

## Цифровой синтезатор частот когерентных СВЧ сигналов

И.В. Сочнев<sup>1</sup>, В.В. Давыдов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Джи Ви Тек»,

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** В микроволновой электронике применяются различные стандарты частоты, в том числе цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), обладающие быстрым переключением частоты с небольшим вкладом в относительный фазовый шум. Однако, установлено, что в аккумуляторе фазы ЦВС при накоплении фазы каждого синтезированного сигнала с разными частотами происходит потеря значения начальной фазы каждого из последующих сигналов. В разработанной нами конструкции синтезатора для сохранения когерентности сигналов в схеме управления реализовано устройство фазовой памяти, которое рассчитывает фазу для каждого сигнала. В данной работе представлены схема построения синтезатора частот с выбором оптимальной схемы синтеза частот, а также формулы расчета фазовых поправок и результаты экспериментов.

**Ключевые слова:** цифровой синтезатор, когерентный сигнал, время переключения.

### 1. Введение

В микроволновой электронике используются различные стандарты частоты, среди которых можно выделить синтезаторы когерентных частот (СКЧ) [1]. СКЧ используется в формировании частот с высокой точностью, а также в переключении по частоте в определенном диапазоне частот, высоким быстродействием с возможностью сохранения когерентности сигналов [1-4]. Также когерентные сигналы необходимы для имитации различных воздействующих, особенно СВЧ сигналов, и формирования заданного волнового фронта.

В настоящее время разработаны синтезаторы, которые синхронизированы общим опорным источником. Эти устройства имеют отдельные внутренние генераторы, управляемые напряжением (ГУН) [5, 6], со своим фазовым шумом, и отдельные аппаратные цепи фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На частотах в пределах полосы пропускания кольцо автоподстройки обеспечивает высокую точность слежения. Однако, данное отслеживание оказывается несовершенным для эффектов, связанных с паразитной модуляцией соседних синтезаторов, вызванная работой сигма-дельта модулятора при дробно-численном режиме работы делителя частоты ГУН) [5, 6].

Данную проблему в аппаратуре, находящейся в эксплуатации, решают с помощью цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) [7-9]. Скорость перестройки частоты в них в основном определяется импульсным откликом сглаживающих фильтров [8-12]. Поскольку, требуется только один синтезатор ЦВС для синтеза когерентных сигналов, то отсутствуют побочные воздействия, вызванные работой соседних синтезаторов.

Особенностью перестройки частоты сигнала, синтезируемого ЦВС, является то, что переход с одной частоты на другую, особенно для СВЧ сигнала (при имитации работы с несколькими переключающимися каналами в спутниковой связи, от разных спутников, а также в реальных условиях работы систем обработки информации) приводит к потере начальной фазы сигнала [7-10, 12]. При этом необходимо отметить, что возможности ЦВС позволяют изменять фазовый сдвиг синтезируемого сигнала.

Поэтому целью работы является разработка цифрового синтезатора частот

когерентных СВЧ сигналов с использованием ЦВС с временем переключения – перестройки частоты (менее 5 нс) для расширения возможностей имитации СВЧ сигналов от работы спутниковых каналов связи, а также для применения его в другой радиоэлектронной аппаратуре для повышения точности измерения различных параметров.

## 2. Метод построения когерентного синтезатора частот в диапазоне до 32 ГГц с использованием ЦВС

Формирование частот с помощью ЦВС ограничено частотой Найквиста, которая равна половине тактовой частоты [7, 8, 12]. Поэтому нами в разработанной конструкции цифрового синтезатора предлагается использовать метод синтеза необходимого набора частот с помощью умножителей частоты и фильтров, коммутируемых между собой ключами. Структурная схема новой конструкции цифрового когерентного синтезатора (ЦКС) с реализованным в ПЛИС алгоритмом расчёта фазовой отстройки представлена на рис. 1, в которой используется ЦВС.

В промышленной конструкции синтезатора ЦВС (рис. 1) формируются когерентные сигналы с частотой от 100 МГц до 32 ГГц. Для разработанной ЦКС был выбран ЦВС, формирующий сигналы с частотой от 100 МГц до 1500 МГц. Когерентность каждого сигнала обеспечивается алгоритмом расчёта начальной фазы, представленным ниже. Для увеличения диапазона частот применяется набор умножителей, коммутируемых ключами.

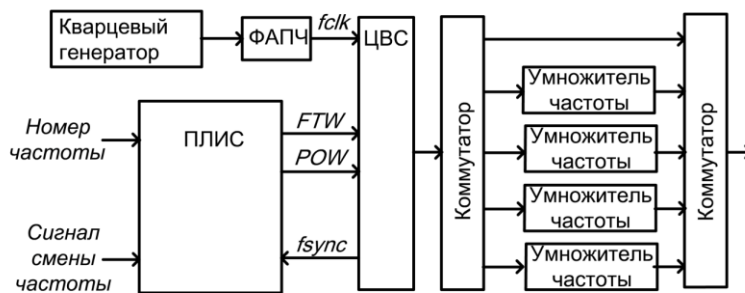


Рисунок 1. Структурная схема синтезатора частот

При умножении частоты ухудшение фазового шума в идеальных условиях оценивается по формуле:

$$A = 20 \cdot \log_{10} N, \quad (1)$$

где  $N$  – отношение значений частот выходного сигнала к входному в размах,  $A$  – изменение фазового шума в дБ.

Ухудшение фазового шума сигнала ЦВС может составить 10дБ, а после умножения частоты умножителем фазовый шум ухудшится на 26 дБ, согласно формуле (1). Данное ухудшение сопоставимо с ухудшением ФШ при преобразовании частоты синтезаторами с ФАПЧ. Но для достижения быстрой перестройки частоты данный способ преобразования частоты является оптимальным, в отличие от преобразования с помощью синтезатора ФАПЧ, быстродействие которого определяется частотой среза фильтра в обратной связи и может составлять не менее 10 мкс.

После умножения частоты подавление паразитных гармоник обеспечивается полосовыми фильтрами, каждый из которых выбран для своего рабочего диапазона частот таким образом, чтобы подавлять низшие и высшие гармоники. Таким образом, с помощью применения перечисленных компонентов возможно расширить диапазон частот, формируемый ЦВС.

Формирование когерентных частот с использованием ЦВС заключается в синхронном тактировании ЦВС и управляющего им устройства. Таким образом, формирование когерентных частот осуществляется либо компенсацией накопленной фазы в фазовом аккумуляторе, либо согласованием времени переключения между частотами с равенством их текущих фаз.

Формирования когерентных частот при одинаковом и известном периоде перестройки можно добиться путём выбора частот, чтобы в один период укладывалось целое число периодов частоты (2):

$$f_i \cdot T = k_i, \quad (2)$$

где  $f_i$  –  $i$ -тая частота,  $T$  – период переключения,  $k_i$  – целое число периодов  $i$ -той частоты.

Из выражения (2), учитывая частоту Найквиста, можно выразить предельное количество частот  $Q$ , формируемых когерентно, от количества тактов в периоде переключения  $N$  по формуле (3).

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \text{НОД}(2^n, N \cdot M), \quad (3)$$

где  $Q$  – количество когерентных частот,  $n$  – разрядность регистров,  $M$  – отношение тактовой частоты ЦВС к системной частоте,  $N$  – количество тактов в одном периоде между переключениями частот.

По формуле (3) получаем, что для периода переключения, равного 10 мкс при тактовой частоте 3500 МГц, и при соотношении частот  $M$ , равного 24, получается всего 32 частоты с шагом 54,688 МГц. А уже при 17,067 мкс и тех же условиях составляет 32768 частот с точностью установки частоты 53 кГц. Данное обстоятельство вносит ограничение не только на выбор периода переключения частот, но и на точность установки частот, что сужает области применения данного алгоритма на практике [13].

В следующем способе формирования когерентных частот накопленную фазу возможно компенсировать с использованием сброса или корректировкой значения фазы в самом фазовом аккумуляторе. Поскольку при сбросе аккумулятора фазы накопленное значение сбрасывается в нуль, то для каждой частоты необходимо записать значение фазы, вычисленное по формуле (4):

$$\varphi_j = \tau n f_j, \quad (4)$$

где  $\varphi_j$  – значение фазы  $j$ -той частоты,  $\tau$  – дискрет по времени,  $n$  – количество тактов фазового аккумулятора,  $f_j$  –  $j$ -тая частота.

Необходимо отметить, что в период времени, пока ЦВС находится в состоянии сброса, сигнал не синтезируется и, соответственно, увеличивается время переключения между частотами. В зависимости от способа сброса [14] время отсутствия сигнала может варьироваться от 1 такта фазового аккумулятора до количества триггеров в конвейере шины передачи данных.

Для уменьшения времени отсутствия сигнала, а, следовательно, и времени переключения, необходимо записывать разницу фаз новой и предыдущей частот:

$$\sigma = \sum_{j=1}^m \varphi_j^p - \sum_{j=1}^m \varphi_j^{p-1} = \varphi_n^p - \sum_{i=0}^n \psi_i \quad (5)$$

где  $\psi_i$  – значение фазы, накопленное в фазовом аккумуляторе ЦВС  $i$ -той частотой за время работы,  $\sum_{i=0}^n \psi_i$  – фаза, накопленная за всё время работы,  $\varphi_n^p$  – текущая фаза в  $n$ -ый момент времени  $p$ -той частоты,  $\sigma$  – искомое значение фазовой отстройки ЦВС.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены результаты измерений, проведённые с помощью тестовой платы EVAL-AD9914, сигнал которой подаётся на анализатор реального времени. В анализаторе с помощью режима измерения фазы от времени, где сигнал перемножается с сигналом встроенного эталонного генератора, формируется зависимость начальной фазы от времени (рис. 2). При данном режиме измерения ЦВС переключается между частотами каждые 3 мкс. При этом эталонный генератор был настроен на одну из частот. Полученные результаты показывают, что начальная фаза проверяемого сигнала ЦВС, с частотой равной частоте эталонного генератора, остаётся без существенных изменений и отклонение от эталонного сигнала составляет порядка 0,162 градуса.

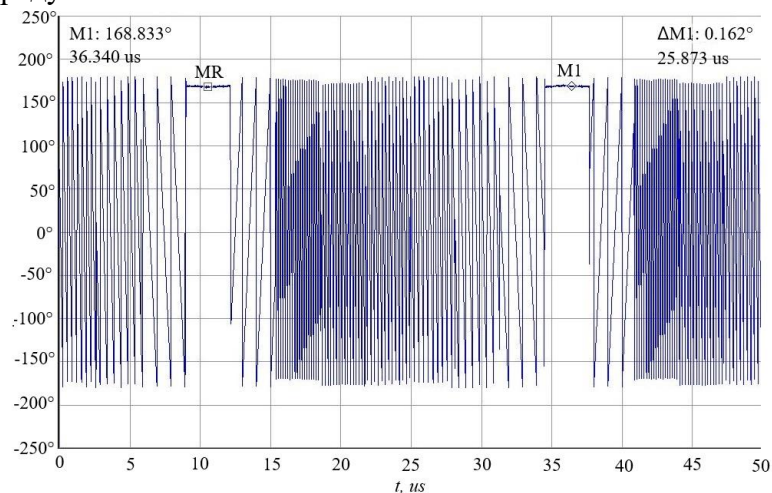


Рисунок 2. Зависимость начальной фазы сигнала от времени при переключении частот

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты измерения ФШ сигнала ЦВС и его опорного сигнала ЦВС. Как следует из формулы (1), при увеличении частоты увеличивается и фазовый шум, который рассматривается для идеальных условий. В конструкциях синтезаторов при преобразовании частоты фазовый шум ухудшается ещё больше, чем при оценке его с использованием формулы (1). Ухудшение фазового шума сигнала ЦВС по сравнению с опорным сигналом составляет около 1 дБ. Но для правильной оценки ухудшения или вносимого фазового шума необходимо привести частоты сигналов одной частоте (в нашем примере, к 1 ГГц) по формуле (1). После преобразования значений частот получаем ухудшение ФШ более чем на 10 дБ. Данное ухудшение ФШ связано с джиттером, который вносится триггерами фазового аккумулятора ЦВС и нелинейностью аналого-цифрового преобразователя.

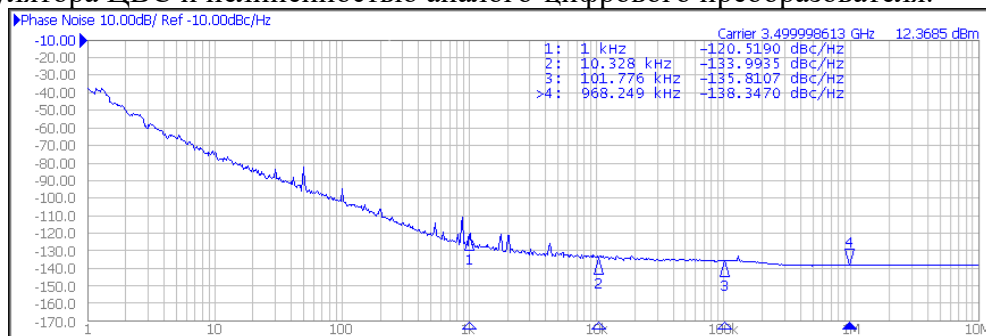


Рисунок 3. Уровень ФШ опорного сигнала

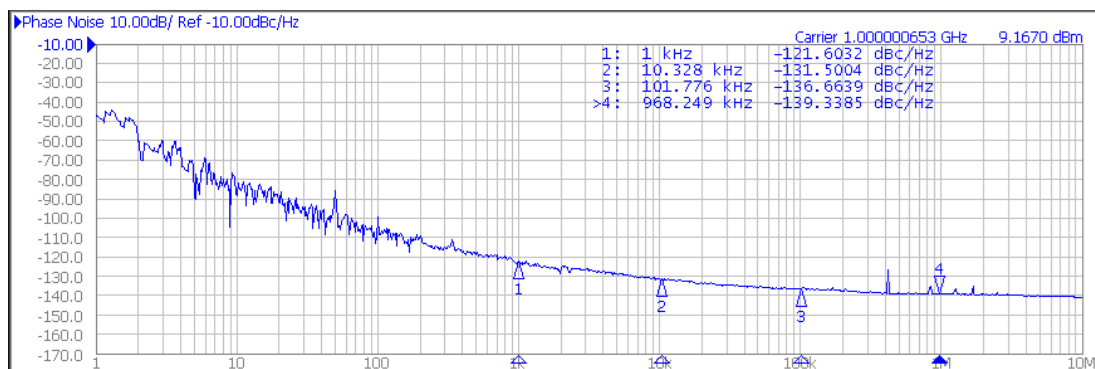


Рисунок 4. Уровень ФШ сигнала ЦВС

Полученный результат показывает, что для обеспечения когерентности синтезируемых сигналов необходимо, чтобы количество тактов между началом записи и применением параметров было постоянным. В разработанной конструкции ЦКС это обеспечено тем, что ЦВС и управляющее устройство тактируется одним и тем же источником тактовой частоты, а сигналы управления распространяются с постоянной задержкой.

#### 4. Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный ЦКС обладает рядом преимуществ по сравнению выпускаемыми конструкциями синтезаторов. В ЦКС для устройства фазовой памяти не требуется сбрасывать ЦВС перед началом записи значений в регистры последующих частот сигналов, что способствует увеличению быстродействия на один такт системной частоты по сравнению с промышленными ЦВС. При этом вычисление фазового дискриминанта несущественно усложняет схему ЦКС. Также следует отметить, что фазовый аккумулятор переключаемого ЦВС не обнуляется, следовательно, процесс переключения происходит в два-три раза быстрее в отличие от устройств со сбросом фазового аккумулятора ЦВС в конструкциях, приведённых в [7, 8, 10, 11].

При сравнении ЦКС с коммутируемыми синтезаторами с ФАПЧ, в которых время переключения частот определяется коммутатором можно отметить следующее. В процессе синтеза частот неиспользуемые синтезаторы с ФАПЧ нужно перестроить на другие рабочие частоты. Поскольку процесс перестройки длится в разы дольше выходного сигнала и составляет единицы микросекунд, то время перестройки будет ограничиваться количеством используемых синтезаторов с ФАПЧ. Для уменьшения «просачивания» сигналов от неактивных систем ФАПЧ приходится дополнительно использовать ключи для улучшения развязки между устройствами. Для уменьшения шага также можно использовать ФАПЧ с дробно численным режимом работы, но тогда ограничивается число синтезируемых частот когерентных сигналов или надо увеличивать число ФАПЧ, что увеличит размер конструкции синтезатора, его стоимость и прочие. Кроме того, увеличение числа ФАПЧ приведет к увеличению времени задержки синтеза выходного сигнала при перестройке частоты. Также необходимо для разного диапазона синтеза частот определять оптимальное число используемых ФАПЧ, с учетом перечисленных выше факторов. Все эти сложности исключены в разработанном ЦКС.

Это делает применение ЦКС более перспективным чем используемые в настоящее время синтезаторы когерентных СВЧ сигналов в различных системах в имитации и измерениях [1, 8].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Криков Д. С. *Синтезаторы сетки частот в радиоэлектронных системах*. Труды МАИ, Изд-во МАИ, Москва, выпуск № 98 (2018).
2. Wen Z., Yun E., Sun S., Li W., Hao Q. A Power Stabilized Low Noise Frequency Synthesizer for CPT Atomic Clocks. *Acta Metrologica Sinica*, 46(2), 267–273 (2025). <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2025.02.15>.
3. Ju C., Liu N., Luo Q., Fan J., Yan D. Real-Time Demonstration of a Digital Interpolator-Free Clock Recovery for an FPGA-Based PM-QPSK Coherent Optical Receiver. *Journal of Lightwave Technology*, 43(1), 155–161 (2025). <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2024.3449805>.
4. Pomponio M., Hati A., Nelson C. Ultra-Low Phase Noise Frequency Division with Array of Direct Digital Synthesizers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73(5501310), 1–10 (2024). <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3346538>
5. Louassaa K., Guerrero J. M., Boukerdja M., Cherifi A., Yousaf M. Z. A novel hierarchical control strategy for enhancing stability of a DC microgrid feeding a constant power load. *Scientific Reports*, 15(1), 7061 (2025). <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-89318-0>.
6. Chen J., Wang S., Li Q., Gu Q.J., Xu Z. A V-Band FMCW Signal Generator With Hybrid Dual-Path VCO Technique Achieving 13.6-GHz Chirp Bandwidth. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs*, 72(5), 658–662 (2025). <http://dx.doi.org/10.1109/TCSII.2025.3547342>.
7. Surzhik D. I., Kuzichkin O. R., Vasilyev G. S. Modeling of the Payload Signal Generator of the UAV Radio Transmitter based on the Phase Distortion Autocompensator. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 10(1), 15–18 (2022). <http://dx.doi.org/10.17762/ijritcc.v10i1s.5791>.
8. Zhao B., Zhang Y., Lang S., Fang G., Cui X. Shallow-Layers-Detection Ice Sounding Radar for Mapping of Polar Ice Sheets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 234-243 (2022). <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2021.3074186>.
9. Петров А.А., Давыдов В.В., Гребенникова Н.М. О возможности применения метода прямого цифрового синтеза при разработке синтезаторов частоты для квантовых стандартов частоты. *Радиотехника и электроника*, 63(11). 1159-1164 (2018).
10. Ryabov I. V. Digital signal processing engine design for polar transmitter in wireless communication systems. *Instruments and Experimental Techniques*, 49(3), 376–378 (2006).
11. Pstryakov A. V., Smirnov A. E. Stereo actuator on the basis of digital computing synthesizers. *Elektrosvyaz*, (6), 34–36 (2001).
12. Kuleshov V. N., Lyu Kh., Kuznetsova G. V. Intrinsic noise of multilevel digital computing frequency synthesizers. *Telecommunications and Radio Engineering*, 49(8), 99–102 (1995).
13. В.А. Варгаузин, И.А. Цикин, *Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учебное пособие – Сб.: БХВ-Петербург, 2013.-352с*
14. Сочнев И. В. Моделирование устройства фазовой памяти. *Вопросы радиоэлектроники, серия «Общетехническая»*, (1), 64-74 (2017).