

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2024-3-73-79

УДК 621.373

ЦИФРОВЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рябов Игорь Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС
Поволжского государственного технологического университета.

E-mail: ryabov22@mail.ru

Буканова Татьяна Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и производства ЭВС
Поволжского государственного технологического университета.

Макаров Алексей Евгеньевич

аспирант кафедры проектирования и производства ЭВС Поволжского государственного
технологического университета.

Алексеев Николай Олегович

аспирант кафедры проектирования и производства ЭВС Поволжского государственного
технологического университета.

Адрес: 424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3.

Аннотация: В статье рассмотрены новые структуры цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС), предназначенных для работы в составе адаптивной системы связи в качестве модулятора передатчика и гетеродина приёмника. Описан состав и принцип работы ЦВС. Достоинством данных цифровых вычислительных синтезаторов является то, что повышается помехоустойчивость и скрытность передачи информации в системах связи. Предложенные ЦВС позволяют проводить независимую амплитудную, частотную и фазовую модуляцию.

Ключевые слова: цифровой вычислительный синтезатор, регистр памяти, цифровой накопитель, функциональный преобразователь, делитель с переменным коэффициентом деления, сумматор, ЦАП, ФНЧ, эталонный генератор, блок формирования и задержки.

Введение

Синтезом частот называют процесс формирования одного или нескольких стабильных по частоте периодических колебаний с заданными значениями частоты. Эти колебания синтезируются из одного опорного колебания путём различных преобразований. Источник опорного колебания именуют опорным генератором (ОГ), а его частоту - опорной частотой.

Синтезатор частот — это система синтеза частот (ССЧ), конструктивно оформленная в виде функционально законченного устройства (блока, узла, платы, модуля, микросхемы). В таких синтезаторах точность и стабильность

выходных частот определяются опорным генератором.

Технические устройства, которые осуществляют синтез частот, называют системами синтеза частот [1].

ССЧ характеризуются множеством параметров. К основным из них, в первую очередь определяющим качество синтезатора, его габариты, массу и стоимость, относятся [2]:

- диапазон сетки частот,
- шаг сетки частот,
- время установки частоты,
- чистота спектра выходных колебаний,
- нестабильность частоты выходных колебаний.

Известные цифровые вычислительные синтезаторы формируют только ЛЧМ-сигнал с заданными свойствами и не позволяют формировать сложные частотно-модулированные сигналы, которые можно использовать для передачи информации [3].

Цель работы заключается в том, чтобы представить новые структуры цифровых вычислительных синтезаторов, позволяющие синтезировать сложные частотно-модулированные сигналы.

Для этого в работе ставились и решались следующие задачи:

1. Разработать структуру цифрового вычислительного синтезатора и его описание.
2. Разработать структуру цифрового вычислительного синтезатора сложных широкополосных ЧМ сигналов и описание его работы.

Предлагаемый цифровой вычислительный синтезатор формирует сложный частотно-модулированный сигнал, который можно использовать в адаптивных системах связи и телекоммуникациях для передачи информационного сигнала в режиме ЛЧМ [4].

Синтезаторы прямого цифрового синтеза частот обладают рядом преимуществ по сравнению с синтезаторами с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Во-первых, в них практически отсутствуют переходные процессы, что определяет их высокое быстродействие. Во-вторых, архитектура цифровых синтезаторов прямого синтеза частот позволяет с меньшими затратами изготавливать их в интегральном исполнении, в том числе и в виде макросов для ПЛИС. В-третьих, это наиболее дешёвые и технологичные синтезаторы. Особенно удобно применение синтезаторов прямого синтеза в качестве перестраиваемых генераторов, систем демодуляции ЧМ- и ФМ-сигналов, квадратурных систем и т. д. Перспективно использование ЦВС в системах управления диаграммой направленности антенных решёток.

ЦВС обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими видами синтезаторов:

- в ЦВС практически отсутствуют пере-

ходные процессы, что определяет быстродействие синтезаторов; для современных синтезаторов время переключения с одной частоты на другую – менее 10 нс;

- ЦВС позволяют обеспечить высокую разрешающую способность: шаг сетки частот составляет менее 0,1 Гц;
- архитектура ЦВС позволяет значительно проще выполнять их в интегральном исполнении, чем синтезаторы с системой ФАПЧ. Это наиболее дешёвые и технологичные синтезаторы.

При прямом цифровом синтезе обеспечиваются высокая скорость перестройки частоты, высокая разрешающая способность, низкий уровень фазовых шумов [5].

Разрешение ЦВС по частоте данного типа определяется как

$$\Delta f = f_m / 2^n,$$

где n — разрядность накопителя частоты; f_m — тактовая частота.

Цифровой накопитель многоуровневого ЦВС формирует код циклической фазы, который поступает на функциональный преобразователь, в котором отсчётам фазы ставятся в соответствие отсчёты амплитуды синтезируемого колебания. Далее после ЦАП получается требуемое аналоговое колебание, которое далее подвергается низкочастотной фильтрации при помощи ФНЧ.

Если обозначить через n_a число выборок по амплитуде, а через n_ϕ — число выборок по фазе, то при $n_\phi > n_a$,

$$D = 4 + 6 \log_2 n_a.$$

Для получения отношения сигнал-шум $D > 75$ дБ надо иметь 12-разрядный ЦАП и ФНЧ не меньшей разрядности.

Цифровой вычислительный синтезатор линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов содержит (рис. 1) первый регистр памяти 1, второй регистр памяти 2, цифровой накопитель частоты 3, сумматор 4, цифровой накопитель фазы 5, функциональный преобразователь код-синус 6, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) 7, фильтр низких частот 8, третий регистр памяти 9, делитель с перемен-

ным коэффициентом деления 10, эталонный генератор 11, блок формирования и задержки 12 [6].

Цифровыми входами цифрового вычислительного синтезатора являются входы первого, второго и третьего регистров памяти, а его аналоговым выходом — выход ФНЧ.

Цифровой вычислительный синтезатор работает следующим образом.

Эталонный генератор 11 формирует синусоидальный сигнал опорной частоты, из которого в блоке формирования и задержки 12 формируются последовательности тактовых импульсов формы «меандр», служащие для синхронизации работы основных узлов цифрового синтезатора: делителя с переменным коэффициентом деления, цифрового накопителя фазы и ЦАП.

Пусть в момент t_0 на вход регистра памяти 1 поступает код начальной частоты A_i , а на вход второго регистра памяти 2 — код B_j .

В момент времени t_1 код A_i из регистра памяти 1 записывается в цифровой накопитель частоты 2 и поступает на первый вход сумматора 4, а код B_j поступает на второй вход сумматора 4.

На вход третьего регистра памяти 9 поступает код D_k , который определяет коэффициент деления делителя частоты 10.

В цифровом накопителе частоты 3 результат суммирования будет описываться формулой

$$S0 = A_i \times T / D_k. \quad (1)$$

Далее, с каждым последующим тактовым импульсом, начиная с момента t_3 , результат суммирования в сумматоре 4 будет изменяться по формуле:

$$S1 = A_i \times T / D_k + B_j. \quad (2)$$

Далее результат суммирования $S1$ поступает на вход цифрового накопителя фазы 5, где

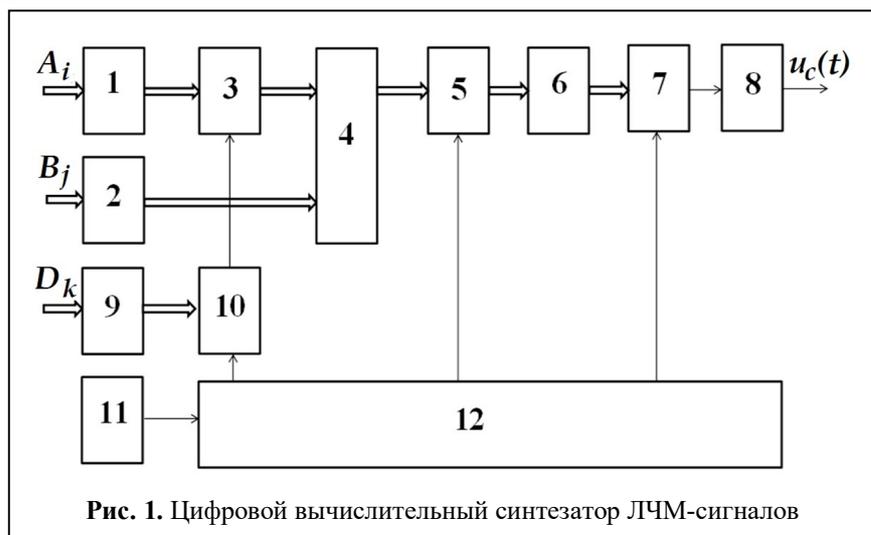


Рис. 1. Цифровой вычислительный синтезатор ЛЧМ-сигналов

результат суммирования изменяется по формуле

$$S2 = (A_i \times T / D_k + B_j) \times T. \quad (3)$$

Далее сумма $S2$ поступает на вход функционального преобразователя 6, где он преобразуется в код $\sin\{(A_i \times T / D_k + B_j) \times T\}$.

Затем код синуса подаётся на ЦАП 7, где формируется «ступенчатый» частотно-модулированный сигнал, описываемый формулой:

$$u_c(t) = U_0 \sin(2\pi f_\Sigma + f^{\cdot} \cdot t^2), \quad (4)$$

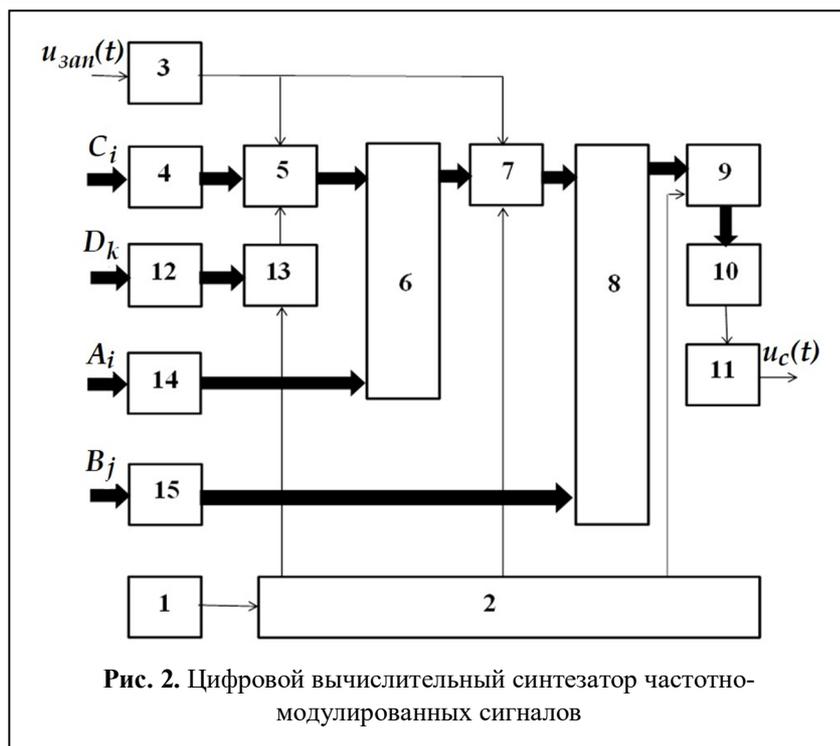
где U_0 — амплитуда сигнала; $\Delta t = T$ — тактовый интервал; f_Σ — суммарная частота сигнала; f^{\cdot} — скорость перестройки частоты ЛЧМ сигнала.

Таким образом, первый регистр памяти 1 обеспечивают формирование начальной частоты ЛЧМ сигнала, второй регистр памяти 2 — формирование закона модуляции частоты по информационному сигналу.

Следовательно, в данном ЦВС возможно передавать информационные сообщения в режиме ЛЧМ [7].

Цифровой вычислительный синтезатор частотно-модулированных сигналов

Данный цифровой вычислительный синтезатор предназначен для формирования сигналов с фазовой и частотной модуляцией и может использоваться в адаптивных системах связи и телекоммуникациях [3].



Цифровой синтезатор фазомодулированных сигналов (рис. 2) содержит эталонный генератор 1, блок задержки 2, ждущий мультивibrator 3, блок постоянного запоминания 4, первый цифровой накопитель 5, первый сумматор 6, второй цифровой накопитель 7, второй сумматор 8, преобразователь кодов 9, цифроаналоговый преобразователь 10, фильтр нижних частот 11, первый регистр памяти 12, делитель с переменным коэффициентом деления 13, второй регистр памяти 14, третий регистр памяти 15.

Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов работает следующим образом. Эталонный генератор 1 выдаёт сигнал тактовой частоты f_0 синусоидальной формы, который поступает на вход блока задержки 2, формирующий разнесенные во времени последовательности прямоугольных импульсов формы «меандр», поступающие на тактовые входы первого, второго, третьего регистров памяти 12, 14, 15, ДПКД 13, первого и второго цифровых накопителей 5 и 7, ЦАП 10, служащие для синхронизации работы синтезатора.

Пусть в момент t_1 приходит импульс запуска положительной полярности на вход ждуще-

го мультивибратора 3, который формирует импульс установки отрицательной полярности, поступающий на установочные входы первого и второго цифровых накопителей 5 и 7, делителя с переменным коэффициентом деления 13.

В момент t_2 происходит запись кодов: C_i — в первый цифровой накопитель 5 в зависимости от адресного кода на входе блока постоянного запоминания 4; D_k — в первый регистр памяти 12; A_j — во второй регистр памяти 14; B_l — в третий регистр памяти 15.

По окончании импульса установки код суммы $(C_i + A_j)$ с выходов первого сумматора 6 поступает на вход второго накопителя 7, а код D_k записывается в делитель с переменным коэффициентом деления 13.

В момент t_3 происходит запись кода суммы с выходов второго цифрового накопителя 7 на первый вход второго сумматора 8, на вторые входы которого поступает код B_l из третьего регистра памяти 15.

По следующим тактовым импульсам результат суммирования на выходе первого цифрового накопителя 5 будет изменяться по формуле:

$$S1 = C_i + T/D_k. \quad (5)$$

На выходе первого сумматора 6 результат будет изменяться следующим образом:

$$S2 = C_i + T/D_k + A_j \quad (6)$$

Тогда на выходе второго цифрового накопителя 7 результат суммирования будет изменяться по формуле:

$$S3 = (C_i + T/D_k + A_j)T = (C_i + A_j)T + T^2/D_k. \quad (7)$$

На выходе второго сумматора 8 код суммы будет изменяться следующим образом:

$$S4 = (C_i + A_j)T + T^2/D_k + B_l. \quad (8)$$

Старший разряд кода суммы $S4$ служит для управления инверсией преобразователя кодов

9. Если $S_{SGN} = 0$, то на ЦАП поступает прямой код суммы, а если $S_{SGN} = 1$, то обратный код суммы S_4 .

С выхода ЦАП 10 аналоговый сигнал «ступенчатой» формы поступает на фильтр нижних частот 11, который пропускает на свой выход только первую гармонику синтезированного сигнала.

Если принять, что $\omega_n = C_i + A_j$ — начальная циклическая частота синтезируемого сигнала; $\omega' = 1 / D_k$ — скорость изменения циклической частоты сигнала; $\varphi_0 = B_l$ — начальная фаза синтезируемого сигнала, то на выходе фильтра нижних частот 11 сигнал будет описываться следующей формулой:

$$u_c(t) = U_m \sin(\omega_n t + 0,5\omega' t^2 + \varphi_0), \quad (9)$$

где U_m — амплитуда выходного сигнала синтезатора.

Если $A_j = 0$ и $B_l = 0$, то синтезатор будет формировать сигнал с линейной частотной модуляцией. Изменяя коды A_j и B_l на входах второго и третьего регистров памяти 14 и 15, можно модулировать выходной сигнал синтезатора соответственно по частоте и по фазе.

Данный синтезатор может быть использован при проектировании возбудителей передатчиков с цифровым управлением частотой и фазой синтезируемых колебаний для перспективных адаптивных систем радиосвязи и обладает расширенными функциональными возможностями по сравнению с другими видами синтезаторов [16, 17].

Временные диаграммы работы ЦВС представлены на рис. 3, из которых видно, что сигнал на выходе АЦП имеет «ступенчатую» форму. Далее этот сигнал поступает на ФНЧ, где происходит выделение первой гармоники формируемого сигнала.

Спектрограмма ЧМ-сигнала представлена на рис. 4.

Как можно видеть из представленной спектрограммы, отношение сигнал/шум для основной гармоники

синтезированного сигнала, составляет > 60 дБ [9, 10].

Заключение

Предложенные цифровые вычислительные синтезаторы позволяют формировать сложные частотно-модулированные сигналы, которые можно использовать для передачи информации в адаптивных системах связи и телекоммуникациях и системах навигации [11–13, 18].

При частоте опорного генератора 1 ГГц диапазон синтезируемых частот составляет 0,001–250 МГц при шаге сетки частот 0.01 Гц. Преимущество представленных ЦВС состоит в том, что повышается помехоустойчивость и скрытность передачи информации в режиме ЛЧМ [14–17].

Литература

1. Ямтурин Н.П. и др. Формирование прецизионных частот и сигналов. Учебное пособие. ННГТУ, 2003. 210 с.
2. Белов Л.А. Радиоэлектроника: Формирование стабильных частот и сигналов. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд. перераб. и доп. М: Юрайт. 2018. 242 с.
3. Рябов И.В. Прямой цифровой синтез сложных широкополосных сигналов в задачах радиолокации, навигации и связи. Монография. Йошкар-Ола, ПГТУ, 2016. 152 с.
4. Патент РФ № 2358384. МПК H03L 7/18. Цифровой синтезатор частотно-и фазомодулированных сигналов / Рябов И.В., Юрьев П.М. Заявл. 31.05.2007. Оpubл. 18.06.2009. Бюл. № 16. 6 с.
5. Патент РФ № 2204197. МПК H03L 7/18.

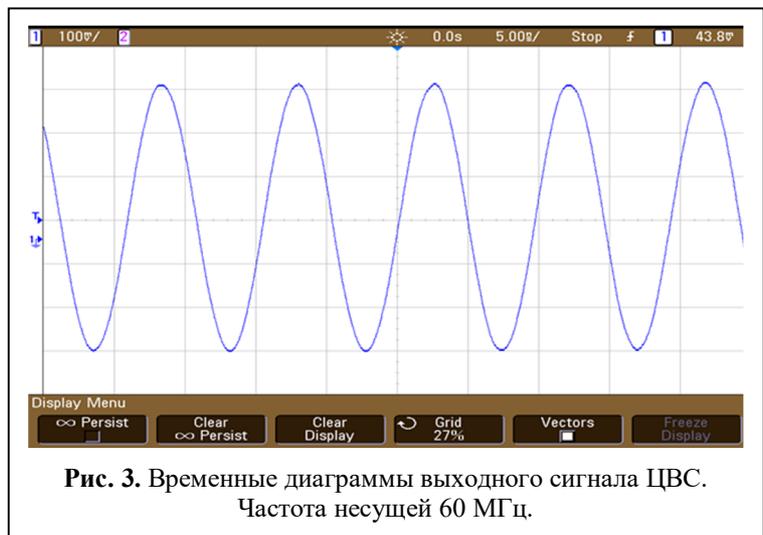


Рис. 3. Временные диаграммы выходного сигнала ЦВС. Частота несущей 60 МГц.

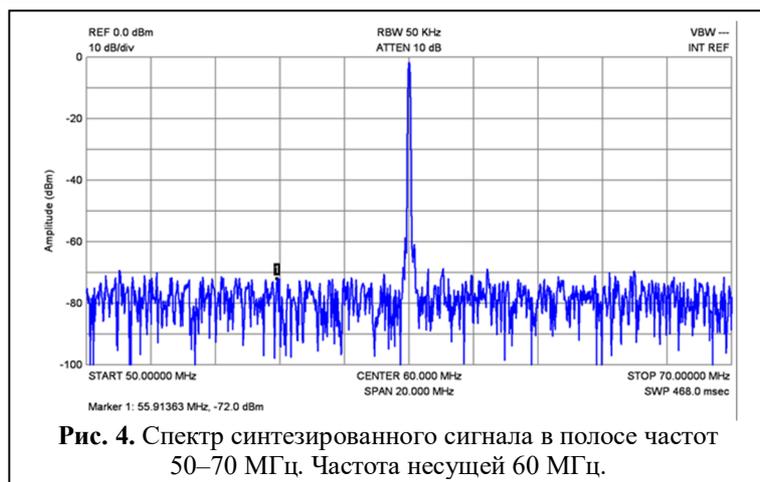


Рис. 4. Спектр синтезированного сигнала в полосе частот 50–70 МГц. Частота несущей 60 МГц.

Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов / *Рябов И.В., Рябов В.И.* Заявл. 06.04.2001. Оpubл. 10.05.2003. Бюл. № 13. 6 с.

6. Патент РФ № 2149503. МПК H03L 7/18. Цифровой синтезатор частот / *Рябов И.В., Рябов В.И., Голуб Д.В.* Заявл. 13.04.1999. Оpubл. 20.05.2000. Бюл. № 14. 7 с.

7. Патент РФ № 2710280. МПК H03L 7/18. Цифровой синтезатор двухчастотных сигналов / *Рябов И.В., Бочкарев Д.Н., Стрельников И.В., Дегтярев Н.В., Ключев Е.С.* Заявл. 18.04.2019. Оpubл. 25.12.2019. Бюл. № 36. 7 с.

8. Патент РФ № 2718461. МПК H03L 7/18. Цифровой вычислительный синтезатор частотно-модулированных сигналов / *Рябов И.В., Бочкарев Д.Н., Стрельников И.В., Дегтярев Н.В.* Заявл. 12.09.2019. Оpubл. 19.05.2020. Бюл. № 13. 5 с.

9. *Рябов И.В.* Метод прямого цифрового синтеза прецизионных сигналов // *Радиотехника*. 2006. № 9. С. 13–16.

10. *Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А.* Цифровой вычислительный синтезатор сложных широкополосных сигналов // *Приборы и техника*

эксперимента. 2014. №4. С. 49–54.

11. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* A Direct digital synthesizer of compound wideband signals // *Instruments and Experimental Techniques*. 2014. Vol. 57. No. 4. Pp. 420–425.

12. *Рябов И.В., Юрьев П.М.* Рекурсивный синтезатор частот для формирования сигналов с линейной частотной модуляцией // *Фундаментальные исследования*. 2012. №9. С. 685–689.

13. *Рябов И.В., Юрьев П.М., Толмачев С.В.* Методы повышения быстродействия цифровых вычислительных синтезаторов // *Радиотехника*. 2013. №9. С. 44–52.

14. *Рябов И.В., Стрельников И.В., Юрьев П.М., Дегтярев Н.В.* Цифровой вычислительный синтезатор сложных сигналов // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. №6. С. 25–33.

15. *Ryabov I.V., Strelnikov I.V., Yuriev P.M., Degtyarev N.V.* A direct digital synthesizer of complex signals // *Instruments and Experimental Techniques*. 2018. Vol. 61, No. 6. Pp. 788–795.

16. *Рябов И.В., Толмачев С.В.* Аппаратно-программный комплекс для организации связи в полярных широтах // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2020. №3. С. 58–63.

17. *Рябов И.В., Толмачев С.В., Лебедева А.А.* Аппаратно-программный комплекс для обнаружения метеорных следов с изменяемой полосой пропускания // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2016. №4. С. 66–75.

18. *Рябов И.В., Чернов Д.А.* Повышение точности позиционирования подвижных объектов при помощи сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2015. №2. С. 43–53.

Поступила 1 июля 2024 г.

English

DIGITAL SYNTHESIZERS OF FREQUENCY-MODULATED SIGNALS FOR TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Igor Vladimirovich Ryabov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Volga State University of Technology.

E-mail: iryabov40@gmail.com

Tatyana Sergeevna Bukanova — PhD, Associate Professor, the Head of the Department of Design and Production of Electronic Computational Devices, Volga State University of Technology.

Alexey Evgenjevich Makarov — Post-graduate Student, Volga State University of Technology.

Nikolay Olegovich Alekseev — Post-graduate Student, Volga State University of Technology.

Address: 424000, Russian Federation, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3.

Abstract: A frequency synthesizer is a frequency synthesis system structurally designed as a stand-alone unit. The signal is generated from a single reference oscillation through various transformations. Direct digital synthesis ensures high-speed frequency tuning, high-resolution capability and low-level phase noise. The known direct digital synthesizers (DDS) generate only LFM signals with tailored properties and do not let generating aggregated frequency-modulated signals that can be used to transmit information in telecommunications. This article reviews new structures of direct digital synthesizers meant to operate as part of telecommunication and adaptive communication systems. DDS content and its operational principle are described. The proposed DDS advantage is having ultra-low frequency spacing and high-speed frequency agility unlike PLL-based (phase-locked loop) synthesizers. The known direct digital synthesizers (DDS) generate only LFM signals with tailored properties and do not let generating aggregated frequency-modulated signals that can be used to transmit information in telecommunications. Multi-level DDS digital storage generates a cyclic phase code, which comes onto the function converter where amplitude readings of the synthesized oscillation are assigned to phase readings. Next after the required analog oscillation is obtained after the digital-to-analog converter (DAC) it further undergoes low-frequency filtering by LFF. The advantage of the above DDS is increased noise immunity and data transmission security.

Keywords: direct digital synthesizer, memory register, digital storage, function converter, variable-ratio divider, adder, DAC, LFF, reference oscillator, generation and delay unit.

References

1. *Yampurin N.P.* et al. Formation of precision frequencies and signals. (Tutorial). NNSTU, 2003. 210 p.
2. *Belov L.A.* Radio electronics: Formation of stable frequencies and signals. Textbook for bachelor's and master's degrees. the 2nd edition, updated and revised. Moscow: Yurayt. 2018. 242 p.
3. *Ryabov I.V.* Direct digital synthesis of complex broadband signals in radar, navigation and communications problems (monograph). Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology, 2016. 152 p.
4. RU Patent No. 2358384. IPC H03L 7/18. Digital synthesizer of frequency and phase modulated signals. *Ryabov I.V., Yuriev P.M.* Appl. 31.05.2007. Publ. 18.06.2009. Bull. No. 16. 6 p.
5. RU Patent No. 2204197. IPC H03L 7/18. Digital synthesizer of frequency-modulated signals. *Ryabov I.V., Ryabov V.I.* Appl. 06.04.2001. Publ. 10.05.2003. Bull. No. 13. 6 p.
6. RU Patent No. 2149503. IPC H03L 7/18. Digital frequency synthesizer. *Ryabov I.V., Ryabov V.I., Golub D.V.* Appl. 13.04.1999. Publ. 20.05.2000. Bull. No. 14. 7 p.
7. RU Patent No. 2710280. IPC H03L 7/18. Digital synthesizer of dual-frequency signals. *Ryabov I.V., Bochkarev D.N., Strelnikov I.V., Degtyarev N.V., Klyuzhev E.S.* Appl. 18.04.2019. Publ. 25.12.2019. Bull. No. 36. 7 p.
8. RU Patent No. 2718461. IPC H03L 7/18. Direct digital synthesizer of frequency-modulated signals. *Ryabov I.V., Bochkarev D.N., Strelnikov I.V., Degtyarev N.V.* Appl. 09.12.2019. Publ. 19.05.2020. Bull. No. 13. 5 p.
9. *Ryabov I.V.* Method of direct digital synthesis of precision signals. Radio engineering, 2006. No. 9. Pp.13–16.
10. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* Direct digital synthesizer of complex broadband signals. Instruments and experimental techniques. 2014. No. 4. Pp. 49–54.
11. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* A direct digital synthesizer of compound wideband signals. Instruments and Experimental Techniques. 2014 Vol. 57, No. 4. Pp. 420–425.
12. *Ryabov I.V., Yuryev P.M.* Recursive frequency synthesizer for generating signals with linear frequency modulation. Fundamental Research. 2012. No. 9-3. Pp. 685–689.
13. *Ryabov I.V., Yuryev P.M., Tolmachev S.V.* Methods for increasing the performance of direct digital synthesizers. Radio engineering. 2013. No. 9. Pp. 44–52.
14. *Ryabov I.V., Strelnikov I.V., Yuriev P.M., Degtyarev N.V.* Direct digital synthesizer of complex signals. Instruments and experimental techniques. 2018. No. 6. Pp. 25–33.
15. *Ryabov I.V., Strelnikov I.V., Yuriev P.M., Degtyarev N.V.* A direct digital synthesizer of complex signals. Instruments And Experimental Techniques. 2018. Vol. 61. No. 6. Pp. 788–795.
16. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V.* Hardware and software complex for communication in polar latitudes. Radio and telecommunication systems. 2020. No. 3. Pp. 58–63.
17. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Lebedeva A.A.* Hardware and software complex for detecting meteor trails with a variable launch band. Radio and telecommunication systems. 2016. No. 4. Pp. 66–75.
18. *Ryabov I.V., Chernov D.A.* Improving the accuracy of positioning mobile objects using signals from global navigation satellite systems. Radio engineering and telecommunication systems. 2015. No. 2. Pp. 43–53.