной формы. Для разработанного генератора приведены спектры синусоидального сигнала и белого шума.

### Ключевые слова

генератор сигналов произвольной формы, цифровой генератор прямого синтеза, ПЛИС, волоконно-оптический гироскоп

### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, название проекта — «Создание производства волоконно-оптических гироскопов для контрольно-измерительных устройств и наземных транспортных систем», Соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019.

**Ссылка для цитирования:** Кузнецов В.Н., Литвинов Е.В., Востриков Е.В., Дейнека И.Г. Вспомогательный генератор сигнала произвольной формы для волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 302–307. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-302-307

## Auxiliary arbitrary waveform generator for fiber optic gyroscope

Vladimir N. Kuznetsov<sup>1</sup>, Elisei V. Litvinov<sup>2</sup>✉, Evgenii V. Vostrikov<sup>3</sup>, Ivan G. Deyneka<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> [vnkuznetcov@itmo.ru](mailto:vnkuznetcov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7565-2466>

<sup>2</sup> [elitvinov@itmo.ru](mailto:elitvinov@itmo.ru) ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3889-2628>

<sup>3</sup> [evvostrikov@itmo.ru](mailto:evvostrikov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>

<sup>4</sup> [igdeyneka@itmo.ru](mailto:igdeyneka@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>

### Abstract

Phase modulation of laser radiation using an auxiliary generator makes it possible to improve the accuracy characteristics of fiber-optic gyroscopes. The authors propose a method for generating a phase modulation signal implemented on

the basis of a parallel architecture with the possibility of dynamically changing the signal parameters. A prototype of a compact embedded generator for generating signals with frequencies up to 2.5 GHz is presented. The generator is implemented on a field-programmable gate array, which ensured a compact design and made it possible to include it in the design of a fiber-optic gyroscope. The dynamic change of the generated signal is carried out using a personal computer using the developed specialized software that allows generating arbitrary waveforms. For the developed generator, the spectra of a sinusoidal signal and white noise are presented.

#### Keywords

arbitrary waveform generator (AWG), Direct Digital Synthesizer (DDS), FPGA, fibre-optic gyroscope

#### Acknowledgements

This work was done at ITMO University and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Agreement No. 075-11-2019-026 dated November 27, 2019, within the project “The production development of fiber-optic gyroscopes for application in measuring instruments and land vehicle systems”.

**For citation:** Kuznetsov V.N., Litvinov E.V., Vostrikov E.V., Deyneka I.G. Auxiliary arbitrary waveform generator for fiber optic gyroscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 302–307. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-302-307

## Введение

Результаты исследований, проводимых в области разработки волоконно-оптических гироскопов, показывают, что благодаря применению вспомогательной фазовой модуляции лазерного излучения можно добиться существенного улучшения точностных характеристик данного типа устройств [1]. Точность волоконно-оптических гироскопов можно повысить с помощью вспомогательной фазовой модуляции [2, 3]. Исследования в данной области продолжаются. Одно из направлений решения проблемы точности — применение генератора произвольной формы с широкой полосой частот для обеспечения возможности гибко менять сигнал вспомогательной фазовой модуляции. При этом необходимо, чтобы генератор такого сигнала был составной конструктивной частью волоконно-оптического гироскопа. Данное условие возможно при использовании современной электронной элементной базы. В настоящей работе приведен один из вариантов реализации такого генератора.

Большинство существующих генераторов сигналов с необходимой полосой частот являются синусоидальными. Генераторы сигналов произвольной формы традиционно выполняются в виде лабораторных устройств, из-за чего их встраивание в конструкцию волоконно-оптического гироскопа практически невозможно. В качестве доступной универсальной платформы для проектирования новых схем генераторов прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesizer, DDS) может быть использована программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) [4].

В работе [5] применена ПЛИС Cyclone II, на которой реализована схема генератора с частичным распараллеливанием функции фазового аккумулятора. Таким образом, удалось повысить максимально поддерживаемую тактовую частоту и частоту генерируемых сигналов.

Отметим, что для реализации генератора сигналов в полосе нескольких гигагерц полученного увеличения недостаточно. В [6] рассмотрена реализация генератора, в котором для уменьшения количества ресурсов использовано свойство симметрии гармонической функции, а для уменьшения динамического энергопотребления применен метод отключения тактовой

частоты (clock gating). Подобные подходы могут быть актуальны в устройствах с высокими требованиями к энергопотреблению, но применение их для генерации сигнала произвольной формы нецелесообразно.

В работе [7] представлен вариант организации параллельной работы двух ПЛИС и четырех цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). В качестве источника отсчетов для ЦАП применен набор ячеек памяти и менеджер, агрегирующий их выходные значения. Такой подход ограничивает возможности осуществления фазовой и амплитудной модуляции сигнала. В [8, 9] применен метод генерации сигнала на базе параллельной архитектуры. Объединенные для работы в параллельном режиме цифровые вычислительные синтезаторы использованы для генерации сигнала и его передачи на ЦАП. Недостаток такого решения — невозможность динамически изменять генерируемый сигнал.

Из рассмотренных работ сложно выбрать известное решение для выполнения поставленной задачи. Необходимость выбора решения послужила причиной проведения настоящей работы.

## Предложенное решение

Авторами предложен и реализован метод генерации сигнала на основе параллельной архитектуры с возможностью динамического изменения сигнала с помощью программного обеспечения на базе пакета прикладных программ MATLAB. Для экспериментального подтверждения предлагаемого решения реализован прототип генератора на основе отладочных плат на базе ПЛИС Altera 10 и высокоскоростного ЦАП AD9164. Реализованная архитектура генератора сигналов представлена на рис. 1. Синим цветом выделены блоки кода, предложенные в данной работе, оранжевым — поставляемые производителем ПЛИС.

Управление генерацией произвольной формы, необходимые блоки загрузки и обработки данных на ПЛИС обеспечивает персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением на базе MATLAB. Цифровые отсчеты сигнала произвольной формы передаются в ПЛИС через JTAG-интерфейс на DDS. Блок-схема ядра генератора DDS приведена на рис. 2, где RAM (Random Access Memory) — память с произвольным доступом.

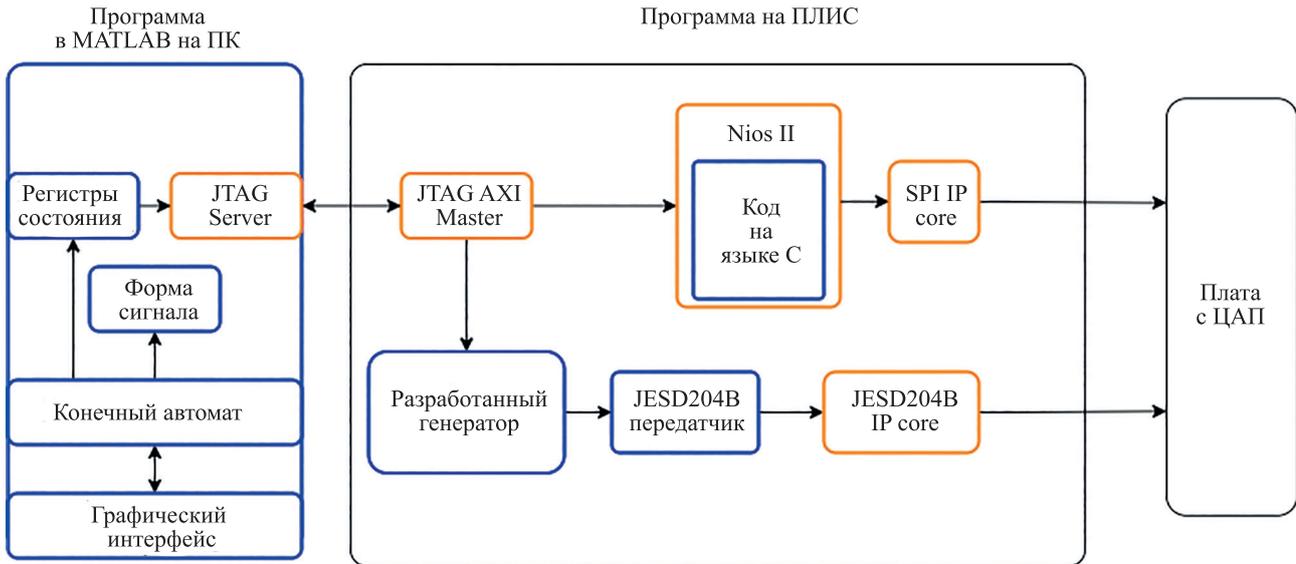


Рис. 1. Блок-схема архитектуры генератора. Названия блоков программируемой логической интегральной схеме приведены в соответствии с технической документацией (Intel FPGA. JESD204B IP Core User Guide. 2017)

Fig. 1. Block diagram of the generator scheme. The names of FPGA blocks are given in accordance with the technical documentation (Intel FPGA. JESD204B IP Core User Guide. 2017)

Синхронизация (DDS) обеспечена с помощью сигналов сброса и разрешения. Применение шестнадцати генераторов сигнала обусловлено режимом работы ЦАП, имеющих максимальную частоту дискретизации 5 ГГц. Блок вычисления фазового инкремента выполняет подсчет слов настройки для DDS, работающих в параллельном режиме. Подсчет выполнен путем переноса младших бит слова настройки на 4 бита в сторону старших, т. е. умножен на 16. Настройка фазы осуществлена исходя из рассчитанного слова настройки, и для каждого генератора вычислена путем его умножения на порядковый номер генератора. Выходным сигналом генератора является параллельная шина, которая состоит из конкатенированных выходов DDS. Сигнал на выходе генератора параллельной архитектуры поступает на вход высокоскоростного интерфейса передачи данных JESD204B и передается на ЦАП.

Предложенный метод генерации сигналов реализован на языке описания аппаратуры VHDL.

### Конструкция генератора

Для экспериментального подтверждения метода собран прототип генератора на отладочных платах ПЛИС Reflex Attila Instant-DevKit Arria 10 FPGA FMC IDK и ЦАП EVAL-AD9164 (рис. 3). Выбор конструкций отладочных плат основан на следующих условиях: для ЦАП — высокая частота дискретизации (5 ГГц), для ПЛИС — наличие необходимых блоков трансиверов и разъемов для подключения отладочной платы ЦАП.

При использовании параллельной архитектуры удалось достичь генерации сигналов произвольной формы в полосе от 500 кГц до 2,5 ГГц при тактовой частоте 312,5 МГц. Примененный ЦАП имеет частоту дискретизации до 5 ГГц в режиме работы с вещественными числами разрядностью 16 бит и встроенный интерполятор с коэффициентами интерполяции от 1 до 3. ЦАП также поддерживает высокоскоростной интерфейс передачи данных JESD204B, предназначенный для передачи отсчетов с ПЛИС на ЦАП.

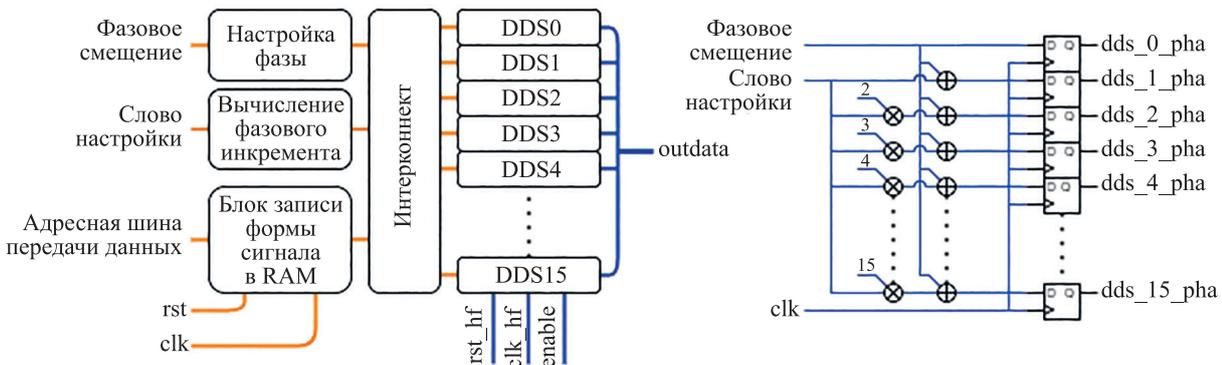


Рис. 2. Блок-схема ядра генератора прямого синтеза на программируемой логической интегральной схеме

Fig. 2. FPGA-based parallel DDS generator core



Рис. 3. Вид генератора, реализованного на отладочных платах  
Fig. 3. Picture of the generator implemented on development boards

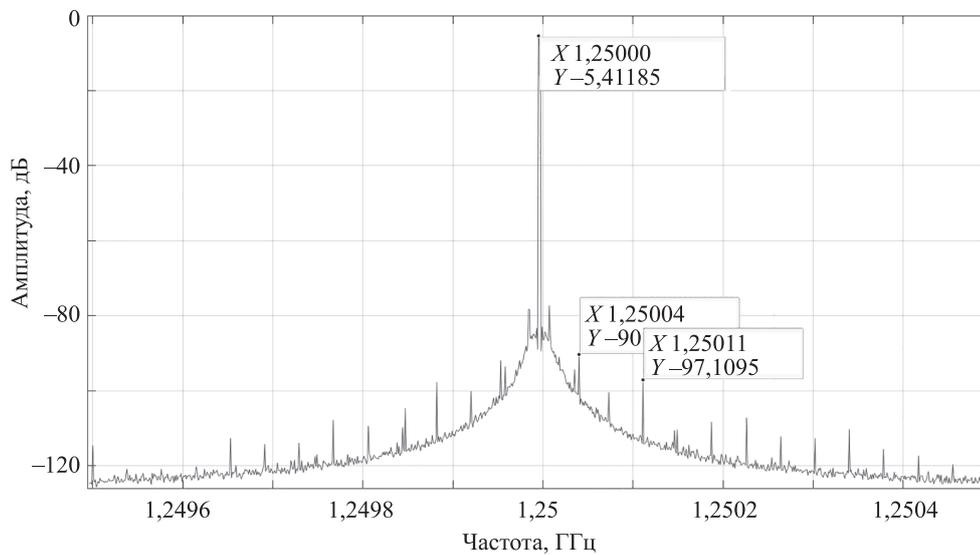


Рис. 4. Спектр и фазовый шум синусоидального сигнала частотой 1,25 ГГц  
Fig. 4. The spectrum and phase noise of the 1.25 GHz sine wave signal

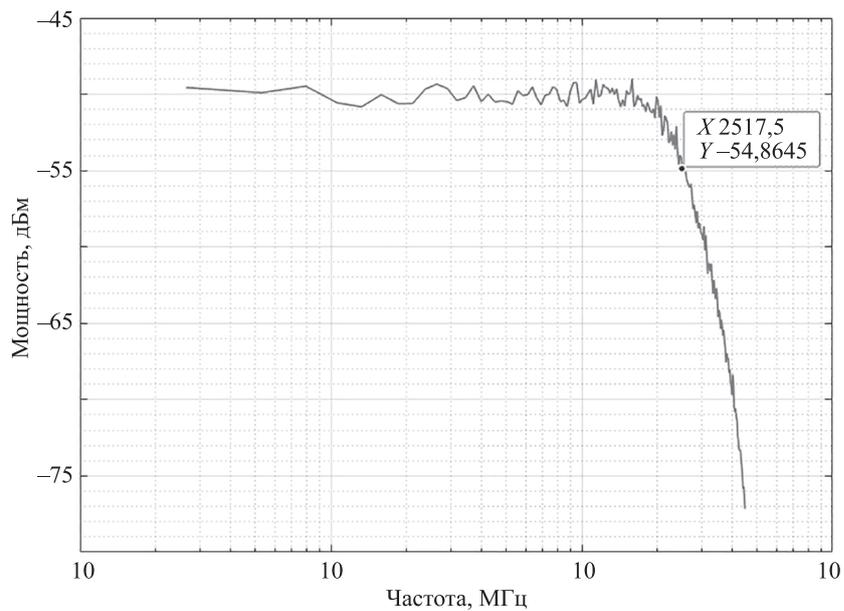


Рис. 5. Спектр белого шума в полосе частот от 500 кГц до 2,5 ГГц  
Fig. 5. The spectrum of white noise in the frequency band from 500 kHz to 2.5 GHz

Имплементация подуровня физического кодирования на базе универсальной логики при работе с трансиверами в ПЛИС 10AX115N4 позволила передать данные на ЦАП со скоростью до 12,5 Гбит/с. При применении режима работы с вещественными числами и коэффициентом интерполяции выходного сигнала равным 1 частота дискретизации используемого ЦАП составляет 5 ГГц. Таким образом, верхняя граница передаваемых частот равняется 2,5 ГГц. Результаты работы генератора представлены на рис. 4 и 5. Измерения спектров выполнены с использованием анализатора Rohde & Schwarz FSW26.

## Заключение

В работе предложен метод генерации сигнала на базе параллельной архитектуры с возможностью динамического изменения параметров сигнала. Результат практической реализации рассматриваемой архитектуры представлен макетом генератора сигнала произвольной формы с частотным диапазоном от 500 кГц до 2,5 ГГц с тактовой частотой 312,5 МГц и возможностью динамического изменения формы сигнала. Предложенная архитектура может быть использована для построения малогабаритных генераторов сигналов, входящих в состав компактных измерительных приборов.

Разработанный макет генератора применен в составе волоконно-оптического гироскопа для модулирования оптического излучения с целью улучшения точностных характеристик.

## Литература

1. Курбатов А.М., Курбатов Р.А., Горячкин А.М. Повышение точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2. С. 52–69. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069>
2. Chamoun J., Digonnet M.J.F. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope // *Optics Letters*. 2016. V. 41. N 24. P. 5664–5667. <https://doi.org/10.1364/ol.41.005664>
3. Chamoun J., Digonnet M.J.F. Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 8. P. 1600–1603. <https://doi.org/10.1364/ol.42.001600>
4. Genovese M., Napoli E. Direct digital frequency synthesizers implemented on high end FPGA devices // Proc. of the 9<sup>th</sup> Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). 2013. P. 137–140. <https://doi.org/10.1109/PRIME.2013.6603105>
5. Wang P., Zhang Y., Yang J. Design and implementation of modified DDS based on FPGA // *Procedia Computer Science*. 2018. V. 131. P. 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.212>
6. Ibrahim S.H., Ali S.H.M., Islam M.S. Hardware implementation of 32-bit high-speed direct digital frequency synthesizer // *Scientific World Journal*. 2014. V. 2014. P. 131568. <https://doi.org/10.1155/2014/131568>
7. Liu K., Tian S., Guo G., Xiao Y. Precisely synchronous and cascaded multi-channel arbitrary waveform generator // *Review of Scientific Instruments*. 2017. V. 88. N 3. P. 035110. <https://doi.org/10.1063/1.4978067>
8. Salerno N., Simone L., Cocchi S., Piloni V., Maffei M., Cocciolillo O. Wideband arbitrary waveform generator for enhanced spaceborne sar // Proc. of the 5<sup>th</sup> European Radar Conference, EuRAD. 2008. P. 416–419.
9. Zhang J., Mu F., Shi Q., He X. Design and implementation of multi-channel wideband and RF signal generator // Proc. of the 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, CSE 2014 — Jointly with 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2014, 13<sup>th</sup> International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks, I-SPAN 2014 and 8<sup>th</sup> International Conference on Frontier of Computer Science and Technology, FCST 2014. 2014. P. 1566–1569. <https://doi.org/10.1109/CSE.2014.289>

## Авторы

Кузнецов Владимир Николаевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7565-2466>, [vnkuznetcov@itmo.ru](mailto:vnkuznetcov@itmo.ru)

## References

1. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A., Goryachkin A.M. Fiber-optic gyroscope accuracy improvement by suppressing the parasitic effects in integrated optic phase modulators. *Gyroscope and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 256–267. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040114>
2. Chamoun J., Digonnet M.J.F. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 24, pp. 5664–5667. <https://doi.org/10.1364/ol.41.005664>
3. Chamoun J., Digonnet M.J.F. Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 8, pp. 1600–1603. <https://doi.org/10.1364/ol.42.001600>
4. Genovese M., Napoli E. Direct digital frequency synthesizers implemented on high end FPGA devices. *Proc. of the 9<sup>th</sup> Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 2013, pp. 137–140. <https://doi.org/10.1109/PRIME.2013.6603105>
5. Wang P., Zhang Y., Yang J. Design and implementation of modified DDS based on FPGA. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 131, pp. 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.212>
6. Ibrahim S.H., Ali S.H.M., Islam M.S. Hardware implementation of 32-bit high-speed direct digital frequency synthesizer. *Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, pp. 131568. <https://doi.org/10.1155/2014/131568>
7. Liu K., Tian S., Guo G., Xiao Y. Precisely synchronous and cascaded multi-channel arbitrary waveform generator. *Review of Scientific Instruments*, 2017, vol. 88, no. 3, pp. 035110. <https://doi.org/10.1063/1.4978067>
8. Salerno N., Simone L., Cocchi S., Piloni V., Maffei M., Cocciolillo O. Wideband arbitrary waveform generator for enhanced spaceborne sar. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Radar Conference, EuRAD*, 2008, pp. 416–419.
9. Zhang J., Mu F., Shi Q., He X. Design and implementation of multi-channel wideband and RF signal generator. *Proc. of the 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, CSE 2014 — Jointly with 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2014, 13<sup>th</sup> International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks, I-SPAN 2014 and 8<sup>th</sup> International Conference on Frontier of Computer Science and Technology, FCST 2014*, 2014. P. 1566–1569. <https://doi.org/10.1109/CSE.2014.289>

## Authors

Vladimir N. Kuznetsov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7565-2466>, [vnkuznetcov@itmo.ru](mailto:vnkuznetcov@itmo.ru)

**Литвинов Елисей Викторович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57208316238](https://orcid.org/0000-0002-3889-2628), <https://orcid.org/0000-0002-3889-2628>, [elitvinov@itmo.ru](mailto:elitvinov@itmo.ru)

**Востриков Евгений Владимирович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, [evvostrikov@itmo.ru](mailto:evvostrikov@itmo.ru)

**Дейнека Иван Геннадьевич** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603305268](https://orcid.org/0000-0003-1557-8035), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>, [igdeynea@itmo.ru](mailto:igdeynea@itmo.ru)

**Elisei V. Litvinov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57208316238](https://orcid.org/0000-0002-3889-2628), <https://orcid.org/0000-0002-3889-2628>, [elitvinov@itmo.ru](mailto:elitvinov@itmo.ru)

**Evgenii V. Vostrikov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, [evvostrikov@itmo.ru](mailto:evvostrikov@itmo.ru)

**Ivan G. Deyneka** — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603305268](https://orcid.org/0000-0003-1557-8035), <https://orcid.org/0000-0003-1557-8035>, [igdeynea@itmo.ru](mailto:igdeynea@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 26.01.2022*  
*Одобрена после рецензирования 11.02.2022*  
*Принята к печати 20.03.2022*

*Received 26.01.2022*  
*Approved after reviewing 11.02.2022*  
*Accepted 20.03.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»