

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ В ORCAD

Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), Красноярск, Россия (660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79), [fedor-zograf@ya.ru](mailto:fedor-zograf@ya.ru)

В статье описывается выполненная реализация технологии прямого цифрового синтеза (DDS) сигналов в системе схемотехнического проектирования OrCAD. Предлагаемая методика позволяет формировать сигналы, структурно идентичные сигналам на выходе цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) реальных систем с DDS. Сформированные сигналы обеспечивают исследование их преобразований в различных радиочастотных трактах, используя все возможности аналогово-цифрового моделирования системы OrCAD. В качестве примера использована модель модулятора сигналов с минимальной частотной манипуляцией (MSK), построенная на основе структуры DDS. Приведена схема, описано функционирование и представлены результаты симуляции разработанной модели: цифровые и аналоговые сигналы, спектр выходного сигнала. Представленная модель адекватно воспроизводит основные свойства цифрового синтезатора на основе DDS и проста в настройке. Для управления формой синтезируемого сигнала (в пределах заданной разрядности), как и в реальных системах с DDS, достаточно изменить значения в таблице отсчетов сигнала и коды частот.

Ключевые слова: прямой цифровой синтез, схемотехническое моделирование, OrCAD, PSpice, минимальная частотная манипуляция, МЧМ.

## STEERABLE DIRECT DIGITAL SYNTHESIS ORCAD MODEL

Kuzmin E.V., Zograf F.G.

Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russia (660041, Krasnoyarsk, Svobodny Prospekt, 79), [fedor-zograf@ya.ru](mailto:fedor-zograf@ya.ru)

This article describes the implementation of technology direct digital synthesis (DDS) signals developed in OrCAD program suite. The suggested technique allow to signals conditioning which are structurally-identical to output signals of digital-to-analog converters in real systems with DDS. The shaping signals provide research of their conversions in various radio signal path, using all possibilities of analog and digital simulation of OrCAD system. As an example, the model of the signals modulator with minimum shift keying (MSK), based on DDS structure is used. The scheme of model, simulation results (digital and analog signals, output signal spectrum) of the developed model are presented. The model operation is described. The presented model adequately reproduces main properties of digital frequency synthesizer based on DDS, and is easy to configure. For waveform control of a synthesized signal (within the given digit capacity), as well as in real systems with DDS, it is enough to change values in the lookup table of a signal and the frequency control words.

Keywords: direct digital synthesis, DDS, circuit simulation, OrCAD, PSpice, minimum shift keying, MSK.

### Введение

Технологии прямого цифрового синтеза (DDS – *Direct Digital Synthesis*) частоты получили широкое распространение и применяются в устройствах формирования и обработки сигналов в самых разнообразных отраслях промышленности [6].

Генераторы сигналов на основе DDS реализуют аппаратными или аппаратно-программными средствами, с использованием: ПЛИС, специализированных микросхем DDS, микроконтроллеров. При этом применяют различные средства моделирования и отладки: компьютерное имитационное моделирование на языке VHDL, макетные платы и отладочные наборы, прикладное программное обеспечение производителей микросхем DDS (например, интерактивный программный инструмент ADIsimDDS компании Analog Devices).

Одновременно с этим существует необходимость, еще на этапе проектирования, оценить влияние аналоговых узлов (фильтров, усилителей и т.п.) на качество работы систем с *DDS*, в частности радиоэлектронных систем, использующих сложные сигналы [1-4]. Обозначенную задачу удобнее и проще решать с помощью пакетов, имеющих в своем составе средства схемотехнического моделирования, для чего, прежде всего, необходимо сформировать требуемые сигналы.

Сигнал на выходе генератора *DDS* имеет сложную структуру, в общем случае – это квантованный сигнал (результат работы ЦАП), огибающая которого должна соответствовать заданной форме. Кроме того, в системах радиосвязи и радионавигации форма сигнала зависит от используемого вида модуляции. Построение гибкой аналитической модели такого сигнала, учитывающей разрядность, быстродействие, динамический диапазон ЦАП и закон модуляции несущей, приводит к весьма громоздкому результату.

Наиболее просто получить точную модель сигнала *DDS*-модулятора можно на основе схемотехнической модели. Одним из лидеров в области схемотехнического моделирования является пакет *OrCAD*, в состав которого входит большое число инструментов для моделирования как аналоговых, так и цифровых устройств [9].

Актуальной представляется задача синтеза сигнала непосредственно в *OrCAD*, что предпочтительнее с позиций реализации как можно большего числа этапов проектирования на одной программной платформе и возможности отказа от привлечения иных пакетов программ.

Покажем на примере модели цифрового модулятора *MSK*-сигналов схемотехническую реализацию алгоритма *DDS* средствами *OrCAD*.

*MSK*-сигналы (*Minimum Shift Keying* – минимальная частотная манипуляция) можно представить, как частный случай частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой (ЧМНФ) при индексе манипуляции, равном 0,5. На каждом интервале времени сигнал имеет постоянную огибающую и одну из двух возможных частот  $f_0 \pm 1/4T$ , здесь  $f_0$  – центральная частота спектра сигнала,  $T$  – длительность элемента модулирующей символьной последовательности. *MSK*-сигналы находят широкое применение в современных системах радиосвязи и перспективных радионавигационных системах [8].

### **Структура и параметры модели**

Наиболее распространенная [5-7; 10] на сегодняшний день структура *DDS* гармонического сигнала (рис. 1) включает следующие основные блоки: аккумулятор фазы (накапливающий сумматор), преобразователь выходного кода аккумулятора фазы в коды мгновенных значений амплитуды сигнала (обычно ПЗУ, содержащий таблицу отсчетов сигнала), ЦАП. Описание принципов работы приведенной структуры *DDS* приведено, например, в [5].

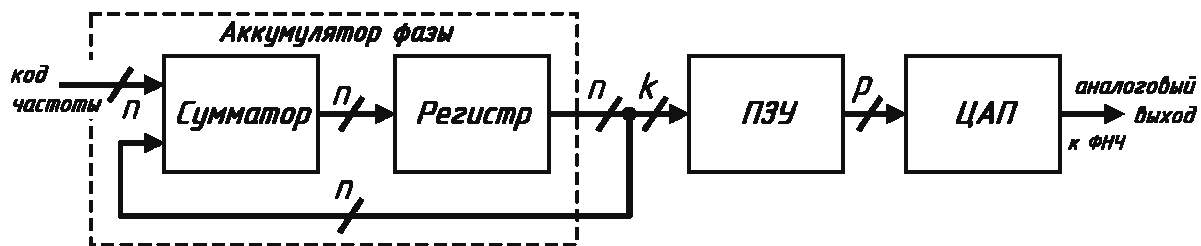


Рис. 1. Структура DDS

Для примера использована структура DDS сравнительно небольшой разрядности. Разрядность ЦАП – 8 бит, тогда в ПЗУ необходимо иметь  $2^8 = 256$  отсчетов сигнала. Разрядности адресной ( $k$ ) и выходной шины ( $p$ ) ПЗУ также 8 бит. Разрядность аккумулятора фазы составляет 16 бит, таким образом,  $n$  – разрядности шин сумматора, регистра и разрядность «кода частоты» - также 16 бит. Тактовая частота DDS – 250 МГц.

Параметры генерируемого сигнала: MSK-сигнал единичной амплитуды,  $f_0 = 1$  МГц,  $T = 1$  мкс, тогда верхняя и нижняя частоты сигнала равны соответственно 1,25 МГц и 0,75 МГц, входной модулирующий сигнал – псевдослучайная последовательность (ПСП) [3] структуры  $M\{14, 10, 06, 01\}$ .

Выходная частота DDS определяется по формуле [5]:

$$f_{OUT} = \frac{M \cdot f_{CLK}}{2^n}, \quad (1)$$

где  $M$  – «код частоты», модуль счета аккумулятора фазы,  $f_{CLK}$  – тактовая частота DDS,  $n$  – разрядность аккумулятора фазы.

В соответствии с (1), «коды частот»: для «верхней» частоты MSK-сигнала –  $M_B = (328)_{10} = (101001000)_2 = (148)_{16}$  и  $M_H = (197)_{10} = (11000101)_2 = (0C5)_{16}$  – для «нижней» частоты.

Разрешение по частоте составит:  $\Delta f_{OUT} = f_{CLK} / 2^n = 3,8147$  кГц.

Конечно, MSK-модулятор, построенный на DDS такой разрядности, будет недостаточно точный для большинства задач связи и радионавигации, и его выходной сигнал будет иметь значительные скачки фазы. Однако использование DDS с описанными параметрами в качестве демонстрационного примера, для компактного представления основной идеи, вполне оправданно.

### Реализация модели

Регистр (рис. 2а) в составе аккумулятора фазы построен из двух восьмиразрядных регистров (модель регистра – 74273, библиотека «EVAL»). На входы CLK поступает тактирующая последовательность (сигнал тактовой частоты DDS).

Сумматор (рис. 2б) аккумулятора фаз реализован на стандартных элементах «ADD8» библиотеки «DIG\_PRIM». Выход переноса – COUNT, вход расширения CIN.

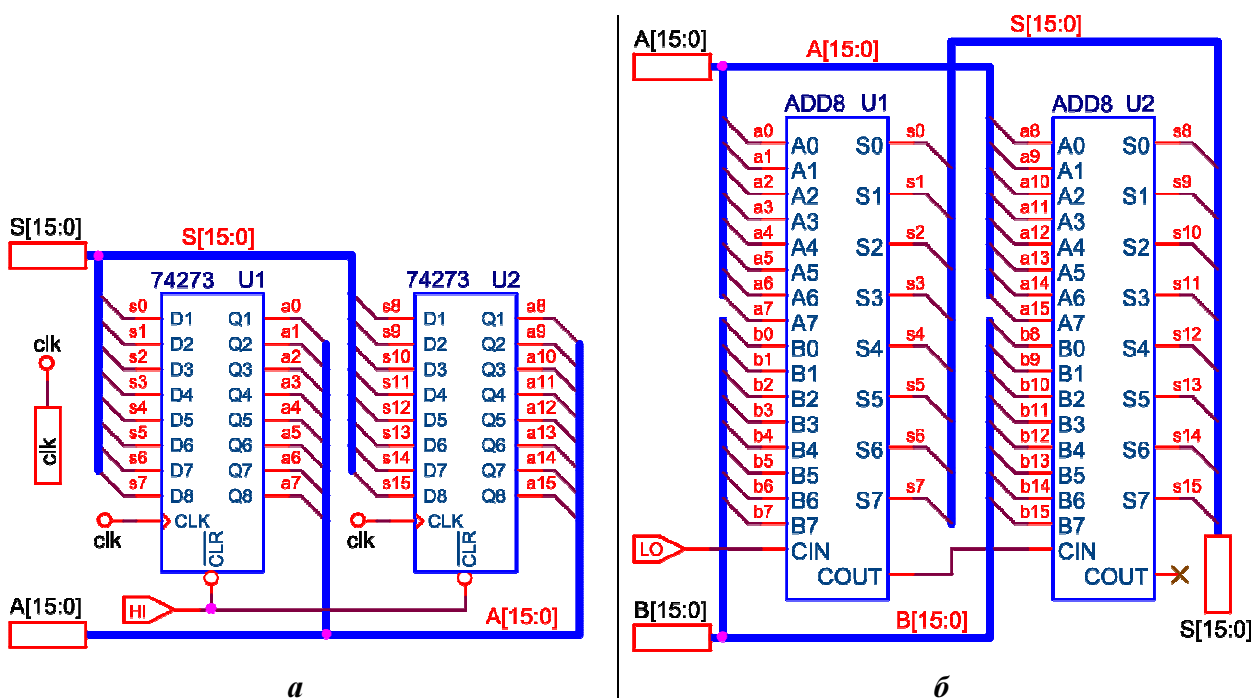


Рис. 2. Шестнадцатиразрядные регистр (а) и сумматор (б) в OrCAD

Вся модель *MSK*-модулятора на основе *DDS* показана на рис. 3.

Цифро-аналоговое преобразование реализовано элементом «*DAC8break*» (на схеме *U3*) из библиотеки «*BREAKOUT*», представляющим собой восьмиразрядный ЦАП. Источник *V1* задает опорное напряжение ЦАП, а *V2* - необходимое смещение для получения двухполярного сигнала (в приведенном примере размах выходного напряжения ЦАП составляет  $\pm 1$  В).

В качестве элемента памяти *DDS*-модулятора (на схеме *U2*) использована модель ПЗУ (элемент «*ROM32KX8break*», библиотека «*BREAKOUT*»), которая позволяет считывать значения отчетов колебания либо из *HEX*-файла, либо непосредственно из *spice*-модели элемента. Для хранения таблицы с отсчетами использовано 8 бит младших адресов ПЗУ.

Иерархические блоки *SUM16* и *REG16* (рис. 3) это, соответственно, сумматор и регистр в составе аккумулятора фазы (схемы показаны на рис. 2). Сам аккумулятор имеет 16 разрядов, для адресации к таблице отчетов использованы 8 старших бит шины. Регистр тактируется синхроимпульсами от источника *CLK* (элемент «*DigClock*», библиотека «*SOURCE*»), частота следования импульсов – 250 МГц (тактовая частота *DDS*).

Еще один элемент «*ROM32KX8break*» (на схеме *U1*) использован для хранения «кодов частот». В ПЗУ занято две 16-битные ячейки, содержащие значение модуля счета аккумулятора фазы для верхней и нижней частоты *MSK*-сигнала. Для адресации используется 1 бит. Переключением «кодов частот» (сменой адреса в ПЗУ) управляет источник *PSP\_test* (элемент «*DigStim*», библиотека «*SOURCSTM*»), считывающий модулирующую символьную последовательность из файла сигнала.

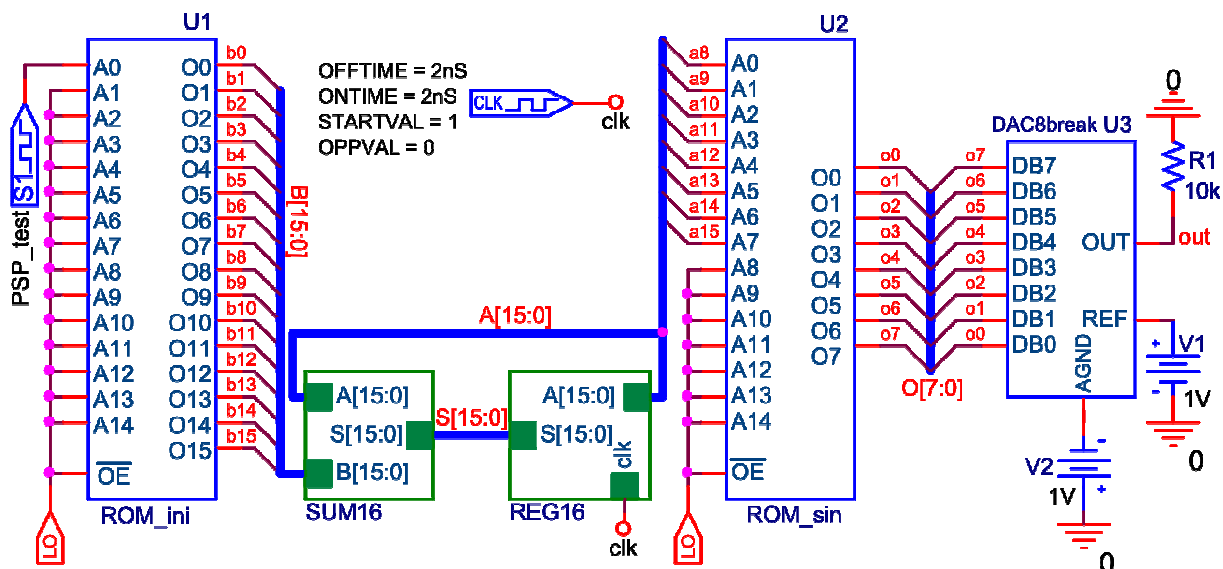


Рис. 3. Шестнадцатизрядный регистр в OrCAD

(символ и модель компонента  $U1$  изменены, увеличена разрядность шины данных)

Ниже представлены результаты симуляции разработанной модели в OrCAD. На рис. 4 показаны диаграммы работы DDS-модулятора в интервале от 20 до 40 мкс.

На вход ПЗУ  $U1$  поступает модулирующая символьная последовательность  $psp$ . В соответствии с  $psp$  меняется адрес ячейки ПЗУ и на шине данных  $B$  выставляется код соответствующей частоты (на рис. 4 сигнал  $code$  представлен в десятичном формате). Выходной сигнал модулятора обозначен  $V(out)$ .

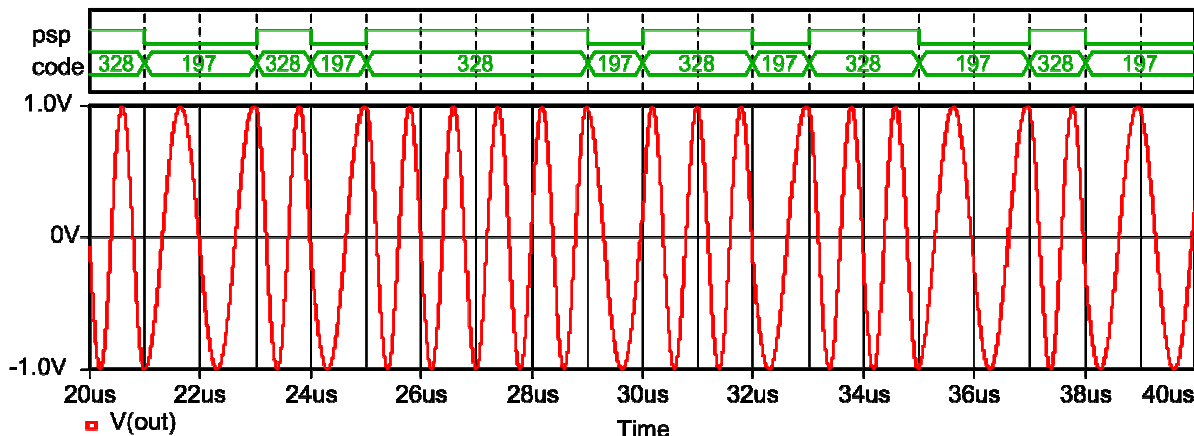
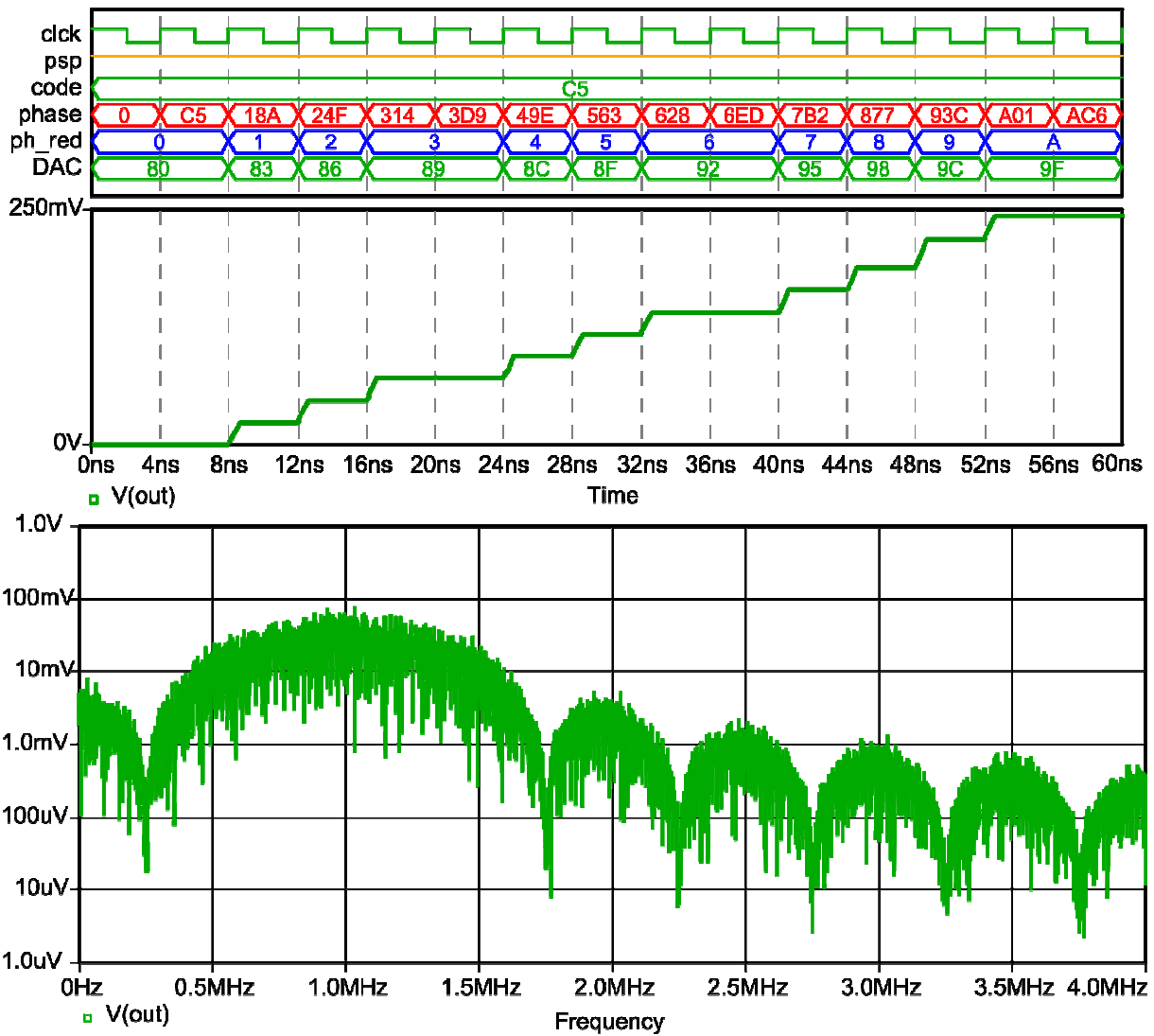


Рис. 4. Диаграммы работы DDS-модулятора (интервал от 20 до 40 мкс)

На рис. 5 показаны диаграммы работы DDS-модулятора в первые 60 нс и спектр MSK-сигнала на выходе DDS-модулятора. Тактирующий сигнал –  $clk$ , модулирующая символьная последовательность –  $psp$ , сигнал шины  $B$  –  $code$ , сигнал шины  $A$  (полный код фазы) –  $phase$ , усеченный код фазы, поступающий на адресную шину ПЗУ  $U2$  –  $ph_red$ , с ПЗУ  $U2$  на ЦАП поступают значения амплитуд колебания –  $DAC$ , выходной сигнал ЦАП –  $V(out)$ .



**Рис. 5.** Диаграммы работы *DDS*-модулятора (интервал от 0 до 60 нс) и спектр *MSK*-сигнала на выходе *DDS*-модулятора

Амплитудный спектр результирующего шумоподобного *MSK*-сигнала получен в результате симуляции разработанной модели *DDS*-модулятора. Спектр сигнала получен в программе *PSpice A/D*, время анализа – 16383 мкс (один период ПСП), максимальный шаг интегрирования – 1 нс.

В заключение отметим, что в *PSpice* разработчик может менять параметры динамической модели ЦАП, настраивая время установления сигналов на выходах. Кроме того, возможен выбор и настройка моделей цифро-аналоговых интерфейсов с указанием выходной емкости и выходных сопротивлений ЦАП.

### **Выводы**

Разработана и выполнена в системе *OrCAD* функционально-схемная модель генератора сигналов на основе технологии прямого цифрового синтеза частоты.

Модель реализована на примере модулятора *MSK*-сигналов и обеспечивает формирование сигналов для исследования их прохождения по различным радиочастотным трактам, используя все возможности аналогово-цифрового моделирования системы *OrCAD*.

Представленные результаты симуляции свидетельствуют о правильном функционировании разработанной модели.

Функционально-схемная реализация технологии *DDS* именно в *OrCAD* дает возможность разработчику изменять параметры сигнала непосредственно в пакете, без обращения к сторонним программным средствам, сокращая тем самым трудоемкость и сроки разработки.

Разработанная модель позволяет получать сигналы, структурно идентичные сигналам на выходе ЦАП реальных *DDS*-систем.

Модель будет полезна специалистам, решающим конкретные задачи в области разработки радиоэлектронных систем и использующим в своей работе методы и средства схемотехнического проектирования и моделирования. Модель также может использоваться при изучении дисциплин, затрагивающих вопросы цифровой передачи данных, компьютерного моделирования электронных средств.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в базовой части НИР, выполняемых по государственному заданию в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».*

### Список литературы

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопапов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / под ред. В.И. Борисова. - М. : РадиоСофт, 2011. – 550 с.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М. : Радио и связь, 1985. - 384 с.
3. Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г. Параметризованная модель генератора псевдослучайных последовательностей в OrCAD [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. - 2013. - № 2. - URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1766> (дата обращения: 28.02.2014).
4. Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г., Вепринцев В.И., Былкова Г.К., Бауточко А.В. Анализ частотных характеристик полосно-пропускающего фильтра в составе программно-аппаратного комплекса перспективной радионавигационной системы [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 2. - URL: [www.science-education.ru/108-8730](http://www.science-education.ru/108-8730) (дата обращения: 28.02.2014).

5. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. - 2001. - № 7. - С. 50-54.
6. Рябов И.В., Юрьев П.М. Системы синтеза частот и сигналов как основные функциональные узлы современных радиоэлектронных средств // Вестник МарГТУ. Серия Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2009. - № 2. - С. 22-34.
7. Goldberg B-G. Digital frequency synthesis demystified. - LLN Technology Publishing, 1999. - 336 p.
8. Kuzmin E.V. Development and experimental investigation of digital MSK-signal receiver // IX International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON – 2011). Proceedings. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15–16. - 2011. - P. 67-70.
9. Tobin P. PSpice for Digital Communications Engineering. - Morgan & Claypool, 2007. - 214 p.
10. Vankka J., Halonen K. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. - New York: Springer-Verlag, LLC, 2001. - 216 p.

**Рецензенты:**

Громько А.И., д.т.н., профессор кафедры «Инфокоммуникации» ИИФиРЭ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Алдонин Г.М., д.т.н., профессор кафедры «Приборостроение и наноэлектроника» ИИФиРЭ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.