



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.3>

УДК: 621.37

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И КАЛИБРОВКА СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ФАЗОВЫХ ШУМОВ В КОНТУРЕ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ

В.В. Скульдицкий, А.А. Быкадоров, С.В. Мельников, Д.Г. Юдин

**Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»
344000, Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96**

Статья поступила в редакцию 10 июля 2025 г.

Аннотация. Рассматривается задача построения синтезатора частоты на основе фазовой автоподстройки с низким уровнем фазовых шумов. Приводятся основные технические ограничения традиционных реализаций синтезаторов частоты, а также анализ и сравнение известных технических решений структур построения синтезаторов частот. Рассмотрена структура малошумящего синтезатора с переносом частоты в контуре фазовой автоподстройки. Представлены два основных способа калибровки синтезатора частоты на микросхеме со встроенным генератором, управляемым напряжением. Даны полезные практические рекомендации и иллюстративный пример.

Ключевые слова: синтезатор частоты, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум, делитель частоты, калибровка.

Автор для переписки: Скульдицкий Владислав Валерьевич,
vladislavskulditsky@yandex.ru

Введение

В настоящее время в различных областях человеческой деятельности (навигация, радиопеленгация, локация, радиотехническая разведка и др.) для решения практических задач применяются современные генераторы СВЧ-диапазона, требующие постоянного улучшения технических характеристик, таких как стабильность частоты, скорость перестройки, уменьшение уровня фазовых шумов (ФШ) и т.д. Таким образом, совершенствование структуры построения синтезатора частоты (СЧ) является актуальной темой на данный момент.

В [1-3] хорошо освещены электрические параметры современных СЧ. В настоящее время основным способом формирования сигналов СВЧ с высокой степенью фазовой стабильности является синтез частоты с помощью петли цифровой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), обеспечивающей минимальное энергопотребление, простоту и удобство использования. Последнее обязано большому распространению специализированных микросхем, включающих практически все элементы петли ФАПЧ: делители частоты опорного сигнала, частотно-фазовый детектор (ЧФД), стабилизируемый генератор, управляемый напряжением (ГУН), схемы управления, контроля и индикации работоспособности системы [4].

Характерными особенностями цифровой ФАПЧ, ограничивающими ее использование при разработке высококачественных источников СВЧ в радиосистемах, являются: наличие сильных помех от работы дробного делителя частоты в обратной связи, призванного обеспечить малый шаг перестройки по частоте, а также помех от биений гармоник опорного сигнала и сигнала ГУН [4-6]; инерционность при перестройке частоты сигнала ГУН из-за наличия элемента, фильтрующего низкие частоты в канале управления частотой ГУН, значительно усиливающаяся при попытках подавления указанных выше помех путем снижения полосы пропускания петли ФАПЧ [4-8].

Таким образом, существует потребность в выработке альтернативных решений синтеза частоты, позволяющих при умеренном росте энергопотребления

и сложности значительно улучшить параметры выходного сигнала. Одним из таких решений является комбинированный синтез, реализующий преобразование частоты в петле обратной связи ФАПЧ. В условиях миниатюризации радиотехнических систем, устройств и измерительной техники это может дать существенный положительный эффект [9-12].

На данный момент в известной литературе недостаточно полно освещен вопрос, связанный с рассмотрением возможности калибровки синтезатора ФАПЧ с переносом частоты в обратной связи при его реализации на основе микросхем со встроенным ГУН. Такой подход может позволить добиться малого шага перестройки по частоте в широком диапазоне частот, позволяя достичь при этом низкого уровня ФШ.

Для решения ряда задач (например, радиопеленгации) необходимо разработать синтезатор частоты ФАПЧ с низким уровнем ФШ, широким диапазоном выходной частоты, малым шагом перестройки и временем установки. Для реализации такого СЧ необходимо применить структуру с переносом частоты в обратной связи. Такой способ построения СЧ не позволяет использовать автокалибровку, предусмотренную в микросхеме, поэтому необходимо разработать способ внешней калибровки.

1. Исследование известных методов построения синтезатора частоты

Уровень фазовых шумов и стабильность – одни из главных параметров, которые в конечном счете ограничивают чувствительность приемных систем. Стабильность синтезатора и уровень ФШ определяются опорным сигналом и конкретной архитектурой построения синтезатора.

На сегодняшний день наиболее распространенными являются следующие методы синтеза частот: метод прямого аналогового синтеза, основанный на преобразовании ряда опорных частот с последующим выделением нужной частоты (при помощи фильтров); метод прямого синтеза, основанный на формировании сигнала цифровыми методами; метод активного косвенного синтеза, основанный на сравнении выходной частоты с некоторой стабильной

частотой и последующей подстройки выходной частоты по сигналу рассогласования при помощи петли ФАПЧ.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые следует рассмотреть.

Аналоговые синтезаторы реализуются путем смешения отдельных базовых частот с их последующей фильтрацией. На рис. 1 представлена структура такого синтезатора.

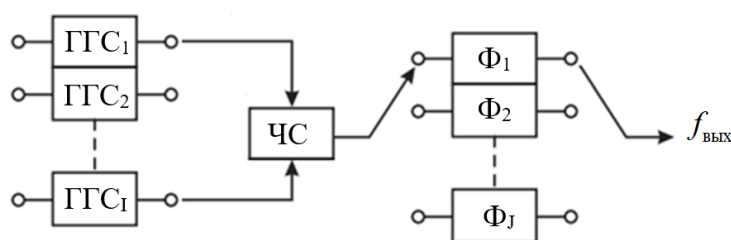


Рис.1. Структура аналогового синтезатора частоты.

Здесь ЧС – частотный смеситель, Φ_j , $j=\overline{1, J}$ – частотный фильтр, $\Gamma\Gamma C_i$, $i=\overline{1, I}$ – генератор гармонического сигнала, $f_{\text{вых}}$ – частота выходного сигнала.

Преимуществами такой системы являются: высокая скорость переключения; использование компонентов с исключительно малым уровнем собственных шумов по сравнению с источниками базовых частот.

Основным недостатком такой системы является большое количество комбинационных составляющих, генерируемых в смесительных каскадах. В связи с этим реализация высокого частотного разрешения (в большом частотном диапазоне) таким способом представляет очень громоздкое решение.

Для сравнительно низкочастотных СЧ, способных формировать качественный сигнал на частотах до 1000 МГц, проще и экономичнее сегодня использовать прямой метод синтеза, реализованный в цифровом вычислительном синтезаторе. Такой метод позволяет получить аналоговый сигнал за счет генерации временной последовательности цифровых отсчетов и их дальнейшего преобразования в аналоговую форму посредством цифро-аналогового преобразования. Структура такого синтезатора представлена на рис. 2.

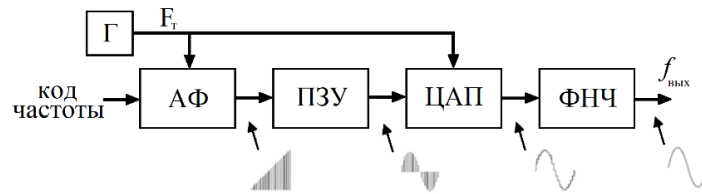


Рис. 2. Структура прямого метода синтеза.

Здесь приняты следующие сокращения: АФ – аккумулятор фазы, ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, ФНЧ – фильтр низких частот, Г – генератор тактового сигнала, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, E_T – частота тактового сигнала.

Основным достоинством данных синтезаторов является возможность достичь очень высокого разрешения по частоте и фазе.

Недостатки такой системы – это ограниченный частотный диапазон, высокое содержание паразитных сигналов из-за ошибок квантования и цифро-аналогового преобразования.

Применение косвенного синтеза позволяет достичь максимально лучших характеристик на высоких частотах при умеренной цене элементной базы. Этот метод синтеза использует принцип сравнения частоты и фазы выходного сигнала, источником которого служит ГУН, с сигналом опорного генератора. Ниже приведен рисунок однопетлевой ФАПЧ.

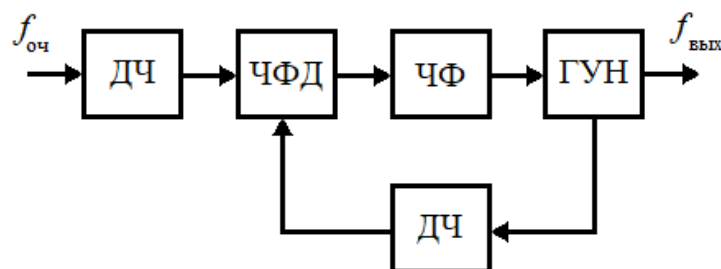


Рис. 3. Структура синтезатора с однопетлевой ФАПЧ.

Здесь ДЧ – делитель частоты, ЧФД – частотно-фазовый детектор, ЧФ – частотный фильтр, $f_{оч}$ – частота опорного сигнала.

Для СЧ с делением частоты в обратной связи выделяют два основных способа: целочисленное деление и дробное деление.

Для способа целочисленного деления значение выходной частоты $f_{\text{вых}}$ определяется по формуле [1]:

$$f_{\text{вых}} = N_{\text{д}} \cdot f_{\text{фд}},$$

где $N_{\text{д}}$ – значение делителя, $f_{\text{вых}}$ – частота сигнала на выходе фазового детектора.

Исходя из приведенной выше формулы, для обеспечения высокого частотного разрешения в таких СЧ требуется существенное увеличение значения делителя частоты в петле ФАПЧ. Также для такого частотного разрешения необходимо увеличение времени установки частоты, что делает такой способ достижения малого шага малополезным для практического использования.

Для реализации малого шага перестройки, до единиц герц и ниже, предложены архитектуры с дробными коэффициентами деления в обратной связи петли ФАПЧ. При этом частота сравнения может быть достаточно высокой. Недостатками такого СЧ являются побочные составляющие, генерируемые из-за переменного коэффициента деления.

Таким образом, можно сказать, что главными преимуществами схемы на основе ФАПЧ являются более чистый спектр выходного сигнала, обусловленный эффективным использованием петлевого фильтра, и значительно меньшая сложность устройства по сравнению с аналоговыми синтезаторами. Основной недостаток такой схемы – это большее время перестройки и значительно более высокий уровень фазового шума по сравнению с аналоговыми схемами.

Синтезаторы, основанные на использовании ФАПЧ, также зависят от используемого ГУН, шум которого может быть ниже эффективного шума опорного сигнала при больших отстройках от основной частоты. Самый критичный параметр ФАПЧ – фазовый шум, характеризующий качество сигнала. ФШ связан с девиацией частоты ГУН и вызванным ею изменением фазы сигнала. Причиной этой девиации является тепловой шум, дробовый шум и фликкер – шум в полупроводниковых элементах.

Проанализировав традиционные реализации синтезаторов частоты, а также известные технические решения, можно сделать вывод, что для выполнения поставленной задачи и достижения положительных результатов рациональнее использовать косвенный синтез, но не в традиционном исполнении, а с переносом частоты в петле ФАПЧ.

2. Структура синтезатора с переносом частоты в обратной связи

Такой способ построения СЧ основан на делении выходной частоты ГУН и смешении ее с сигналом опорной частоты. Это позволяет перенести рабочую частоту обратной связи в более низкий диапазон, упрощая обработку сигнала. Преимуществами такого способа являются: улучшение стабильности, подавление паразитных составляющих, снижение уровня фазовых шумов. Не маловажным остается возможность адаптации СЧ под различные задачи. Структура такого синтезатора представлена на рис. 4.

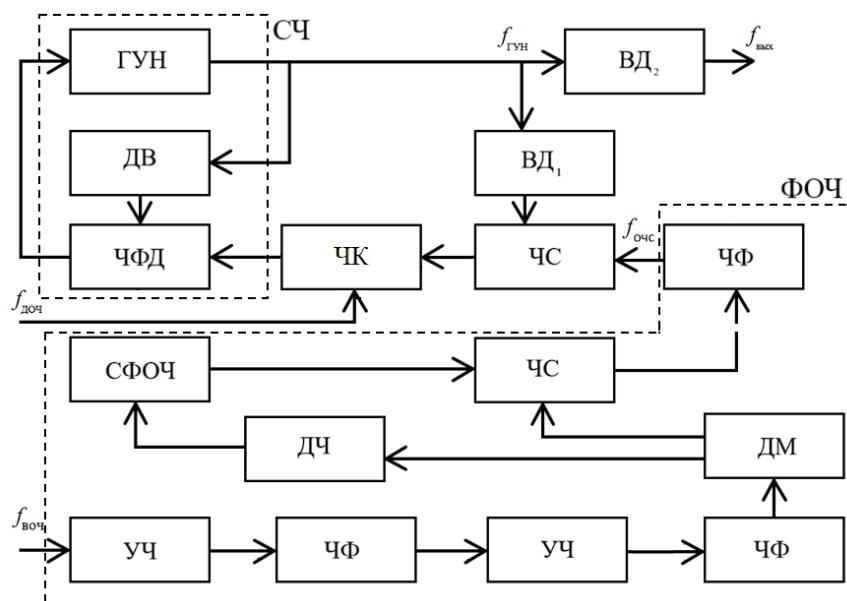


Рис. 4. Структура синтезатора с переносом частоты в обратной связи.

Здесь ФОЧ – формирователь опорной частоты, ДВ – делитель внутренних СЧ; ВД1 – внешний делитель в петле ФАПЧ; ВД2 – внешний делитель частоты выходного сигнала; ДЧ – делитель частоты ФОЧ; ДМ – делитель мощности; СФОЧ – синтезатор формирователя опорной частоты; ЧК – частотный коммутатор;

УЧ – умножитель частоты; $f_{\text{гун}}$ – выходная частота генератора; $f_{\text{очс}}$ – опорная частота синтезатора; $f_{\text{воч}}$ – внешняя опорная частота; $f_{\text{доп}}$ – дополнительная опорная частота.

В структуре данного синтезатора реализован перенос частоты в петле ФАПЧ при помощи ФОЧ, который состоит из ряда умножителей и полосовых фильтров, преобразующих внешнюю опорную частоту, в дальнейшем проходящую через ДМ. Полученные таким образом сигналы используются как сигналы опорной частоты СФОЧ, поделенной через ДЧ и смеситель. На выходе частотного смесителя ФОЧ получаемый сигнал фильтруется и используется для переноса частоты в петле ФАПЧ синтезатора. Для установки СЧ на требуемую частоту необходимо провести калибровку, что подразумевает процесс нахождения необходимых параметров микросхемы для установки на заданную частоту. Также допускается метод калибровки с использованием внешнего опорного сигнала с частотой $f_{\text{доп}}$, приходящего на ЧФД через частотный коммутатор, что позволяет откалибровать синтезатор без применения ФОЧ.

Новизной такой структуры является то, что используя ФОЧ, реализованный на микросхеме малошумящего синтезатора, получаем сигнал с частотой $f_{\text{очс}}$, с низким уровнем ФШ и чистым спектром для переноса частоты в обратной петле СЧ. Благодаря такому решению возможно расширение диапазона генерируемых частот, так как выходная частота ГУН может выходить за пределы, ограниченные только делителем. Также, снижая значение делителя в петле обратной связи за счет переноса частоты, можно добиться понижения уровня ФШ сохраняя малый шаг перестройки. Это может быть полезным для систем, требующих точной подстройки. Но такой способ построения СЧ не позволяет использовать автоматическую калибровку, предусмотренную в микросхеме синтезатора, вследствие чего необходимо применить внешнюю калибровку, выполненную на программируемой логической интегральной схеме.

3. Пример калибровки синтезатора частоты

Для примера такой калибровки рассмотрим СЧ с методом переноса его частоты в обратной связи, реализованный на микросхеме LMX2594 и ФОЧ, исполненный на микросхеме НМС830 [13,14].

В качестве входного опорного сигнала используется сигнал с частотой $f_{\text{воч}} = 100$ МГц, который преобразуется в сигнал с частотой 2 ГГц посредством умножения и фильтрации. Полученный сигнал используется для смесителя и СФОЧ как опорный сигнал. Таким образом на выходе ФОЧ получаем сигнал с частотой в диапазоне от 1825 до 1875 МГц, который применяется для переноса выходной частоты ГУН в обратной петле ФАПЧ синтезатора.

В микросхеме синтезатора LMX2594 имеется семь ГУН, называемых VCO Core. Диапазоны работы этих VCO Core, а также параметров Ccore (эквивалент вносимой емкости в колебательный контур ГУН) представлены в таблице 1 [14].

Таблица 1. Параметры работы генераторов, управляемых напряжением, микросхемы LMX2594.

VCO Core	f_{CoreMin}	f_{CoreMax}	C_{CoreMin}	C_{CoreMax}
VCO1	7500	8600	164	12
VCO2	8600	9800	165	16
VCO3	9800	10800	158	19
VCO4	10800	12000	140	0
VCO5	12000	12900	183	36
VCO6	12900	13900	155	6
VCO7	13900	15000	175	19

Чем больше значение Ccore, тем больше вносимая емкость в колебательный контур и тем ниже частота ГУН. В обычном однопетлевом режиме работы синтезатор LMX2594 сам подбирает параметры для установки на заданную частоту, при этом время установки частоты занимает до 150 мкс. При загрузке калибровочных параметров время установки синтезатора на требуемую частоту может быть снижено до 50 мкс.

Калибровку СЧ можно провести двумя способами. В первом способе калибровку синтезатора LMX2594 можно провести через переключение режима работы синтезатора в режим «без переноса частоты». Для этого необходимо

подать опорный сигнал на вход «Ref» синтезатора [14]. Важно, чтобы эта опорная частота не являлась продуктом переноса выходной частоты синтезатора, а была сгенерирована отдельно. После установки синтезатора на требуемую частоту необходимо считать с регистров синтезатора данные VCO Core и Cscore для установленной частоты. Данный метод калибровки требует коммутации входа «Ref» к внешнему опорному сигналу и к перенесенному по частоте выходному сигналу. Также необходимо отметить, что во время работы синтезатора в режиме «с переносом частоты», опорный сигнал, используемый для калибровки синтезатора, должен быть полностью выключен, иначе он будет вносить негармонические составляющие в выходной сигнал.

Второй способ калибровки не предполагает наличие дополнительного опорного сигнала, как в первом методе, а калибровка выполняется в режиме «с переносом частоты». Калибровка синтезатора происходит по пунктам:

а) установка опорной частоты и всех параметров синтезатора на необходимую частоту, но без загрузки нулевого регистра LMX2594, в котором есть функция автокалибровки [14];

б) далее, путем загрузки и перебора значений в регистрах, которые отвечают за принудительную установку частоты, находят необходимое ядро VCO Core и значение Cscore, при условии появления сигнала захвата частоты на выводе MUXout микросхемы LMX2594 [14];

в) выполняются пункты а) и б) для следующей частоты.

Экспериментально установлено, что для повышения стабильности работы синтезатора с полученными калибровочными данными, а также учета прогрева микросхемы синтезатора, параметр Cscore должен быть в пределах от 0 до 175 и подбор должен начинаться от 0 до 175. Также было установлено, что захват синтезатора устойчивый в пределах значений 15...30 параметра Cscore. Также требуется дополнительная проверка, если значение параметра Cscore равно нулю. В этом случае необходимо проверить захват на следующем ядре VCO Core, и если будет зафиксирован захват с параметром Cscore, равным 175 на следующем ядре, то необходимо записывать именно эти данные. Данная проверка выявляет

точные границы для переключения на следующее ядро VCO Core синтезатора. Также необходимо отметить, что эти границы отличаются от образца к образцу синтезатора.

СЧ обеспечивает на выходе сигнал в широком диапазоне частот от 1 до 15 ГГц с шагом перестройки от 1 кГц. Такой метод также позволяет достичь малое время установки частоты и низкий уровень ФШ, составляющий от минус 110 до минус 128 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц. Полученные результаты уровня ФШ такого синтезатора (для выходных частот 1250, 2500, 5000 и 7500 МГц) представлены на рис. 5-7.

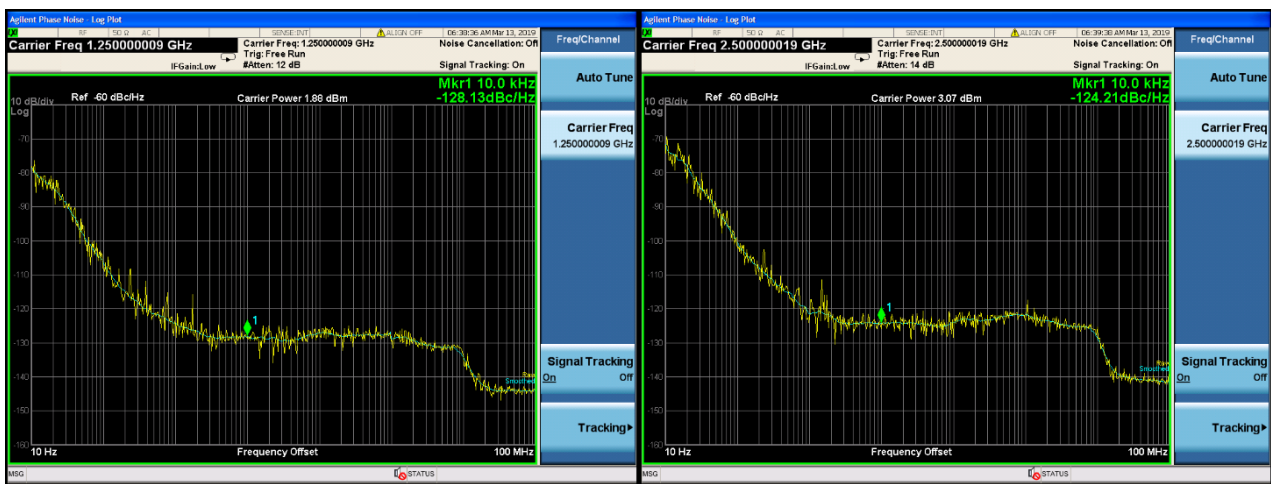


Рис. 5. Уровень фазового шума для частот 1,25 и 2,5 ГГц.

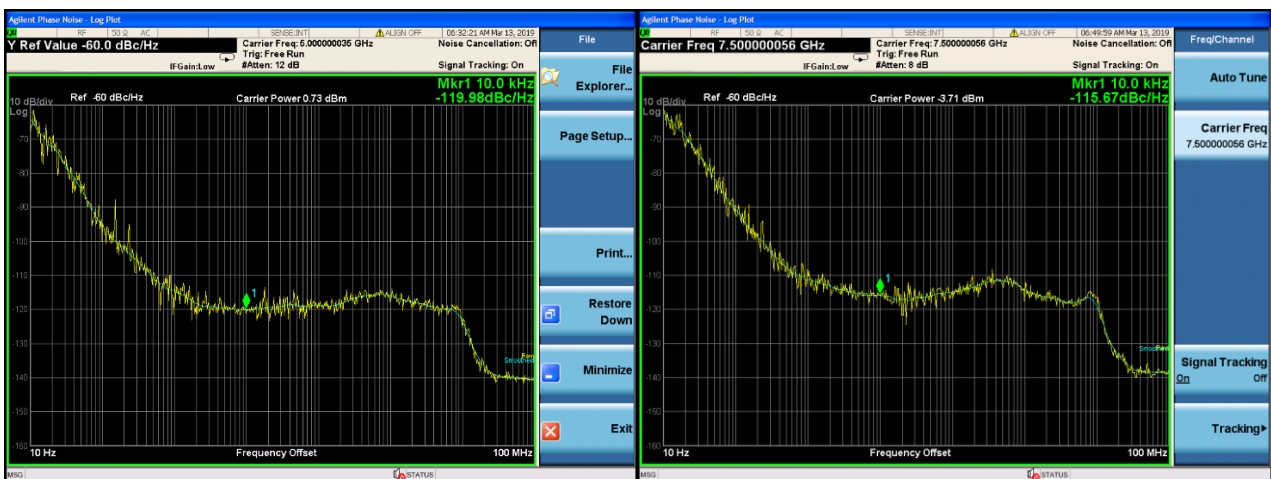


Рис. 6. Уровень фазового шума для частот 5 и 7,5 ГГц.

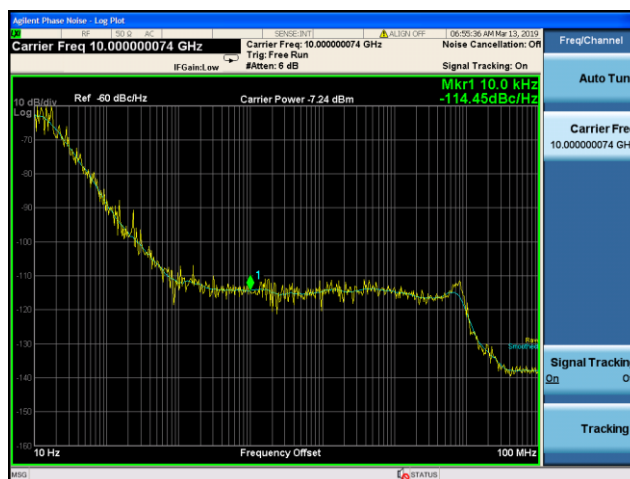


Рис. 7. Уровень фазового шума для частоты 10 ГГц.

Для достижения оптимизации параметров СЧ с переносом частоты в петле ФАПЧ разработаны два способа внешней калибровки. Первый способ на основе дополнительного опорного сигнала без переноса и второй способ с переносом, позволяющий обойтись без дополнительной опорной частоты. Эти способы позволяют с необходимой точностью подбирать значения параметров микросхем, что дает возможность получения малого уровня ФШ и обеспечить малый шаг перестройки выходного сигнала по частоте. Также внешняя калибровка снижает время установки выходного сигнала на требуемую частоту.

Заключение

В ходе работы были рассмотрены и проанализированы как традиционные реализации синтезаторов частоты, так и известные технические решения. Была предложена структура с переносом частоты в обратной связи для построения синтезатора частоты ФАПЧ с низким уровнем ФШ. Такая структура показала свою эффективность в улучшении стабильности, подавлении паразитных составляющих и снижении уровня фазовых шумов.

Для решения ряда задач (например, радиопеленгации) был построен СЧ на основе микросхем LMX2594 и HMC830 со встроенным ГУН. Такой синтезатор позволил получить стабильный сигнал с частотой в диапазоне от 1 до 15 ГГц и уровнем фазовых шумов от минус 110 до минус 128 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц.

Для синтезатора ФАПЧ с переносом его частоты в обратной связи было предложено два метода калибровки: с дополнительным опорным сигналом и без него. Экспериментально установлено, что если необходимо использовать весь диапазон частот, то калибровка необходима для сетки частот с шагом в 5 МГц. Для второго метода установлено, что при прогреве микросхемы синтезатора область значений параметра *Score*, при которых происходит захват частоты, снижается на 5...10 единиц. Поэтому при калибровке необходимо находить минимальное значение для параметра *Score*.

Литература

1. Ямпурин Н.П. и др. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учеб. пособие. – Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет. – 2003.
2. Ченакин А. Частотный синтез: текущие решения и новые тенденции // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – № 1. – С. 92–97.
3. Кузменков А.С., Поляков А.Е., Стрыгин Л.В. Обзорный анализ современных архитектур синтезаторов частоты с ФАПЧ // Труды МФТИ. – 2013. – № 3. – С. 121–133.
4. Рыков С.Г., Кулешов В.Н. Оптимизация параметров кольца ФАПЧ синтезатора частот по уровню фазовых шумов и дискретных составляющих // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2011. – № 4. – С. 124–126.
5. Леньшин А.В., Тихомиров Н.М., Тихомиров В.Н., Шаталов Е.В. Построение малощумящих быстродействующих синтезаторов частот для УКВ радиосвязи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – № 5. – С. 25–28.
6. Скоторенко И.В. Метод уменьшения уровня побочных спектральных составляющих в синтезаторах частот с ФАПЧ, имеющих дробный делитель частоты // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2-1 (24). – С. 102–105.

7. Завьялов И.В., Хабитуева Е.И., Цикин И.А. Экспериментальное исследование синтезатора частот СВЧ диапазона // Материалы Всерос. конф. «Неделя науки ИЭиТ». – С.-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС – 2024. – С. 39–41.
8. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое построение синтезаторов частот СВЧ-диапазона. – М: Горячая линия – Телеком, 2021. – 280 с.
9. Patent № US 9,628,066 B1 United States, Int. Cl. H03L 7/06 (2006.01), H03K 7/4 (2006.01), H03L 7/099 (2006.01), H03L 7/8 (2006.01). Fast switching, low phase noise frequency synthesizer: № 15/260,258: filed 08.09.2016: date of patent 18.04.2017 / Chenakin O., Nediyanath S. – 13 p.
10. Patent № US 8,373,463 B1 United States, Int. Cl. H03L 7/06 (2006.01). Low phase-noise PLL synthesizer with frequency accuracy indicator: № 13/241,532: filed 23.09.2011: date of patent 12.02.2013 / Chenakin O. – 5 p.
11. Chenakin A., Ojha S., Nediyanath S. A 26.5 GHz PLL Synthesizer with Low Phase Noise Characteristics. // Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2011.
12. Патент № RU 184346 U1 Российская Федерация, МПК H03L 7/16(2006.01). Синтезатор частот: № 2018123112: заявл. 25.06.2018: опубл. 22.10.2018 / Горевой А.В. – 8 с.
13. HMC830 Fractional-n Pll with integrated VCO. Datasheet. – URL: www.analog.com (дата обращения: 20.05.2025).
14. LMX2594 15-GHz Wideband PLLatinum™ RF Synthesizer With Phase Synchronization and JESD204B Support. Datasheet. URL: www.analog.com (дата обращения: 20.05.2025).

Для цитирования:

Скульдицкий В.В., Быкадоров А.А., Мельников С.В., Юдин Д.Г. Оптимизация структуры и калибровка синтезатора частоты с низким уровнем фазовых шумов в контуре фазовой автоподстройки. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.3>