
Методы и устройства повышения качества передачи информации

УДК 621.396

Исследование влияния нестабильностей составных блоков интегральных синтезаторов частот на основе косвенного метода синтеза на параметры выходного сигнала

Березина Д.М., Якименко К.А.

В работе исследуется влияние нестабильностей аналоговых блоков синтезатора частот на основе ФАПЧ на джиттер выходного сигнала. На основе разработанной в MATLAB Simulink модели проведён параметрический анализ. Установлено, что наибольший вклад в рост джиттера вносит ток утечки в системе накачки заряда (Charge Pump): его увеличение от 10 до 400 нА вызывает рост апертурного и периодического джиттера в 40 раз. Также проанализировано асимметричное влияние задержек распространения управляющих сигналов. Результаты показывают, что для минимизации нестабильностей ключевое значение имеет оптимизация параметров цепи накачки заряда и петлевого фильтра.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, ФАПЧ, функциональное моделирование, джиттер.

Введение

Современные радиоэлектронные системы, в том числе системы связи, навигации и измерительной техники, предъявляют высокие требования к стабильности и спектральной чистоте генерируемых сигналов [1]. Ключевым компонентом для формирования таких сигналов являются синтезаторы частот, среди которых широкое распространение получили схемы, построенные на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Данные устройства позволяют получать из опорного сигнала высокостабильного генератора сетку частот с заданным шагом перестройки, сохраняя при этом хорошие шумовые характеристики и высокую спектральную чистоту выходного сигнала [2–4].

Выходной сигнал синтезатора частоты на основе ФАПЧ формируется под совокупным влиянием характеристик всех его компонентов. Такие параметры, как фазовый шум, джиттер (дрожание фазы) и стабильность частоты напрямую определяются стабильностью работы каждого блока [5]. Каждый элемент вносит свой вклад в общую нестабильность. Опорный генератор является источником собственных флуктуаций, применение

делителя частоты в цепи обратной связи с большим коэффициентом деления N приводит к увеличению фазового шума в N^2 -раз, а выходной сигнал частотно-фазового детектора содержит паразитную модуляцию импульсными помехами. Кроме того, параметры генератора (ГУН), управляемого напряжением, и петлевого фильтра не остаются постоянными и склонны к дрейфу под воздействием температуры, старения компонентов и других внешних факторов [6–9].

Совместное влияние этих дестабилизирующих факторов приводит к значительной деградации выходного сигнала. Это выражается в увеличении фазового шума, росте уровня нежелательных побочных спектральных составляющих и увеличении джиттера [10]. Подобное ухудшение параметров напрямую снижает качество передачи информации в системах связи и точность синхронизации в цифровых устройствах, что обуславливает необходимость тщательного анализа и учёта вклада каждого компонента на этапе проектирования [11–15].

Целью данной работы является разработка функциональной модели интегрального синтезатора частот на основе косвенного метода

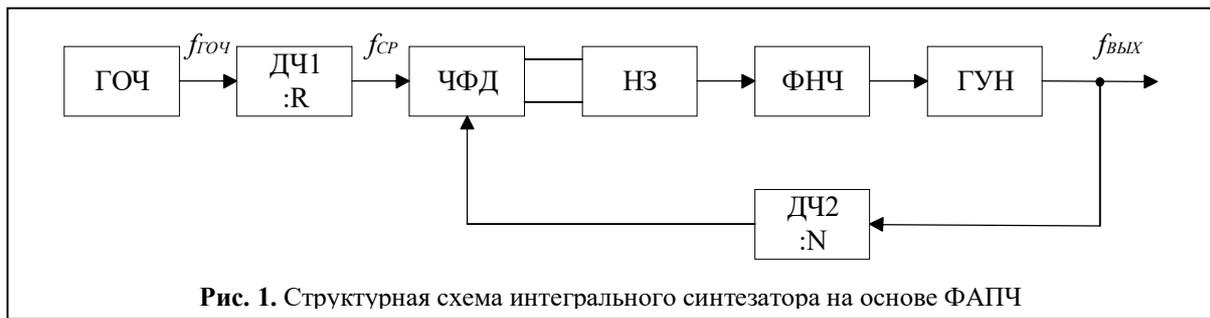


Рис. 1. Структурная схема интегрального синтезатора на основе ФАПЧ

синтеза и исследование с её помощью влияния нестабильностей составных блоков на параметры выходного сигнала.

Функциональная модель синтезатора на основе фазовой автоподстройки частоты

Структурная схема интегрального синтезатора на основе ФАПЧ приведена на рис. 1. На схеме применены обозначения: ГОЧ — генератор опорной высокостабильной частоты; ДЧ1 — делитель с фиксированным коэффициентом деления R; ДЧ2 — делитель с переменным коэффициентом деления N; ЧФД — частотно-фазовый детектор; НЗ — система «накачки» заряда; ФНЧ — петлевой фильтр нижних частот; ГУН — генератор, управляемый напряжением.

Генератор опорной частоты формирует высокостабильный сигнал с частотой $f_{ГОЧ}$, который делится делителем ДЧ1 на коэффициент R. Параллельно сигнал с выхода генератора, управляемого напряжением, делится делителем ДЧ2 с коэффициентом N. Частотно-фазовый детектор сравнивает эти два сигнала и формирует напряжение, пропорциональное разности их фаз, которое управляет

частотой выходного сигнала ГУН, изменяя её так, чтобы минимизировать рассогласование между сигналами.

Функциональная модель системы ФАПЧ, реализованная в программе MATLAB Simulink, представлена на рис. 2.

Данная функциональная модель системы ФАПЧ предназначена для генерации стабильного сигнала и анализа его джиттера. Она представляет собой замкнутую систему, на вход которой подаётся опорный сигнал с генератора импульсов (Pulse Generator) в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов с заданными амплитудой, периодом, скважностью и фазовой задержкой.

Выходной сигнал генератора поступает на первый вход частотно-фазового детектора (Phase-Frequency Detector, PFD), который сравнивает фазу и частоту опорного сигнала от генератора и сигнала, поступающего с делителя частоты (Single Modulus Prescaler) по цепи обратной связи. На основе этого сравнения PFD генерирует два импульсных сигнала (UP и DOWN) с длительностями, пропорциональными разности фаз. В блоке PFD можно изменять длительности задержек рас-



Рис. 2. Функциональная модель системы ФАПЧ, реализованная в программе MATLAB Simulink

пространения сигналов в большую и меньшую стороны. Задержки могут привести к появлению дополнительного фазового шума и увеличению джиттера, так как система начинает реагировать на рассогласование с запаздыванием.

Сигналы рассогласования поступают на вход блока накачки заряда (Charge Pump), который преобразует их в аналоговый ток. Его основная задача — обеспечить ток, пропорциональный разности скважностей сигналов UP и DOWN. Ключевыми параметрами, определяющими точность работы данного блока, являются дисбаланс токов, величина тока утечки и задержки переключения, которые могут оказывать существенное влияние на накопление фазовой ошибки и результирующий джиттер выходного сигнала.

Сформированный ток управляющего сигнала поступает на вход петлевого фильтра (Loop Filter), который выполняет функции формирования управляющего напряжения и определения динамических характеристик системы.

Управляющее напряжение подаётся на вход генератора, управляемого напряжением (Voltage-Controlled Oscillator, VCO), который осуществляет генерацию выходного сигнала системы. Выходной сигнал VCO поступает на измерительный блок анализа джиттера и по цепи обратной связи — на вход делителя частоты.

Делитель частоты (Single Modulus Prescaler) выполняет операцию деления частоты выходного сигнала VCO на программируемый коэффициент N , значение которого задаётся блоком постоянного значения (Constant).

Для количественной оценки шумовых характеристик выходного сигнала в модель включён блок измерения апертурного джиттера (Aperture Jitter Measurement), обеспечивающий анализ как апертурного джиттера, характеризующего неопределённость во времени взятия отсчёта, так и периодического джиттера, отражающего случайные отклонения длительности периодов сигнала от номинального значения. Результаты измерений

выводятся на осциллограф (Scope) для последующей визуализации и анализа влияния различных нелинейных искажений составных блоков синтезатора на параметры синтезированного сигнала.

Оценка влияния нестабильностей составных блоков синтезатора на параметры выходного сигнала

С помощью функциональной модели системы ФАПЧ была проведена комплексная оценка влияния параметрических нестабильностей составных блоков синтезатора на параметры выходного сигнала. Исследование включает в себя анализ воздействия неидеальностей цепи накачки заряда и частотно-фазового детектора величины апертурного и периодического джиттера.

Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: $f_{\text{Гоч}} = 1$ МГц, $N = 101$, $f_{\text{Гун}} = 101$ МГц, $f_{\text{ср}} = 1$ МГц. В качестве петлевого ФНЧ использовался пропорционально-интегрирующий фильтр второго порядка. Его параметры: ёмкости $C1$ (10,5 нФ) и $C2$ (50,7 нФ), сопротивление $R2$ (7580 Ом).

К нестабильностям частотно-фазового детектора относятся задержки распространения сигналов UP и DOWN. Задержка распространения сигнала представляет собой временную задержку между моментом изменения состояния на входе детектора и появлением соответствующего сигнала на его выходе.

Рассмотрим влияние задержки распространения сигнала на значения джиттера выходного сигнала синтезатора. При изменении значения распространения сигнала UP (Up Propagation Delay) в блоке Charge Pump от 7 до 15 нс с шагом 1 нс наблюдается практически линейный рост периодического джиттера с 3.736 до 19.11 фс (рис.3 – а).

При исследовании зависимости джиттера от времени задержки распространения сигнала DOWN (Down Propagation Delay) в том же блоке Charge Pump в диапазоне от 5 до 13 нс была выявлена сложная нелинейная зависимость для периодического джиттера с минимальным значением 2.862 фс при задержке 8 нс (рис. 3 – б)

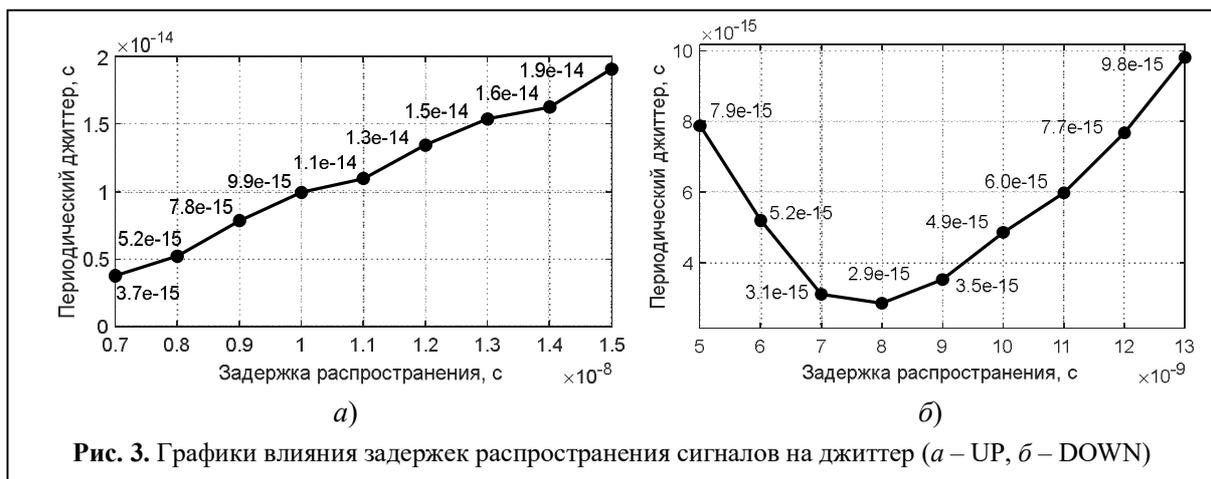


Рис. 3. Графики влияния задержек распространения сигналов на джиттер (а – UP, б – DOWN)

Также к нестабильностям системы накачки заряда (Charge Pump) относятся паразитные параметры, среди которых ключевое значение имеет ток утечки (Leakage current). Ток утечки представляет собой паразитный ток, протекающий через выходную цепь накачки заряда при отсутствии управляющих сигналов, обусловленный неидеальностью полупроводниковых ключей и р-n переходов интегральной схемы. Изменение этого параметра оказало наиболее значительное влияние на два типа джиттера. При его увеличении с 10 до 400 нА апертурный джиттер вырос с 0.376 до 15 пс (рис. 4, а), а периодический джиттер — с 0.0264 до 1.055 пс (рис. 4, б), что составляет увеличение в 40 раз для обоих типов джиттера. Такая сильная зависимость объясняется тем, что ток утечки создаёт систематическую ошибку в цепи управления, приводящую к постоянному дрейфу фазы выходного сигнала.

Было также установлено, что включение нелинейностей в блоке PFD (Enable

impairments) не оказывает существенного влияния на величину джиттера, что свидетельствует о том, что основные источники временных нестабильностей сосредоточены в аналоговой части системы — цепи накачки заряда и петлевого фильтра. Исследование влияния дисбаланса токов (Current imbalance) показало, что данный параметр также не оказывает воздействие на джиттер, по сравнению с током утечки.

Заключение

На основе проведённых исследований влияния различных параметров системы ФАПЧ на временные нестабильности можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшее влияние на оба типа джиттера оказывает ток утечки в блоке накачки заряда. При его увеличении от 10 до 400 нА наблюдается пропорциональный рост как апертурного, так и периодического джиттера примерно в 40 раз. Апертурный джиттер при этом возрастает с 0.376 до 15 пс, а периоди-

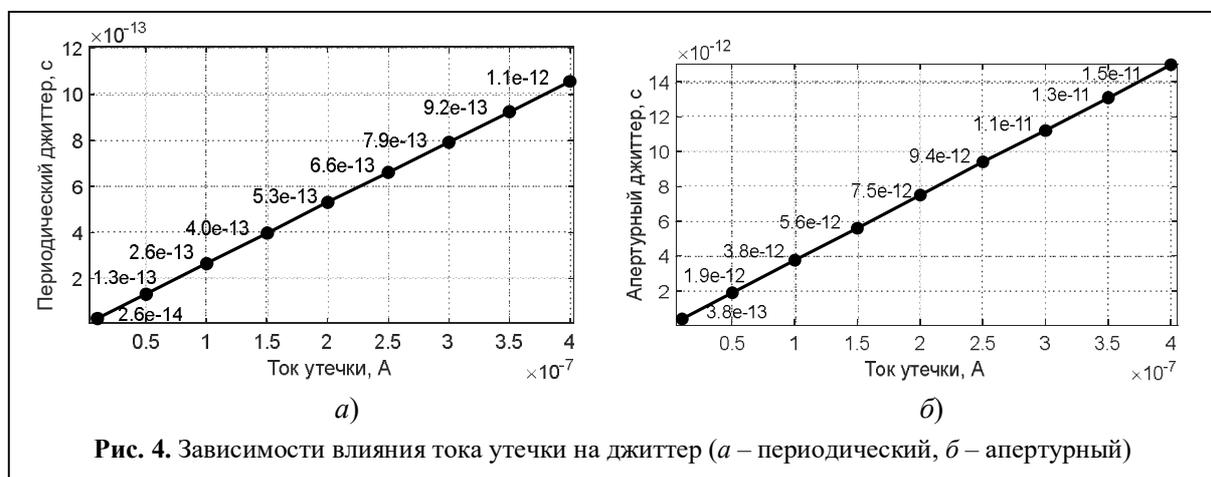


Рис. 4. Зависимости влияния тока утечки на джиттер (а – периодический, б – апертурный)

ческий - с 0.0264 до 1.055 пс. Ток утечки непосредственно воздействует на процесс заряда-разряда конденсаторов петлевого фильтра, вызывая систематическую ошибку фазы и прогрессирующее накопление временной ошибки в системе.

2. При увеличении времени задержки распространения сигнала UP от 7 до 15 нс периодический джиттер демонстрирует практически линейный рост с 3.736 до 19.11 фс. Изменение времени задержки распространения сигнала DOWN оказало менее предсказуемое влияние. Периодический джиттер показывает сложную нелинейную зависимость с минимальным значением 2.862 фс при задержке 8 нс. Различие в характере влияния задержек сигналов UP и DOWN объясняется структурной асимметрией работы системы накачки заряда и компенсирующим воздействием замкнутой петли обратной связи системы ФАПЧ.

3. Чувствительность апертурного джиттера к исследуемым параметрам более высокая по сравнению с периодическим джиттером. Значения апертурного джиттера превышают значения периодического джиттера приблизительно на порядок при одинаковых условиях. Апертурный джиттер характеризует нестабильность момента стробирования сигнала и непосредственно связан с процессами дискретизации, тогда как периодический джиттер отражает вариации длительности периодов тактового сигнала.

4. Для эффективной минимизации джиттера в системе ФАПЧ наиболее продуктивной стратегией является комплексный подход, включающий снижение тока утечки системы накачки заряда, оптимизацию симметрии задержек распространения управляющих сигналов и тщательный подбор параметров петлевого фильтра.

Литература

1. 1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: учебник. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. 2. Геложэ Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Исследование переходных процессов в контуре ФАПЧ // Известия ЮФУ. Технические

науки. 2015. №11 (172). С. 85–96.

3. 3. Ромашов В.В., Якименко К.А. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 3. С. 3-9.

4. 4. Leeson, D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum // IEEE Proc. Letters. February 1966. Vol. 54. Pp. 329–330.

5. 5. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.

6. 6. Kroupa V.F. Noise properties of PLL systems // IEEE Trans. 1982. Vol. Com-30. No. 10. Pp. 2244–2252.

7. 7. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. McGraw-Hill, 2008. 1080 p.

8. 8. Якименко К.А., Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Исследование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 11. С. 180–191.

9. 9. Березина Д.М. Исследование влияния фазовых шумов синтезаторов частот на параметры системы связи с QAM-модуляцией // Научный потенциал молодёжи – будущее России. XVI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 26.04.2024. С. 146–147.

10. 10. Березина Д.М., Якименко К.А., Беркут И.А. Оценка вероятности возникновения ложных битов систем связи на основе быстродействующих ЦАП // XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», посвященная 130-летию изобретения радио. Россия, г. Воронеж, 15-17 апреля 2025 г.

11. 11. Березина Д.М., Беркут И.А. Численная оценка фазовых шумов формирователей сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Научный потенциал молодёжи – будущее России. XVII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 25.04.2025.

12. 12. 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.

13. 13. Romashov V.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Micro-

wave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. 2014. Pp. 294–295.

14. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2014. № 16. С. 18–24.

Поступила 22 сентября 2025 г.

15. 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.

The paper examines the effect of instabilities of analog blocks of a PLL-based frequency synthesizer on the jitter of the output signal. A parametric analysis was performed based on the model developed in MATLAB Simulink. It has been found that the leakage current in the Charge Pump system makes the greatest contribution to the growth of jitter: Its increase from 10 to 400 nA causes a 40-fold increase in aperture and periodic jitter. The asymmetric effect of propagation delays of control signals is also analyzed. The results show that optimizing the parameters of the charge pumping circuit and the loop filter is key to minimizing instabilities.

Key words: frequency synthesizer, phase-locked frequency, PLL, functional modeling, jitter.

Березина Дарья Максимовна — магистрант кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: dberezina111@yandex.ru

Якименко Кирилл Александрович — кандидат технических наук, доцент, 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, г. Муром, ул. Орловская, 23.