

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2023-1-61-69

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ ДЖИТТЕРА ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Якименко Кирилл Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: В настоящее время во всём мире идёт переход к телекоммуникационным системам пятого поколения (5G). Потенциальные преимущества 5G (высокая скорость обмена данными, малое время задержки и т.п.) во многом определяются за счёт расширения полосы и увеличения рабочих частот систем связи до десятков гигагерц. В связи с этим, актуальной представляется задача исследования спектральных характеристик синтезаторов частот сантиметрового и миллиметрового диапазона. В данной работе проведено исследование влияния джиттера генератора опорной частоты (ГОЧ) на выходной сигнал синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Были разработаны функциональные модели быстродействующего ЦАП, работающего в специальных режимах NRZ, RZ, RF, синтезатора на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а также гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего ЦАП. Показано, что джиттер тактового сигнала оказывает существенное влияние на шум выходного сигнала быстродействующего ЦАП, причём коэффициент передачи ЦАП тактового джиттера зависит от выбранного режима работы из-за разного количества фронтов выходного сигнала. Влияние джиттера тактового сигнала на выходной сигнал ФАПЧ можно снизить за счёт уменьшения полосы пропускания петлевого ФНЧ и увеличения порядка фильтра. Вклад джиттера генератора опорной частоты в гибридном синтезаторе на основе быстродействующего ЦАП превышает вклад джиттера ГОЧ в системе ФАПЧ. Работа ЦАП в режиме RF в составе гибридного синтезатора обеспечивает наименьший коэффициент передачи джиттера генератора опорной частоты при использовании спектральных компонентов во второй и третьей зонах Найквиста.

Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП, джиттер, прямой цифровой синтез.

Введение

Важной технической задачей в настоящее время является переход к технологии связи пятого поколения (5G). Ключевыми преимуществами систем связи 5G по сравнению с системами связи предыдущих поколений являются высокая пиковая скорость передачи информации (до 20 Гбит/с), высокая пользовательская скорость передачи данных (до 100 Мбит/с в плотной городской среде); малое время задержки пакетов (до 1 мс); высокая плотность подключений (до $10^6/\text{км}^2$). За счёт этих преимуществ системы 5G позволяют обеспечить обмен ин-

формацией не только между людьми, но и между вспомогательными устройствами, оснащёнными такой возможностью, включая бытовую электронику, интеллектуальные транспортные средства, промышленное управление и многое другое [1, 2].

Заявленные преимущества 5G технически обеспечиваются применением новых протоколов мультиплексирования, использованием многоэлементных цифровых антенных решёток на основе технологии Massive MIMO, а также расширением полосы пропускания за счёт освоения миллиметрового частотного

диапазона. Последняя особенность в основном определяется параметрами синтезатора частот, формирующего сигнал с несущей частотой. Синтезаторы должны работать в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот с заданным шагом перестройки по частоте, а также обеспечивать хорошие шумовые характеристики и малое количество и низкий уровень дискретных побочных составляющих спектра (ПСС). Наиболее распространены в настоящее время прямой цифровой [3, 4] и гибридный [5–8] методы синтеза частот. Синтезаторы, построенные по данным методам, обладают рядом достоинств, таких как высокое разрешение по частоте, хорошие шумовые характеристики и др.

Важным параметром, определяющим «качественные» показатели сигнала, является джиттер. Джиттер — это случайные быстрые изменения местоположения фронтов сигнала

во времени. В телекоммуникационных системах джиттер тактового сигнала приводит к увеличению количества ошибок при передаче и приёме информации [9].

В настоящее время активно разрабатываются быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), работающие в специальных режимах [10–13]. Специальные режимы работы позволяют перераспределить огибающую спектра, за счёт чего выходной сигнал ЦАП формируется непосредственно на радиочастоте. На основе быстродействующих ЦАП можно реализовать малошумящие синтезаторы частот [14, 15].

Целью данной работы является исследование влияния джиттера опорного сигнала на шумовые характеристики синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей.

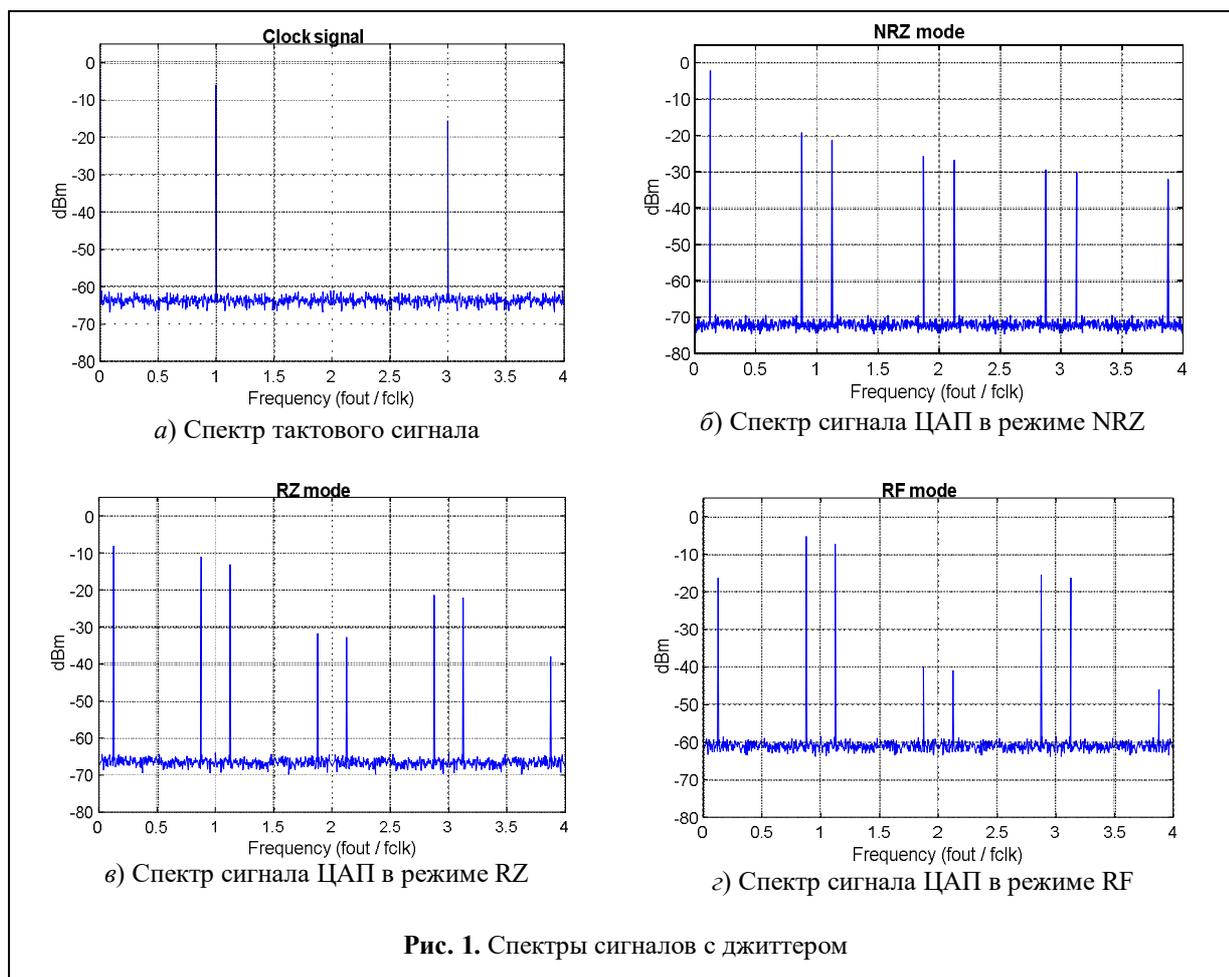


Рис. 1. Спектры сигналов с джиттером

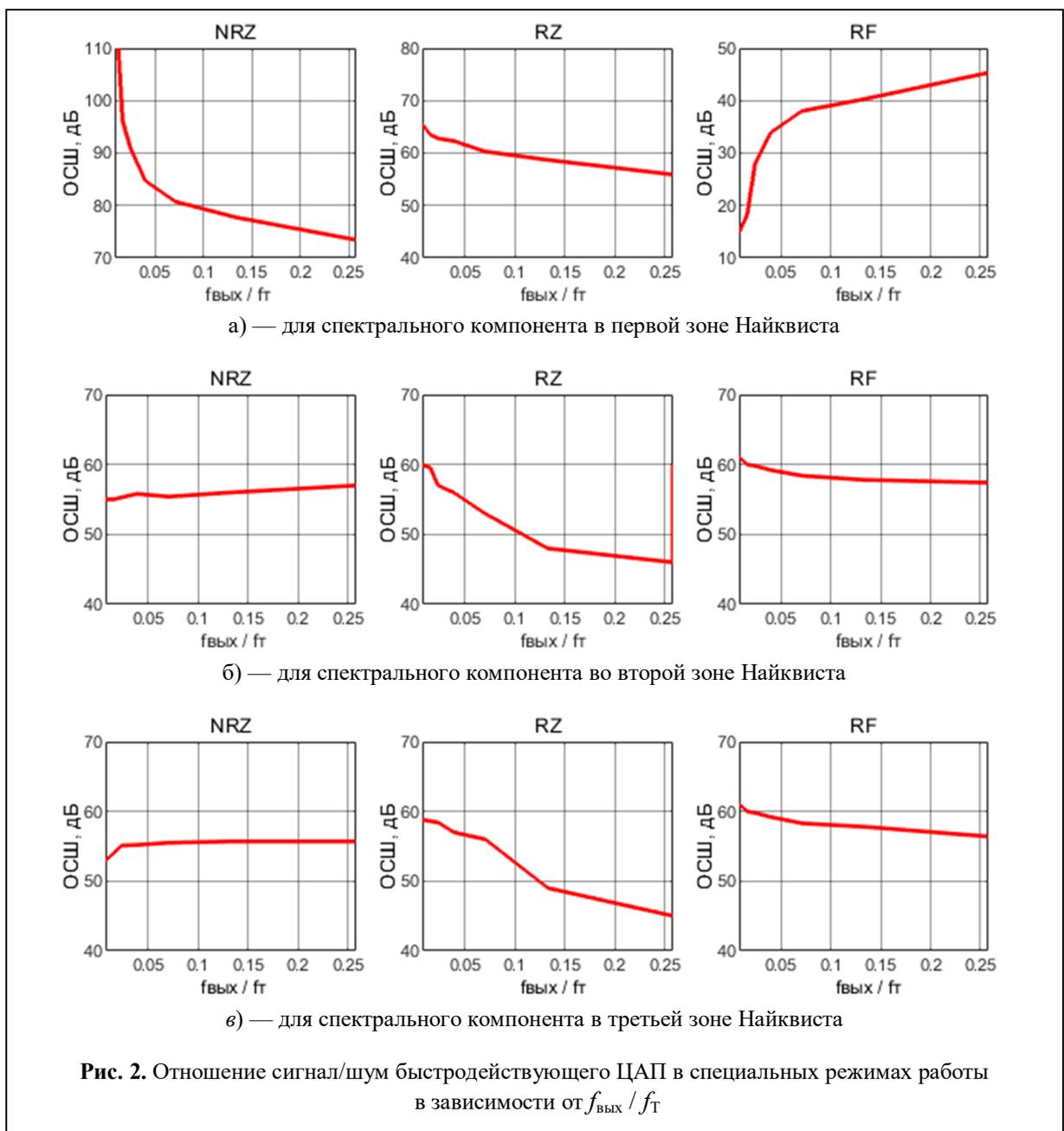
**Джиттер опорного сигнала
в быстродействующих ЦАП**

Проведём исследование влияния джиттера частоты тактового сигнала на спектр выходного сигнала ЦАП в специальных режимах работы. Для этого в системе Matlab Simulink была разработана модель быстродействующего ЦАП, реализующего специальные режимы работы NRZ, RZ, RF.

Введём в модель источник такого сигнала с джиттером. Джиттер создаёт шум, спек-

тральная плотность которого равномерно распределена во всей полосе частот. Спектры тактового сигнала с джиттером и выходного сигнала ЦАП в режимах NRZ, RZ и RF представлены на рис. 1.

В соответствии с рис. 1, джиттер опорного сигнала передаётся в спектр выходного сигнала, причём уровень шума отличается в зависимости от режима работы, а также от отношения $f_{\text{вых}} / f_T$, где $f_{\text{вых}}$ — основная частота формирователя, f_T — тактовая частота.



Проведём исследование отношения сигнал/шум выходного сигнала в зависимости от $f_{\text{вых}} / f_{\text{T}}$ при его изменении от 1/128 до 1/4. Уровень шумов рассчитывается относительно основного спектрального компонента в первой, второй и третьей зонах Найквиста на отстройке от несущей $f_{\text{вых}} / 128$. Значение среднеквадратического джиттера опорного генератора составляет 1 пс.

В первой зоне Найквиста режим NRZ имеет хорошее отношение сигнал/шум. При этом ОСШ достигает 110 дБ при малых значениях коэффициента $f_{\text{вых}} / f_{\text{T}}$, затем уменьшается пропорционально отношению $(f_{\text{вых}} / f_{\text{T}})^{-2}$.

В режиме RZ в первой зоне Найквиста коэффициент передачи джиттера тактового сигнала увеличивается с ростом коэффициента $f_{\text{вых}} / f_{\text{T}}$. При этом диапазон изменения ОСШ составляет около 10 дБ. В режиме RF в первой зоне Найквиста коэффициент передачи джиттера тактового сигнала уменьшается с увеличением коэффициента $f_{\text{вых}} / f_{\text{T}}$ пропорционально отношению $(f_{\text{вых}} / f_{\text{T}})^2$.

Во второй и третьей зонах Найквиста в режиме NRZ джиттер тактового сигнала передаётся ЦАП с равномерным коэффициентом передачи и не зависит от отношения $f_{\text{вых}} / f_{\text{T}}$. ОСШ составляет около 55 дБ. В режиме RZ ОСШ уменьшается от 60 дБ до 45 дБ. В режиме RF ОСШ уменьшается от 60 дБ до 55 дБ.

Джиттер опорного сигнала в синтезаторах на основе ФАПЧ

Для исследования влияния джиттера тактового сигнала на характеристики синтезаторов на основе ФАПЧ в программе Matlab Simulink была разработана модель системы ФАПЧ (рис. 3) с частотно-фазовым детектором (ЧФД), системой накачки заряда, петлевым ФНЧ и генератором, управляемым напряжением (ГУН). В каждый из этих блоков можно вносить собственные нестабильности (например, фазовый шум ГУН на определённых значениях частоты отстройки от несущей, нестабильности цифровой части ЧФД, токи утечки в системе накачки заряда и т.п.), однако для исследования влияния непосредственно джиттера опорного сигнала в данной работе было проведено моделирование при идеализированных составных блоках ФАПЧ.

На рис. 4, а представлена зависимость джиттера выходного сигнала при идеализированном генераторе опорной частоты (без джиттера). Видно, что в выходном сигнале ФАПЧ джиттер всё равно присутствует. Его величина составляет менее 10^{-14} с. При этом уровень собственного джиттера ФАПЧ увеличивается с увеличением коэффициента деления в цепи обратной связи. Джиттер возникает из-за неполной фильтрации петлевым ФНЧ выходного сигнала импульсного частотно-

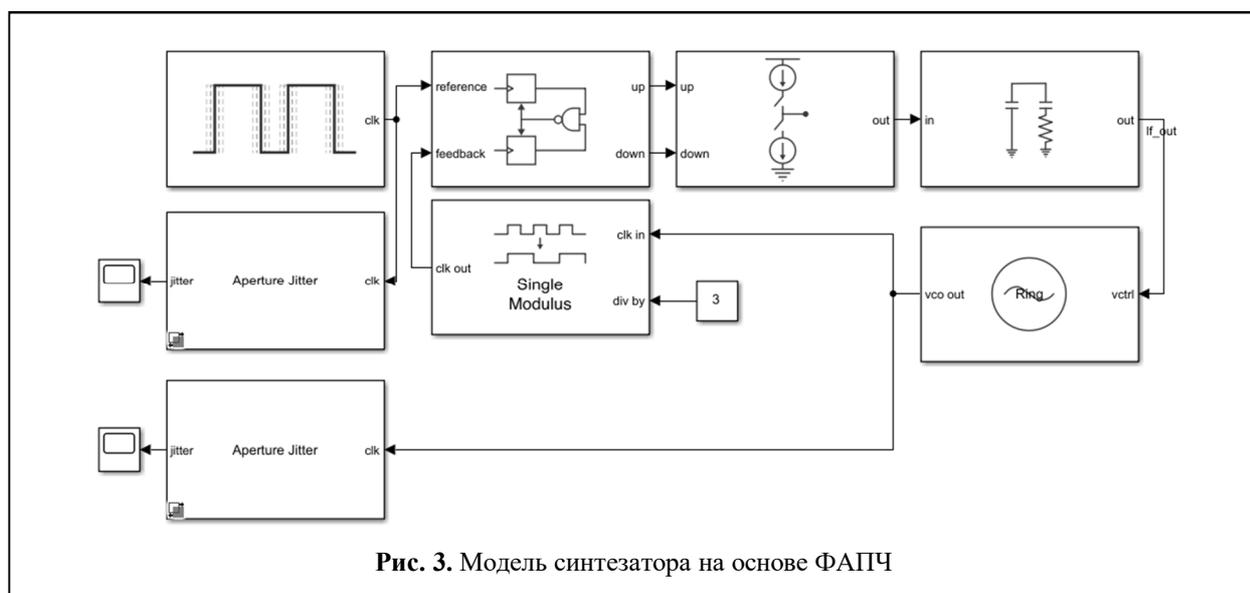
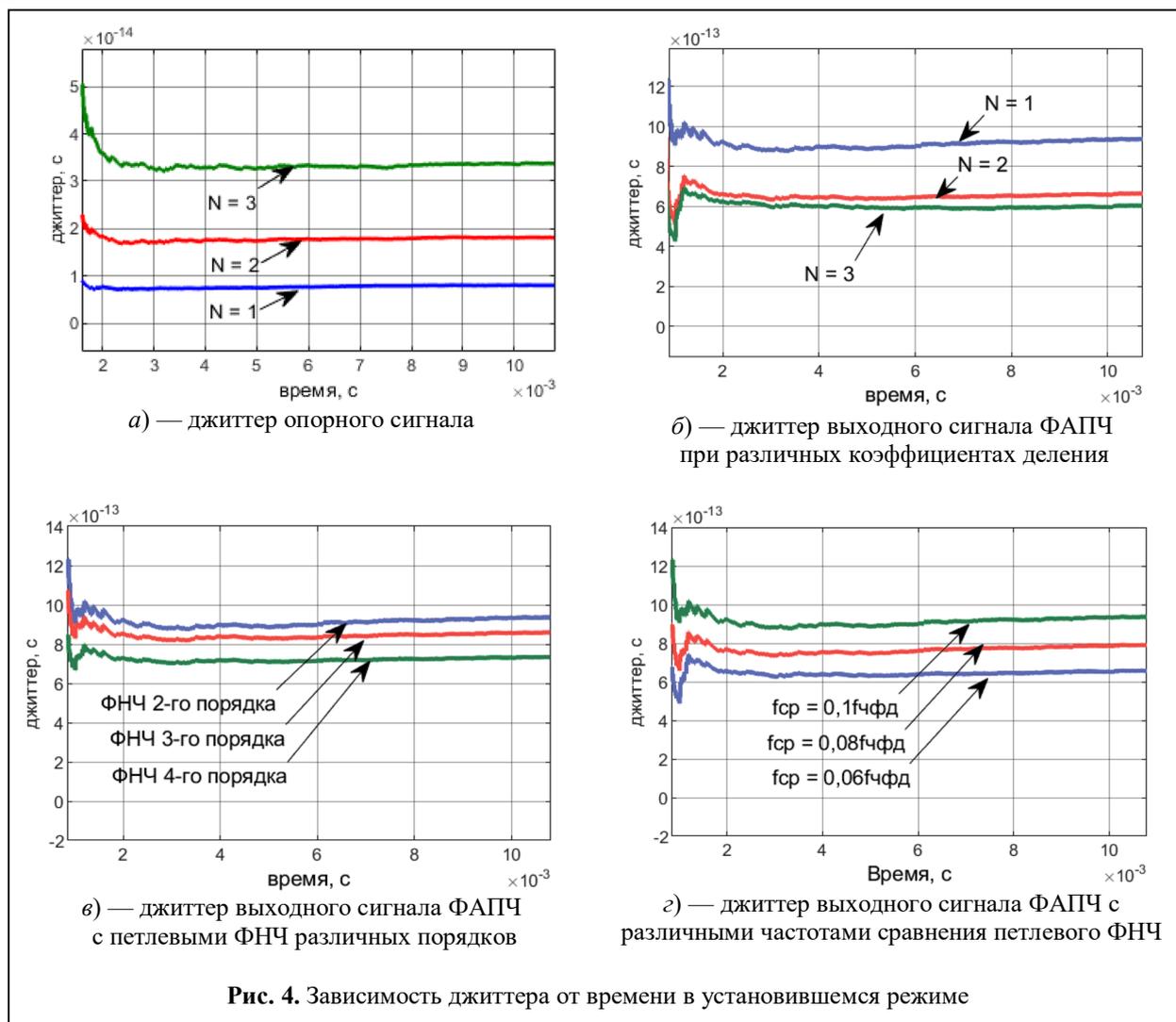


Рис. 3. Модель синтезатора на основе ФАПЧ



фазового детектора. Увеличение джиттера в начальные моменты времени свидетельствует о незавершившемся переходном процессе.

На рис. 4 б-г представлены зависимости джиттера выходного сигнала системы ФАПЧ от времени в установившемся режиме при различных параметрах синтезатора при использовании в качестве ГОЧ модели генератора прямоугольных импульсов с джиттером, величина которого составляет 10^{-12} с.

На рис. 4, б показаны зависимости джиттера выходного сигнала ФАПЧ при различных значениях коэффициента деления в цепи обратной связи. Видно, что максимальное значение джиттера выходного сигнала ФАПЧ, вызванного джиттером ГОЧ на два порядка превышает собственный джиттер ФАПЧ и достигается

при единичном коэффициенте деления в цепи обратной связи. Увеличение коэффициента деления в цепи обратной связи уменьшает джиттер.

На рис. 4, в показаны зависимости джиттера выходного сигнала ФАПЧ при использовании пропорционально-интегрирующих ФНЧ 2-го, 3-го и 4-го порядков соответственно. Увеличение порядка петлевого ФНЧ вызывает уменьшение джиттера выходного сигнала ФАПЧ.

На рис. 4, г показаны зависимости джиттера выходного сигнала ФАПЧ при использовании пропорционально-интегрирующего ФНЧ 2-го порядка с частотами среза $0,06f_{\text{чФД}}$, $0,08f_{\text{чФД}}$, $0,1f_{\text{чФД}}$. По графику видно, что для уменьшения джиттера выходного сигнала ФАПЧ, вызванного джиттером опорного генератора

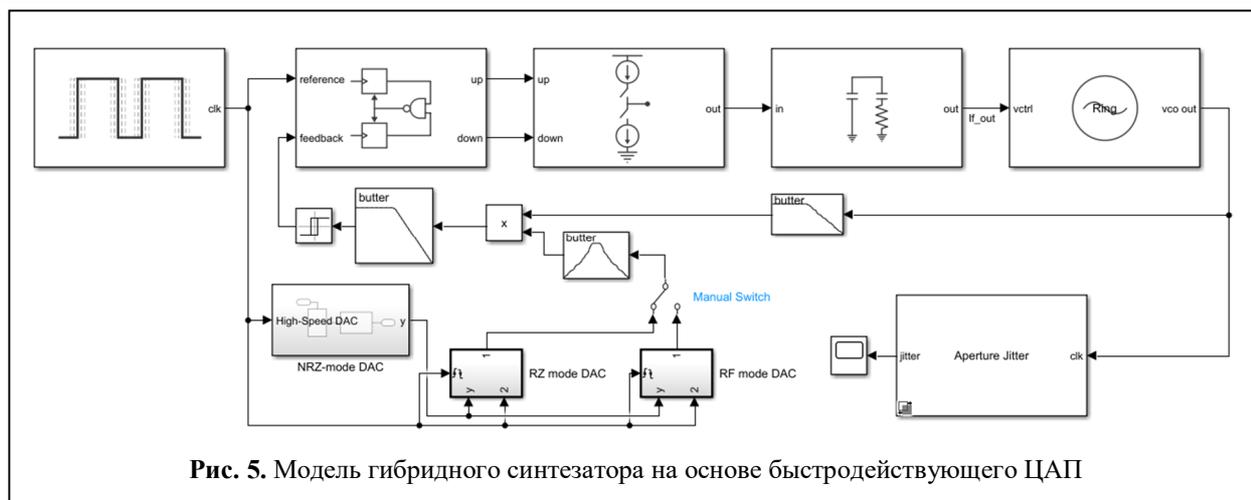


Рис. 5. Модель гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП

необходимо уменьшать полосу пропускания петлевого ФНЧ. Однако это приведёт к увеличению времени перестройки синтезатора. Поэтому здесь необходимо найти компромисс. В литературе отмечается, что оптимальная полоса пропускания петлевого ФНЧ в синтезаторах ФАПЧ на основе импульсного частотно-фазового детектора должна составлять 10% от частоты сравнения [5, 6].

Джиттер опорного сигнала в гибридных синтезаторах на основе быстродействующих ЦАП

Для исследования влияния джиттера опорного генератора в гибридных синтезаторах частот была разработана модель гибридного синтезатора, основанная на модели системы ФАПЧ и

модели быстродействующего ЦАП (рис. 5).

На рис. 6 показаны зависимости джиттера выходного сигнала гибридного синтезатора в установившемся режиме при использовании быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы NRZ, RZ и RF при использовании спектрального компонента во второй и третьей зонах Найквиста.

По графикам видно, что гибридный синтезатор на основе быстродействующего ЦАП передаёт джиттер опорного генератора с большим коэффициентом передачи, чем система ФАПЧ, из-за того, что ГОЧ формирует опорный сигнал для ФАПЧ и, в то же время, является тактовым генератором для ЦАП.

Работа ЦАП в режиме RF в составе гибридного синтезатора обеспечивает наименьший

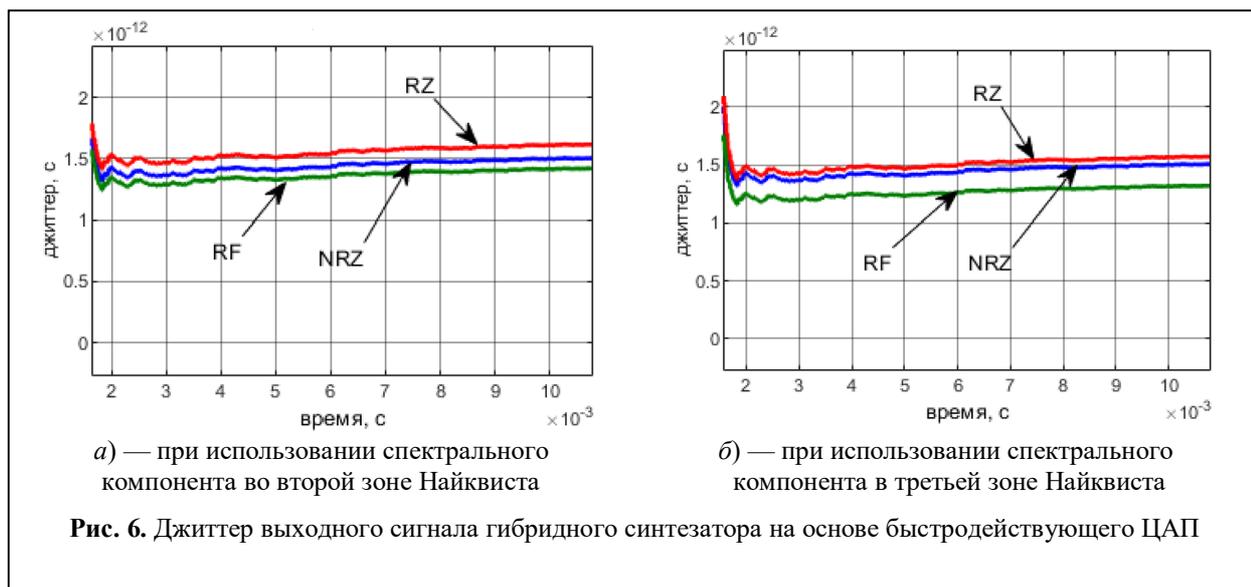


Рис. 6. Джиттер выходного сигнала гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП

коэффициент передачи джиттера генератора опорной частоты при использовании спектральных компонентов во второй и третьей зонах Найквиста.

Заключение

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Возможность использования быстродействующих ЦАП для формирования радиосигнала непосредственно на несущей радиочастоте успешно реализуется за счёт применения специальных режимов работы. Специальные режимы меняются пользователем в зависимости от того, в каких зонах Найквиста необходимо формировать несущую частоту. Ограничением к разработкам новых режимов работы в настоящее время является недостаточный уровень развития цифровой схемотехники.

2. Джиттер тактового сигнала оказывает существенное влияние на шум выходного сигнала быстродействующего ЦАП, причём коэффициент передачи ЦАП тактового джиттера зависит от выбранного режима работы и от отношения $f_{\text{вых}} / f_{\text{ГОЧ}}$ из-за разного количества фронтов выходного сигнала. Для каждого режима работы есть оптимальная зона Найквиста, в которой коэффициент передачи тактового джиттера является наименьшим.

3. Джиттер выходного сигнала ФАПЧ во многом зависит от параметров петлевого ФНЧ. Увеличение коэффициента деления приводит к увеличению собственного джиттера ФАПЧ, но джиттер, вызванный непосредственно джиттером опорного генератора, уменьшается, с увеличением коэффициента деления. Уменьшение влияния тактового джиттера на выходной сигнал ФАПЧ можно достичь за счёт понижения полосы пропускания петлевого ФНЧ и увеличения порядка фильтра.

4. Вклад джиттера генератора опорной частоты в гибридном синтезаторе на основе быстродействующего ЦАП превышает вклад джиттера ГОЧ в системе ФАПЧ. Работа ЦАП в режиме RF в составе гибридного синтезатора обеспечивает наименьший коэффициент пере-

дачи джиттера генератора опорной частоты при использовании спектральных компонентов во второй и третьей зонах Найквиста.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00149, <https://rscf.ru/project/22-79-00149/>

Литература

1. Al-Dulaimi A., Wang X., Chih-Lin I. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management. USA: Wiley, 2018. 784 p.
2. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface. USA: Wiley, 2021.
3. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. 208 p.
4. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.
5. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы // Компоненты и технологии. 2009. №5, №6.
6. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 1 (33). С. 6–17.
7. Ромашов В.В., Якименко К.А. Программный комплекс для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 1 (29). С. 36–44.
8. Пат. РФ № RU 172814 U1. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Заявл. 24.04.2017; опубл. 25.07.2017.
9. Elnashar A., El-saidny M.A. Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT: Paving the way towards 5G. USA: Wiley Telecom, 2018. 480 p.
10. Luschas S., Schreier R., Lee H.S. Radio frequency digital-to-analog converter. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2004. Vol. 39(9). Pp. 1462–1467.
11. Kuckreja A., Geir O. High-Speed DACs ease transmitter designs // Microwave & RF. 2010. Vol. 49(8). Pp. 66–71.
12. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А. Повышение эффективности использования высших зон Найквиста при

прямом цифровом синтезе высокочастотных сигналов // Радиотехника. 2022. Т. 86. №5. С. 135–144.

13. Overhoff S. Direct-Sampling DACs in Theory and Application [Электронный ресурс] // Maxim Integrated company [сайт]. [2013]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5446> (дата обращения 15.01.2023).

14. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-

аналогового преобразователя // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №4. С. 51–59.

15. Пат. РФ № RU 214526. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифроаналогового преобразователя в специальных режимах работы / Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Заявл. 25.05.2022; опубл. 02.11.2022.

Поступила 17 января 2023 г.

English

THE INFLUENCE OF THE REFERENCE SIGNAL JITTER ON THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FREQUENCY SYNTHESIZERS BASED ON HIGH-SPEED DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS

Kirill Aleksandrovich Yakimenko — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street. 23.

Abstract: Currently, there is a worldwide transition to fifth-generation telecommunications systems (5G). The potential advantages of 5G (high data exchange speed, low latency, etc.) are largely determined by expanding the bandwidth and increasing the operating frequencies of communication systems to tens of gigahertz. In this regard, the task of studying the spectral characteristics of synthesizers of frequencies in the centimeter and millimeter range seems urgent. In this paper, the influence of the jitter of the reference frequency generator (REF) on the output signal of frequency synthesizers based on high-speed digital-to-analog converters (DAC) is investigated. Functional models of a high-speed DAC operating in special modes NRZ, RZ, RF, a synthesizer based on a phase-locked frequency (PLL) system, as well as a hybrid frequency synthesizer based on a high-speed DAC were developed. It is shown that the jitter of the clock signal has a significant effect on the noise of the output signal of the high-speed DAC, and the transmission coefficient of the clock jitter DAC depends on the selected operating mode due to the different number of output signal edges. The effect of the clock signal jitter on the PLL output signal can be reduced by reducing the bandwidth of the loop LPF and increasing the filter order. The contribution of the reference frequency generator jitter in a hybrid synthesizer based on a high-speed DAC exceeds the contribution of the REF jitter in the PLL system. The operation of the DAC in RF mode as part of a hybrid synthesizer provides the lowest transmission coefficient of the generator jitter by the frequency support when using spectral components in the second and third Nyquist zones.

Keywords: hybrid frequency synthesizer, high-speed digital-to-analog converter, DAC, jitter, direct digital synthesis.

The reported study was funded by Russian Science Foundation, Project No. 22-79-00149, <https://rscf.ru/en/project/22-79-00149>.

References

1. Al-Dulaimi A., Wang X., Chih-Lin I. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management. USA: Wiley, 2018. 784 p.
2. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface. USA: Wiley, 2021.
3. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. 208 p.
4. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.
5. Belchikov S. Phase noise: how to go down below -120 dBn/Hz at 10 kHz tuning in the frequency range up to 14 GHz, or the struggle for decibels. Komponenty i tehnologii. 2009. No. 5, No. 6.

6. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Romashova L.V. Experimental study of noise characteristics of hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio engineering and infocommunication systems. 2017. No. 1 (33). Pp. 6–17.
7. Romashov V.V., Yakimenko K.A. A software package for designing hybrid frequency synthesizers and modeling their noise characteristics. Radioengineering and telecommunication systems. 2018. No. 1 (29). Pp. 36–44.
8. RU Pat. No. RU 172814 U1. Hybrid frequency synthesizer with improved spectral characteristics. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. Appl. 24.04.2017; publ. 25.07.2017.
9. Elnashar A., El-saidny M.A. Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT: Paving the way towards 5G. USA: Wiley Telecom, 2018. 480 p.
10. Luschas S., Schreier R., Lee H.S. Radio frequency digital-to-analog converter. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2004. Vol. 39(9). Pp. 1462–1467.
11. Kuckreja A., Geir O. High-Speed DACs ease transmitter designs. Microwave & RF. 2010. Vol. 49(8). Pp. 66–71.
12. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A., Sochneva N.A. Increasing the efficiency of using higher Nyquist zones in direct digital synthesis of high-frequency signals. Radioengineering. 2022. Vol. 86. No. 5. Pp. 135–144.
13. Overhoff S. Direct-Sampling DACs in Theory and Application [Electronic source]. Maxim Integrated company [сайт]. [2013]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5446> (access date 15.01.2023).
14. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Sochneva N.A. Hybrid frequency synthesizer based on a high-speed digital-analog converter. Radioengineering and telecommunication systems. 2018. No. 1 (29). Pp. 36–44.
15. RU Pat. No. 214526. Hybrid frequency synthesizer based on a high-speed digital-to-analog converter in special operating modes. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Sochneva N.A. Appl. 05.25.2022; publ. 02.11.2022.