

# Синтезатор частоты с ФАПЧ с дробным коэффициентом деления частоты и интегрированным 6 ГГц ГУН

Мишель АЗАРЯН (Michel AZARIAN)  
Перевод: Владимир РЕНТЮК  
Александр ФЕДОРОВ  
Aleksandr.Fedorov@ptelectronics.ru

Синтезаторы с дробными коэффициентами деления частоты, так называемые Fractional-N-синтезаторы, имеют целый ряд преимуществ по сравнению с синтезаторами с целочисленными коэффициентами деления частоты, именуемыми Integer-N-синтезаторами. Основными достоинствами первых являются высокая скорость перестройки частоты и снижение уровня фазового шума вблизи несущей частоты. Но даже несмотря на эти преимущества, разработчики систем с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ, англ. PLL — Phase-locked loop) редко поддаются соблазну их применять. Причина — в сложившемся мнении о трудности схемотехнической реализации таких систем и ложное представление о том, что шумы  $\Sigma\Delta$ -модулятора становятся минусом при использовании синтезаторов с дробным делением частоты. Однако LTC6948 предоставляет системным проектировщикам преимущества Fractional-N ФАПЧ без перечисленных выше недостатков. В отличие от типичных Fractional-N-синтезаторов, решение на базе этой микросхемы просто в реализации и имеет фазовые шумы на уровне синтезаторов с целочисленным делением частоты (Integer-N-синтезаторов).

Микросхема LTC6948 содержит встроенный генератор, управляемый напряжением (ГУН), высокого класса точности с рабочей частотой до 6,39 ГГц. Микросхема размещена в корпусе размером всего 4x5 мм, что существенно уменьшает общие габариты конечной системы ФАПЧ. Кроме того, для облегчения разработки системы ФАПЧ на основе микросхемы LTC6948 предлагается бесплатный программный инструмент FracNWizard, ко-

торый в значительной мере упрощает проектирование и моделирование такой сложной системы, как ФАПЧ с дробным коэффициентом деления частоты.

Для того чтобы создать систему ФАПЧ с дробным коэффициентом деления частоты мирового класса, микросхема LTC6948 использует высокоэффективный частотно-фазочастотный детектор и ГУН от микросхемы LTC6946 и добавляет к нему 18-битный  $\Sigma\Delta$ -модулятор.

## Для чего нужна система ФАПЧ с дробным коэффициентом деления частоты?

Микросхема LTC6946 целочисленной ФАПЧ [1] генерирует выходной сигнал с частотой  $f_{LO(INT\_N)}$ , который связан с сигналом опорной частоты  $f_{REF}$  следующим образом:

$$f_{LO(INT\_N)} = (f_{REF}/R) \times (N/O),$$

где  $R$  — фиксированный коэффициент деления опорной частоты (ДФКД);  $N$  — переменный коэффициент деления в петле обратной связи ГУН (ДПКД);  $O$  — коэффициент деления выходного сигнала (ПДЧ).

На рис. 1 показана упрощенная блок-схема синтезатора на базе LTC6946 вместе с контурным фильтром петли обратной связи, необходимым для ее стабилизации, и внешним задающим термостатированным кварцевым генератором, обеспечивающим нужный сигнал опорной частоты. Микросхема LTC6946 поддерживает превосходную общую производительность, но для некоторых приложений может понадобиться, чтобы выходная частота  $f_{LO}$  изменялась более мелкими шагами  $f_{STEP(INT\_N)}$  или схема была настроена на отслеживание определенной частоты с более высоким разрешением. Попытка

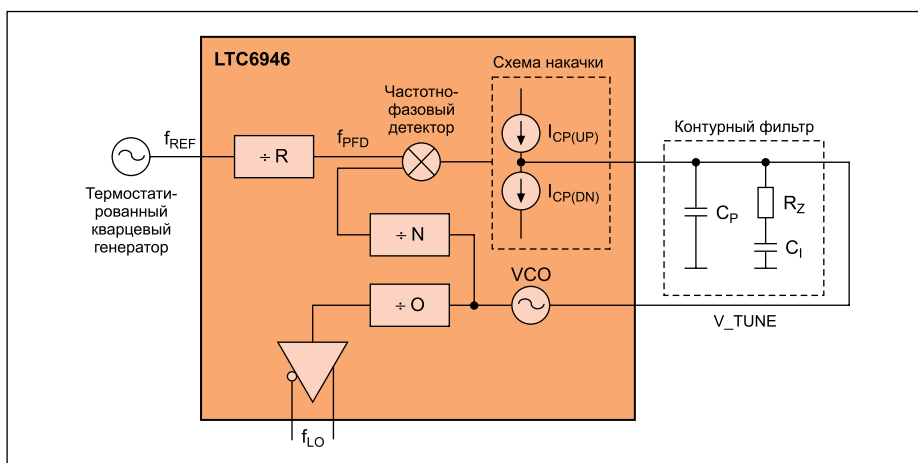


Рис. 1. Упрощенная блок-схема LTC6946 с внешним опорным тактовым генератором и фильтром нижних частот

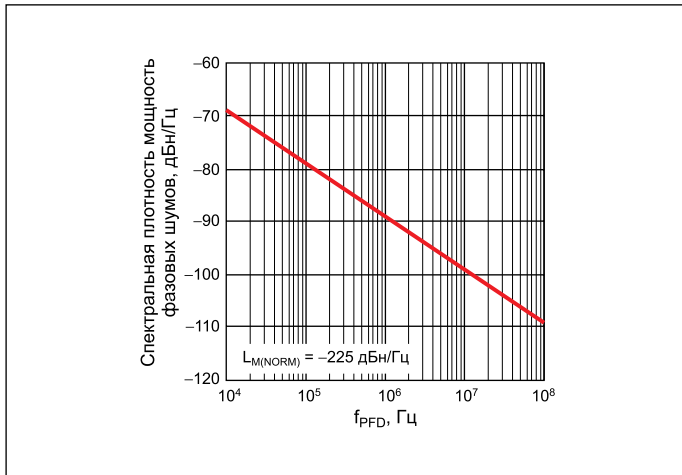


Рис. 2. Уровень минимальной спектральной плотности мощности фазовых шумов ФАПЧ для фиксированного значения  $f_{LO}$  в зависимости от  $f_{PFD}$

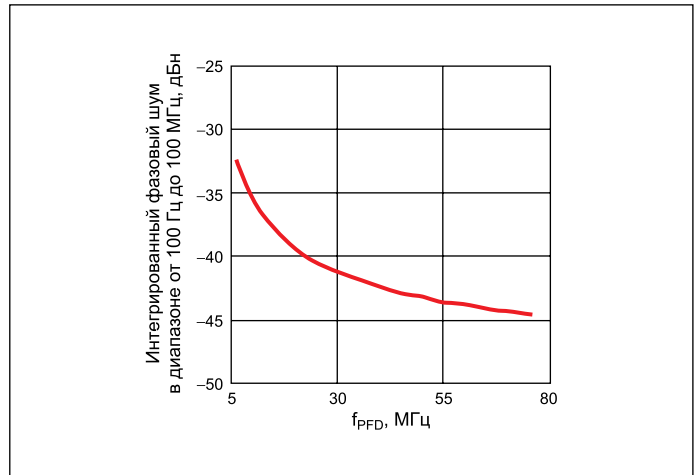


Рис. 3. Интегрированный фазовый шум в диапазоне от 100 Гц до 100 МГц со смещением в обе стороны от  $f_{LO} = 6,236$  ГГц

использовать систему целочисленной ФАПЧ в таких приложениях требует снижения скорости реакции частотно-фазового детектора, причем частота сигнала на входе детектора  $f_{PFD(INT\_N)}$  будет определяться как:

$$f_{PFD(INT\_N)} = f_{STEP(INT\_N)} \times O.$$

Нередко в таких ситуациях частота  $f_{PFD}$  настолько мала, что это нельзя осуществить практически, но даже если бы это и было возможно, то вероятный минимальный уровень внутриполосных фазовых шумов в полосе частот ( $L_{M(OUT)}$ ) окажется непомерно высоким:

$$L_{M(OUT)} = L_{M(NORM)} + 10 \lg(f_{PFD}) + 20 \lg(f_{LO}/f_{PFD}),$$

где  $L_{M(NORM)}$  — нормированный минимальный в полосе частот фазовый шум ФАПЧ.

Объединим два условия для  $f_{PFD}$ :

$$L_{M(OUT)} = L_{M(NORM)} + 20 \lg(f_{LO}) - 10 \lg(f_{PFD}).$$

Для микросхем с ФАПЧ параметр  $L_{M(NORM)}$  является фиксированным. Это означает, что для одной и той же нужной разработчику выходной частоты  $f_{LO}$  минимальный уровень внутриполосных фазовых шумов в зависимости от  $f_{PFD}$  будет уменьшаться по закону  $-10 \lg(f_{PFD})$ . Другими словами, меньшие частоты  $f_{PFD}$  приводят к увеличению минимального уровня внутриполосных фазовых шумов. На рис. 2 представлен график зависимости, описываемой приведенным выше уравнением, для случая  $f_{LO} = 6,236$  ГГц при изменении  $f_{PFD}$  от 10 кГц до 100 МГц при условии  $L_{M(NORM)} = -225$  дБн/Гц, что является типовым значением для LTC6948 в режиме дробного деления частоты.

Рис. 2 показывает, что частота  $f_{PFD}$  должна быть как можно выше, но она сильно ограничена значением  $f_{STEP(INT\_N)}$ , то есть размером шага изменения частоты в целочисленном режиме ФАПЧ. Дробное деление частоты

в системе ФАПЧ позволяет минимизировать влияние такой тесной взаимосвязи между  $f_{STEP}$  и  $f_{PFD}$ . Режим дробного деления частоты в системах ФАПЧ обладает гораздо меньшей  $f_{STEP}$ , чем в режиме с целочисленным коэффициентом деления частоты ФАПЧ, при гораздо более высокой частоте  $f_{PFD}$ .

Для дальнейшего изучения и иллюстрации влияния  $f_{PFD}$  на шум  $f_{LO}$  канала связи фазовый шум проинтегрирован в полосе частот от 100 Гц до 100 МГц со смещением в обе стороны от  $f_{LO} = 6,236$  ГГц. Для этого использовались практические настройки LTC6948 в системе FracNWizard. На рис. 3 отображены суммированные результаты такого моделирования.

Интегрированный шум, показанный на рис. 3, относится непосредственно к величине сигнал-шум (SNR) канала связи.

Для того чтобы свести к минимуму уровень достижимых внутриполосных шумов от модулятора в LTC6948, существуют интеллектуальные методы ограничения шума. В дробном режиме деления частоты она может обеспечить нормированную внутриполосную спектральную плотность мощности фазовых

шумов  $L_{M(NORM)}$  на уровне  $-225$  дБн/Гц, что практически совпадает со значением этого параметра, равного  $-226$  дБн/Гц в режиме целочисленного деления частоты. Оба значения позволяют микросхеме LTC6948 занять достойное место среди элитных синтезаторов частоты с ФАПЧ.

Для улучшения пропускной способности современные каналы связи используют сложные схемы модуляции. Требуемое соотношение сигнал-шум в таких каналах в 40 дБ и выше достаточно распространенное явление. На рис. 3 показано, что более высокие значения частоты  $f_{PFD}$  помогают легко выполнить эти условия.

### Что скрывается внутри микросхемы LTC6948?

LTC6948 позаимствовала высокоэффективный частотно-фазовый детектор и ГУН от микросхемы LTC6946 и, чтобы получить схему ФАПЧ с дробным делением частоты мирового класса, добавила к ним 18-битный  $\Sigma\Delta$ -модулятор. На рис. 4 изображена блок-схема LTC6948 вместе с контурным филь-

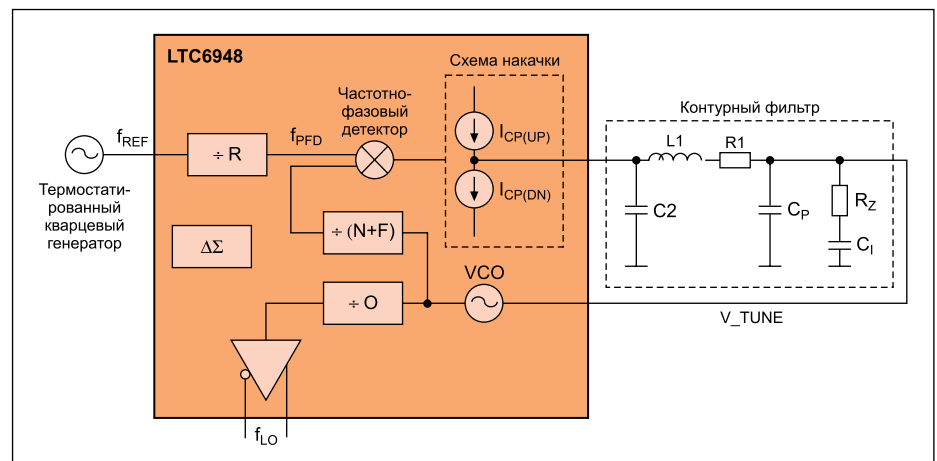


Рис. 4. Упрощенная блок-схема LTC6948 с внешним опорным тактовым генератором и контурным фильтром

тром низких частот (ФНЧ) и внешним задающим кварцевым генератором, который обеспечивает входную опорную частоту синтезатора. Для LTC6948 частота выходного сигнала  $f_{LO(FRAC\_N)}$  и опорная частота  $f_{REF}$  связаны следующим образом:

$$f_{LO(FRAC\_N)} = (f_{REF}/R) \times ((N+F)/O),$$

где  $F = NUM/2^{18}$  — является дробным значением;  $NUM$  — это числитель, запрограммированный во внутреннем  $\Sigma\Delta$ -модуляторе LTC6948. Его значение может быть любым целым числом от 1 до  $(2^{18}-1)$  (или от 1 до 262 143), таким образом, мы имеем  $0 < F < 1$ . Как уже упоминалось, частота  $f_{STEP(FRAC\_N)}$  будет меньше по сравнению с  $f_{STEP(INT\_N)}$ , несмотря на то, что  $f_{PFD(FRAC\_N)}$ , как правило, больше, чем  $f_{PFD(INT\_N)}$ .

Это позволяет разработчику выбрать наибольшее значение  $f_{PFD(FRAC\_N)}$ , которое дает  $f_{REF}$ , и воспользоваться возможностью уменьшения минимального уровня внутрисигнальных фазовых шумов, как показано на рис. 2. Однако следует убедиться, что частота  $f_{STEP(FRAC\_N)}$  достаточно мала, чтобы обеспечить нужное изменение частоты при  $f_{LO(FRAC\_N)}$ .

Следующее уравнение относится к определению размера шага изменения частоты по отношению к скорости реакции частотно-фазового детектора, которая определяется значением  $f_{PFD}$ :

$$f_{STEP(FRAC\_N)} = f_{PFD(FRAC\_N)}/2^{18},$$

и показывает, что для одного и того же значения  $f_{PFD}$  значение частоты  $f_{STEP(FRAC\_N)}$  в  $2^{18}$  раз меньше, чем  $f_{STEP(INT\_N)}$ . Так, частота  $f_{LO}$ , равная 6,236 ГГц, может генерироваться микросхемой LTC6948 при условии  $f_{PFD}$  50 МГц, в результате чего мы имеем пики превышения уровня фазового шума с дискретизацией по частоте, равной 190,7 Гц ( $f_{STEP(FRAC\_N)}$ ). Это означает, что проектировщик может обеспечить точность генерации любой частоты во всем диапазоне ГУН с максимальной погрешностью в  $\pm 190,7/2 = 95,4$  Гц.

Максимальная погрешность в 95,4 Гц из сигнала частотой, примерно равной 6,236 ГГц, является 0,015 ppm ( $10^{-6}$ ) или 15 ppb ( $10^{-9}$ ), что превышает точность практически любого генератора опорной частоты. Используя установку выходного делителя более единицы (значение 0), мы сокращаем абсолютную величину шага.

Применение  $\Sigma\Delta$ -модулятора для выполнения функции дробления частоты в ФАПЧ в рассматриваемой микросхеме является предпочтительным методом, потому что  $\Sigma\Delta$ -модулятор, использующий при ее интеллектуальном формировании, обеспечивает весьма высокую разрешающую способность в части шумов квантования (LTC6948 поддерживает возможность установки до  $2^{18}$  шагов квантования). Другими словами, шум квантования в полосе уменьша-

ется за счет переноса спектра внеполосного шума в более высокую область.

Такой внеполосный шум легко отфильтровать с помощью пассивных компонентов, показанных на рис. 4. Как будет описано далее, определение значений этих компонентов — непосредственная задача программного обеспечения FracNWizard.

Внутренний  $\Sigma\Delta$ -модулятор LTC6948 можно выключить, что переведет микросхему в режим ФАПЧ с целочисленным делением частоты.

Системы ФАПЧ с дробным делением имеют три типа паразитных продуктов в виде иголок в структуре спектра их выходного сигнала — это паразитные составляющие с частотой опорного генератора и непредсказуемые составляющие от целочисленных и дробных делений частоты. Однако микросхема LTC6948 не имеет в спектре выходного сигнала абсолютно никаких паразитных продуктов от дробления (или  $\Sigma\Delta$ -модуляции).

### Вам не придется дополнительно расплачиваться за использование режима дробления частоты

Обычно за использование дробления частоты приходится расплачиваться, поскольку добавление  $\Sigma\Delta$ -модулятора к ФАПЧ может иметь серьезные недостатки, такие как снижение общей производительности (это наиболее значимый недостаток), добавочный шум  $\Sigma\Delta$ -модулятора и сложность конструкции. Но это не относится к LTC6948, о чем и пойдет речь далее.

### Общие ошибочные суждения

Системы ФАПЧ с дробным делением частоты имеют три типа паразитных продуктов в структуре их выходного сигнала:

- Составляющие с частотой опорной частоты.
- Составляющие с целочисленными значениями.
- Составляющие с дробными значениями.

Наиболее проблемными становятся непредсказуемые составляющие помех. Если характеристики помехи известны (ее частота и уровень), то разработчик системы может либо принять необходимые меры и подавить ее, либо убедиться, что она не оказывает отрицательного воздействия на работоспособность системы в целом. Но если параметры помехи неизвестны и она имеет случайный, непрогнозируемый характер, то у проектировщика системы обычно нет подходящих вариантов для ее устранения.

### Низкий уровень помех от опорной частоты в LTC6948

Произвольные помехи от опорной частоты (или от частотно-фазового детектора) предсказуемы и наблюдаются в системах ФАПЧ с целочисленным делением частоты. Спектральные составляющие таких помех совпадают с частотой  $f_{PFD}$  и ее гармониками в составе выходного сигнала  $f_{LO}$  относительно его центральной частоты. LTC6948 имеет превосходные характеристики относительно проникновения в выходной сигнал помех с частотой опорного сигнала. На рис. 5 показана типичная характеристика LTC6948 по уровню таких помех для выходного сигнала с частотой примерно 2,3 ГГц:

- RBW — ширина полосы пропускания приемника;
- VBW — ширина полосы частот видеосигнала;
- LOOP BW — полоса пропускания контурного фильтра.

На рис. 5 видно, что микросхема LTC6948 предустановлена в режим дробного деления частоты и генерирует выходной сигнал с частотой  $f_{LO}$ , равной 2,378 ГГц. Спектр выходного сигнала содержит составляющие с опорной частотой, смещенные от  $f_{LO}$  на 61,44 МГц ( $f_{PFD}$ ), и гармоники сигнала с частотой, кратной  $f_{PFD}$ . Составляющие производные от опорной частоты на выходе LTC6948 относительно низкие по уровню в сравнении с другими подобными устройствами. Даже наиболее значимый всплеск, смещенный от  $f_{LO}$  на 121,88 МГц,

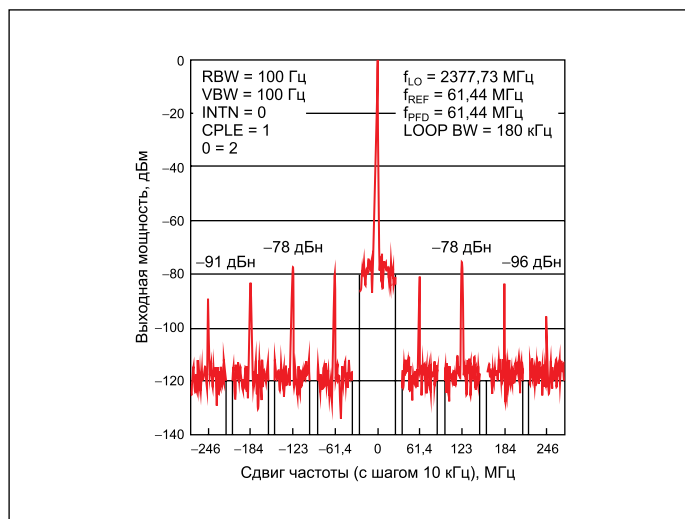


Рис. 5. Помехи от частоты  $f_{PFD}$  для LTC6948 в условиях  $f_{LO} = 2,378$  ГГц

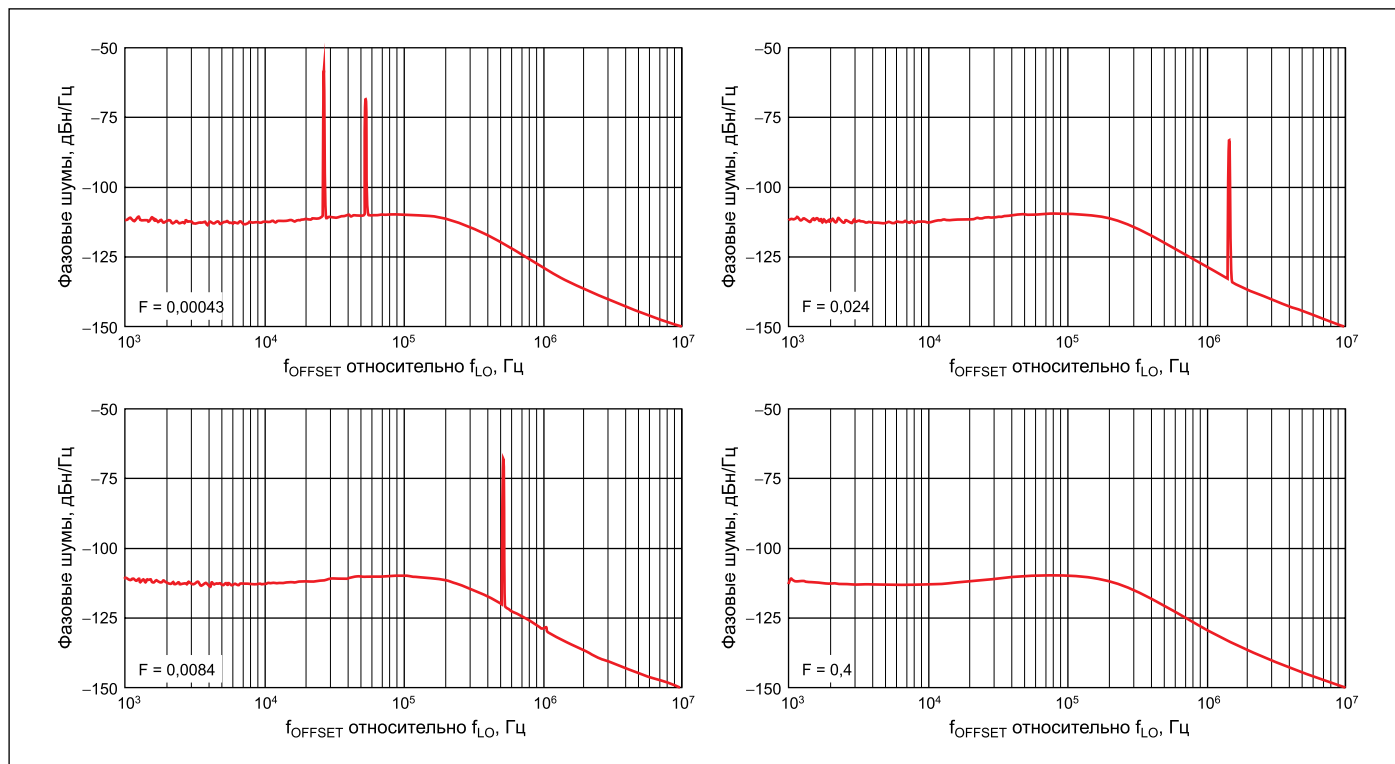


Рис. 6. Граничные уровни целочисленных помех в выходном сигнале LTC6948 для условий установки значения  $F$  в диапазоне от  $f_{LO} = 2,365$  ГГц ( $F = 0,00043$ ) до  $f_{LO} = 2,378$  ГГц ( $F = 0,4$ )

несущественен. Его мощность, как можно видеть на спектрограмме, достаточно мала, и он расположен слишком далеко от  $f_{LO}$ , чтобы причинить вред в большинстве реальных приложений.

### Низкие и предсказуемые помехи от целочисленного деления

Граничные помехи от целочисленного деления как физическое явление присущи и системам ФАПЧ с дробным делением частоты. Выходные сигналы ГУН порождают биения в результате интермодуляции с гармониками от  $f_{PFD}$ . Эти частотные биения появляются как пики (на инженерном сленге — «иголочки») около значения частоты  $f_{LO}$  только тогда, когда они находятся в пределах или вблизи границ полосы пропускания (англ. BW — *Bandwidth*) ФАПЧ. Другими словами, эти составляющие не ослабляются контурным фильтром и появляются в спектре выходного сигнала синтезатора, когда параметр  $F$  установлен очень близким к 0 или 1. Рис. 6 иллюстрирует это на основе измерений, проведенных с микросхемой LTC6948.

Как только  $F$  сдвигается от 0 или от 1, целочисленные граничные выбросы ослабляются контурным фильтром. Как только  $F$  приближается к  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$  и т. д., подобный механизм возникает, но в экспоненциально меньшей степени, так что основные целочисленные выбросы могут появиться при  $f_{PFD} \times F < BW$  или  $f_{PFD} \times (1-F) < BW$ .

В большинстве случаев, при тщательном выборе значения частоты  $f_{REF}$  и, возможно, при использовании более чем одного значения  $f_{PFD}$  и/или  $f_{REF}$  разработчик системы может избежать этих выбросов, так как они предопределены и их положение известно заранее.

Еще лучше то, что для большинства приложений граничные уровни целочисленных помех у LTC6948 (максимум  $-60$  дБн в примере, показанном на рис. 6) настолько малы, что с высокой степенью вероятности они будут ниже интегрированного уровня шума канала связи системы в целом. Интегрированный уровень шумов в пределах от  $-40$  до  $-50$  дБн в канале связи, как правило, считается достаточно малым и обеспечивает очень высокую пропускную способность. Это означает, что иголочки с максимумом в  $-60$  дБн находятся по крайней мере на  $10$  дБ ниже приемлемого уровня шума

канала и не должны оказывать влияния на общую эффективность работы системы.

Уменьшенные граничные уровни целочисленных помех в LTC6948 (причем даже без фильтрации внутри полосы частот) дают ей конкурентное преимущество перед другими микросхемами с дробной ФАПЧ, в которых именно граничные целочисленные уровни помех доминируют в энергетическом спектре выходного сигнала канала.

### Отсутствие помех от дробления частоты

LTC6948 не имеет в спектре выходного сигнала непредсказуемых помех, вызванных дроблением частоты, которые засоряют спектр сигнала у большинства других, имеющихся на рынке микросхем с режимом дробного деления частоты. Воздействие от непредсказуемых помех даже удалено из формулы, описывающей поведение LTC6948.

### Шумы $\Sigma\Delta$ -модуляции

Для минимизации уровня внутрисполосных шумов от модулятора в LTC6948 используются интеллектуальные методы ограничения шума. В режиме дробного деления частоты микросхема может обеспечить нормированную внутрисполосную спектральную плотность мощности фазовых шумов  $L_{M(NORM)}$  на уровне всего в  $-225$  дБн/Гц, что почти совпадает со значением этого параметра в режиме целочисленного деления частоты, который составляет  $-226$  дБн/Гц. Оба значения позволяют LTC6948 занять достойное место среди элиты синтезаторов частоты с ФАПЧ.

### Легкость проектирования

Пример практического проектирования радара представлен ниже. Он показывает, насколько легко выполняется процесс с помощью программного обеспечения FracNWizard, специально разработанного и предназначенного для проектирования встраиваемых в общие системы каскадов на LTC6948. При этом нет необходимости блуждать в запутанных лабиринтах формул, чтобы выбрать опти-

мальный режим, — вместо этого предлагается достаточно простой и ясный процесс проектирования. С использованием данного программного инструмента все технические характеристики LTC6948 легко достижимы.

### Скорость перестройки ГУН

В LTC6948 предусмотрено несколько внутренних поддиапазонов перестройки ГУН. Это необходимо, чтобы покрыть весь рабочий диапазон синтезируемых частот. Каждый раз, когда на LTC6948 подается питающее напряжение или ее частота изменяется по команде управления, значение рабочей частоты должно быть доведено до микросхемы и она сможет запустить свой внутренний алгоритм поиска для выбора и включения нужного поддиапазона ГУН. Чтобы ограничить время блокировки ФАПЧ, время перестройки ГУН, естественно, должно быть сведено до минимума. Например, применение такой скачкообразной перестройки частоты дает преимущество, выраженное в сокращении общего времени блокировки. LTC6948 может завершить настройку своего ГУН за время чуть более 10 мкс, как показано на рис. 7. Это на порядок быстрее, чем в большинстве альтернативных устройств.

### Зачастую скрытые в спецификациях, но имеющие первостепенное значение шумы типа 1/f

Опорный тактовый генератор может быть самым дорогим компонентом в системе. Правильный и тщательный отбор микросхем с ФАПЧ помогает избежать ухудшения фазового шума, в котором в идеале доминирует именно опорная частота. Однако нередко забывают, что кроме этого, шумы типа 1/f (называемые еще фликкер-шумами) микросхемы с ФАПЧ являются важным параметром в ее спецификации. Такой шум может весьма негативно влиять на общий уровень внутрисполосного фазового шума. На рис. 8 видно, как увеличение шума типа 1/f ухудшает общий уровень внутрисполосного шума.

Рис. 8 базируется на том, что уровень нормированного внутрисполосного фазового шума равен  $-225$  дБн/Гц. Кривые показывают реальные результаты, которые обычно большинство поставщиков микросхем с ФАПЧ стараются скрыть. А именно они демонстрируют, насколько сильное влияние оказывают шумы типа 1/f на общий уровень внутрисполосного фазового шума.

Даже если изготовителем в спецификации утверждается, что микросхема с ФАПЧ имеет прекрасное значение нормированного внутрисполосного фазового шума (также известное как показатель добротности и, следовательно, качества), вполне вероятно, что в спецификации не указан такой же по значению уровень шумов типа 1/f.

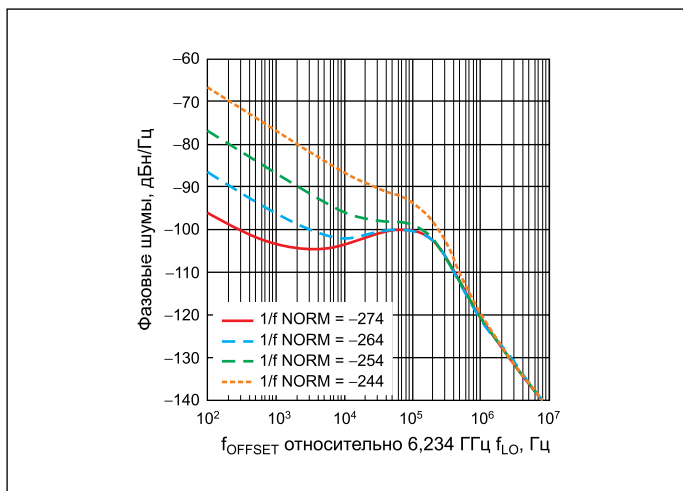


Рис. 8. Влияние различных нормированных уровней внутрисполосных шумов типа 1/f на характеристики шумов, близких к рабочей полосе частот, и общего внутрисполосного фазового шума

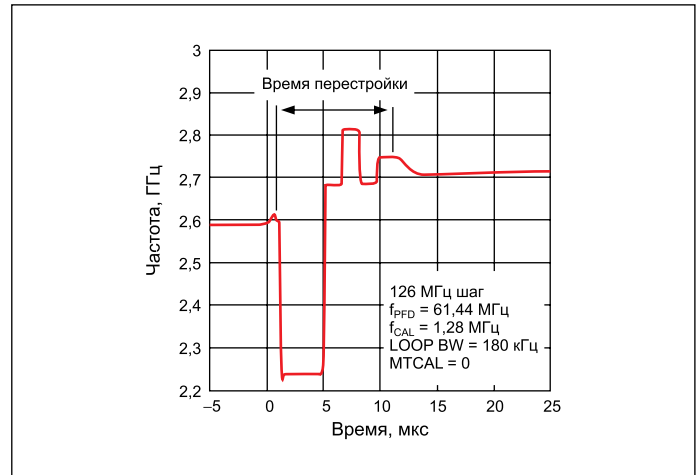


Рис. 7. Типичное время перестройки ГУН

Таким образом, спецификация подобной микросхемы в части внутрисполосного фазового шума не является в общем виде достоверной. LTC6948 имеет в своей спецификации впечатляюще низкий уровень нормированного фазового шума в области частот 1/f (он нормирован по отношению к 1 Гц со сдвигом на 1 Гц относительно  $f_{LO}$ ). Это эквивалентно уровню фазового шума  $-134$  дБн/Гц для входной тактовой частоты в 100 МГц со сдвигом на 100 Гц. Таким образом, LTC6948 бросает вызов 100 лучшим мегагерцевым кварцевым генераторам, имеющимся на рынке. Следующая формула показывает, как преобразовать нормированное значение шума 1/f (значение  $L_{1/f}$ ) к значению величины смещения фазовых шумов  $L_{OUT(1/f)}(f_{OFFSET})$ , смещенное на величину  $f_{OFFSET}$  от заданного значения частоты  $f_{LO}$ :

$$L_{OUT(1/f)}(f_{OFFSET}) = L_{1/f} + 20\lg(f_{LO}) - 10\lg(f_{OFFSET}).$$

Доплеровский радар предложен в качестве примера именно потому, что уровень шумов 1/f может иметь для него решающее значение. Доплеровский радиолокатор основан на обнаружении небольших сдвигов частоты, возникающих в частоте отраженного сигнала по отношению к частоте облучения движущегося объекта. Высокие характеристики LTC6948 в части уровня шумов типа 1/f позволяют обеспечить необходимый динамический диапазон на уровне сдвига в 186 Гц, что значительно увеличивает шансы обнаружения объекта, движущегося со скоростью всего 10 миль/ч (0,44704 м/с). Поскольку отраженный сигнал сильно ослабляется, именно достаточно высокий динамический диапазон приемника радара является ключом к правильной расшифровке сигнала.

### Пример проектирования — доплеровский радар

Доплеровский радиолокатор полагается на обнаружение небольших сдвигов частоты, возникающих в отраженном сигнале относительно частоты облучения движущегося объекта. Сдвиг частоты отраженной электромагнитной волны  $f_D$  относительно частоты облучения  $f_{LO}$ , называемый доплеровским эффектом, связан со скоростью движения объекта  $V$  и со скоростью света следующим образом:

$$f_D = 2v(f_{LO}/c).$$

Современные области использования доплеровских радаров включают также отслеживание и медленно движущихся объектов, например при видеонаблюдении. Достаточно медленно движущийся объект, скорость которого составляет 10 миль/ч (0,44704 м/с), дает для частоты облучения  $f_{LO} = 6,236$  ГГц сдвиг частоты  $f_D$  всего на 186 Гц (предполагается, что скорость света  $c = 671 \times 10^6$  миль/ч). Как показано на рис. 8, шумовые характеристики типа 1/f LTC6948 обеспечивают

необходимый динамический диапазон при смещении на 186 Гц, увеличивая шансы обнаружения объекта, движущегося со скоростью 10 миль/ч. Поскольку отраженный сигнал приходит сильно ослабленным, достаточный запас по динамическому диапазону в приемнике радара становится ключом к правильной расшифровке сигнала.

Микросхема LTC6948, обладающая более низким уровнем составляющих шума типа  $1/f$  и отличными характеристиками по общему уровню фазовых шумов, способна также быстро определять объекты, движущиеся со значительно большей скоростью. Например, скорость объекта составляет 200 миль/ч, если частота облучения  $f_{LO} = 6,236$  ГГц, то мы имеем сдвиг частоты, вследствие доплеровского эффекта равный  $f_D = 3,72$  кГц.

Рис. 8 как раз и иллюстрирует тот факт, что радиолокационная система, выполненная на базе микросхемы LTC6948, именно за счет лучшего динамического диапазона позволяет обеспечить хорошую реакцию на смещение частоты в 3,72 кГц. Теперь, когда мы убедились, что эффективность и производительность LTC6948 отвечает требованиям для доплеровских радаров, давайте рассмотрим тонкости процесса проектирования.

### Выбор варианта исполнения микросхем с ФАПЧ

Для разработки схемы с ФАПЧ при проектировании доплеровского радара, в котором частота облучения  $f_{LO}$  равна 6,236 ГГц, первоначально необходимо правильно вы-

Таблица. Диапазоны возможной установки выходной частоты LTC6948 в зависимости от варианта ее исполнения

Выходной делитель ГУН	Диапазон частот, ГГц			
	LTC6948-1	LTC6948-2	LTC6948-3	LTC6948-4
0_DIV=1	2,24–3,74	3,08–4,91	3,84–5,79	4,2–6,39
0_DIV=2	1,12–1,87	1,54–2,455	1,92–2,895	2,1–3,195
0_DIV=3	0,747–1,247	1,027–1,637	1,28–1,93	1,4–2,13
0_DIV=4	0,56–0,935	0,77–1,228	0,96–1,448	1,05–1,598
0_DIV=5	0,448–0,748	0,616–0,982	0,768–1,158	0,84–1,278
0_DIV=6	0,373–0,623	0,513–0,818	0,64–0,965	0,7–1,065

брать вариант исполнения LTC6948, работающий на этой частоте. В таблице показаны четыре возможных варианта исполнения LTC6948. Вариант исполнения LTC6948-4 как раз включает в себя ГУН, обеспечивающий желаемое значение частоты  $f_{LO} = 6,236$  ГГц.

### Проектирование системы с ФАПЧ

Загрузите программу FracNWizard с сайта [2] и установите ее. Представленное здесь схемотехническое решение предполагает применение опорного генератора частотой 100 МГц, для этого вам понадобится оценочный модуль DC1216A-D, предлагаемый компанией Linear Technology. Воспользуйтесь установками в FracNWizard (рис. 9), соответствующими выбору микросхемы LTC6948-4, укажите нужные параметры для целей проектирования и определите номиналы элементов, необходимые для завершения проекта. Для облегчения работы имеет смысл обратиться к руководству по моделированию и построению схем ФАПЧ DC1959A-D. Используйте значения компонентов филь-

тра, которые были рассчитаны программой FracNWizard (они открыты в боковой панели Component Values), и при необходимости выполните замену компонентов на DC1959A-D на элементы с номиналами, полученными в результате проектирования.

На рис. 10 представлена схема устройства 6,236 ГГц со значениями компонентов контурного фильтра ФАПЧ рассматриваемого выше проекта.

При необходимости можно уточнить параметры фильтра с помощью опции FracNWizard и обновить номиналы пассивных компонентов до величин, приемлемых с практической точки зрения.

На рис. 11 видно, как FracNWizard прогнозирует шумовую фазовую характеристику микросхемы LTC6948-4 в нужной точке: для рассматриваемого варианта это 6,236 ГГц уже с учетом корректировки номиналов элементов контурного фильтра. Программа показывает, как фазовый шум опорной частоты влияет на общий уровень выходного шума и как шумы  $\Sigma\Delta$ -модулятора отфильтровываются при помощи пассивного фильтра.

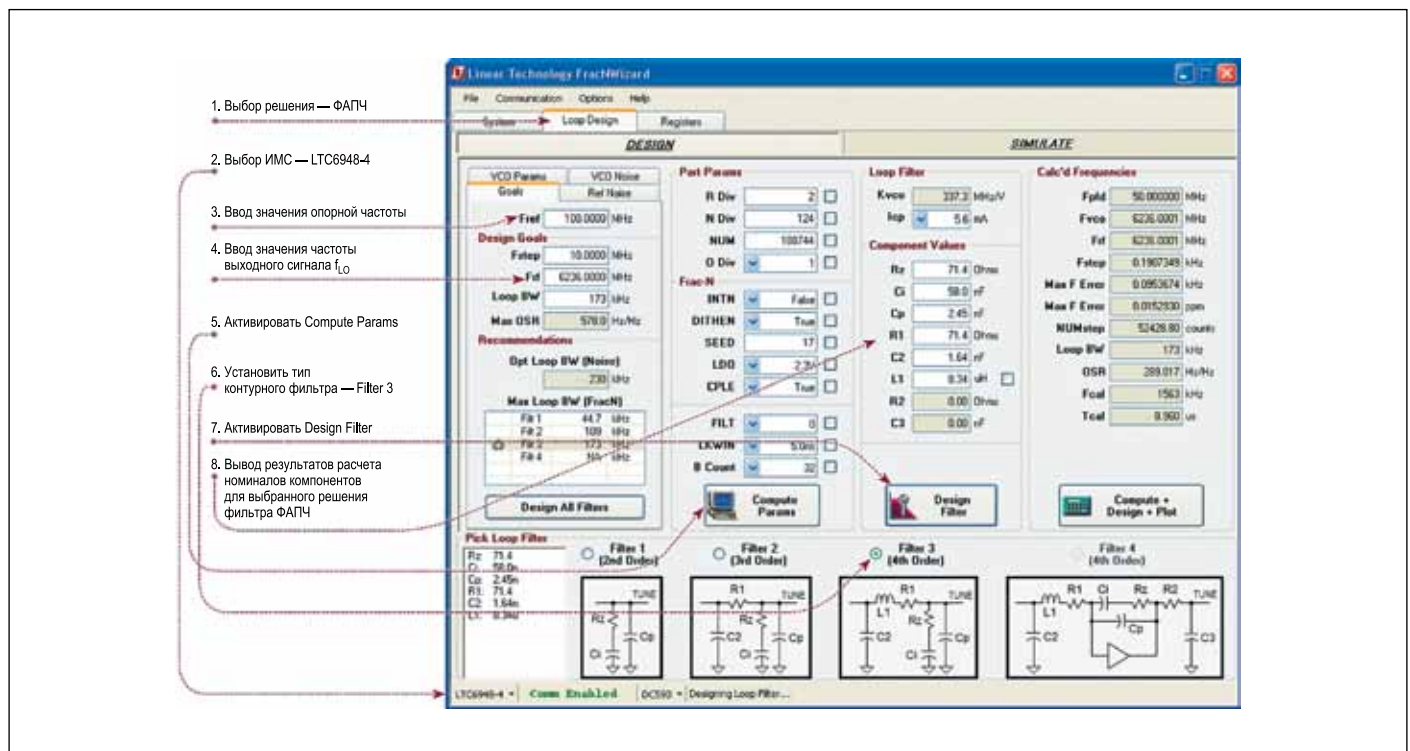


Рис. 9. Программный инструмент FracNWizard при использовании LTC6948 позволяет определить все параметры, необходимые для проектирования системы (показано для условия  $f_{LO} = 6,236$  ГГц)

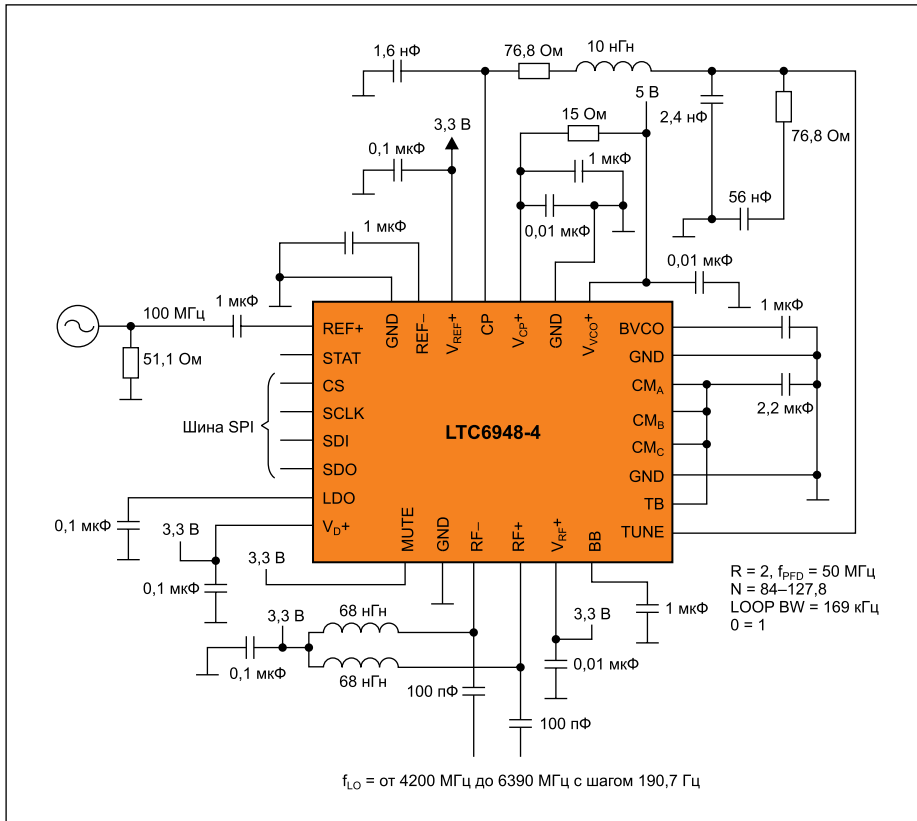


Рис. 10. Схема на LTC6948-4 с установленными значениями компонентов контурного фильтра

## Практическое исследование схемы ФАПЧ

Подайте питание на плату DC1959 и, используя последовательный контроллер USB от Linear Technology, подключите ее к компьютеру через демонстрационную плату DC590. Установите опорную частоту 100 МГц

от внешнего источника и подайте сигнал на вход DC1959, далее следуйте инструкциям, приведенным в руководстве по использованию отладочного модуля DC1959, доступным на сайте [www.linear.com](http://www.linear.com).

Микросхема LTC6948 является дробной ФАПЧ и предлагает все преимущества дробления опорной частоты, такие как скорость

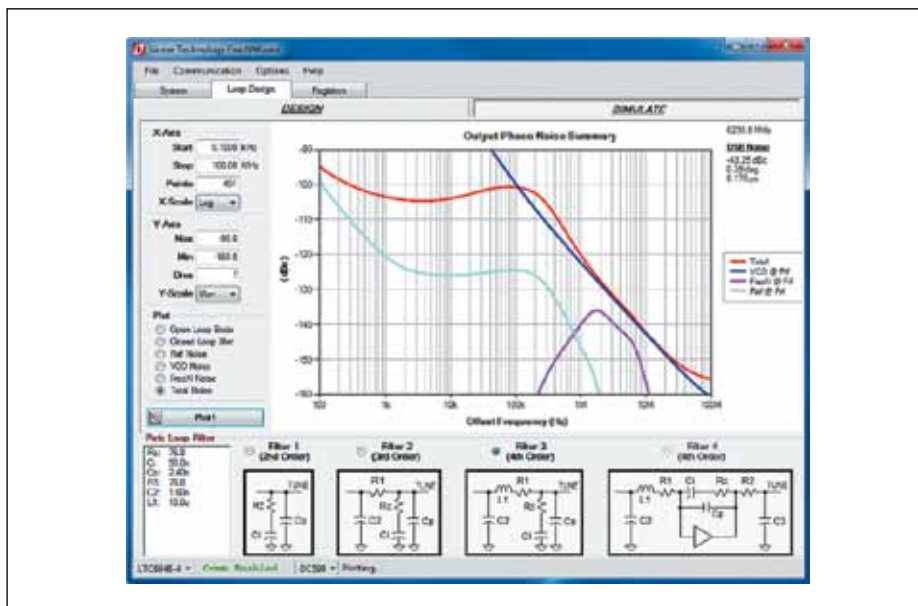


Рис. 11. Результаты моделирования ФАПЧ для частоты  $f_{LO} = 6,236$  ГГц с использованием программного обеспечения FracNWizard (представлены графики, демонстрирующие общий уровень фазовых шумов и влияние на него составляющих от различных источников, в зависимости от величины смещения от значения опорной частоты)

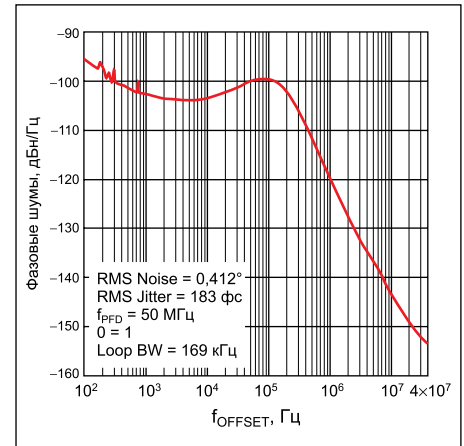


Рис. 12. Результаты измерения уровня фазовых шумов на выходе LTC6948-4 для частоты выходного сигнала  $f_{LO} = 6,236$  ГГц

перестройки частоты и пониженный уровень внутриполосного фазового шума, без обычных недостатков, обычно присущих системам с дробной ФАПЧ. Разработку системы упрощает бесплатное программное обеспечение FracNWizard и опубликованные полные характеристики микросхемы, которые, несмотря на первое впечатление, хоть и кажутся консервативными, но на самом деле легко достижимы.

Убедиться в реальном уровне фазового шума в рассмотренном выше примере с выбранным значением  $f_{LO}$  можно, подключив на выход DC1959 анализатор спектра. В нашем случае использован анализатор E5052A компании Agilent. Рис. 12 отображает результат, весьма близкий к результатам расчетов, полученных на симуляторе FracNWizard в соответствии с условиями, указанными на рис. 11.

Вот и все. На этом можно закончить. Проект системы ФАПЧ с дробным коэффициентом деления частоты завершен.

## Заключение

Микросхема LTC6948 является схемой с дробной ФАПЧ, которая предлагает все преимущества дробления опорной частоты, такие как скорость перестройки частоты и пониженный уровень внутриполосного фазового шума.

Следует отметить, что обычные недостатки, как правило, свойственные дробной ФАПЧ, в данном случае отсутствуют. Разработку системы значительно упрощает бесплатное программное обеспечение FracNWizard и опубликованные подробные характеристики этой микросхемы.

## Литература

1. LT Journal of Analog Innovation. Январь 2012 — <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTJournal-V21N4-2012-01.pdf>
2. [www.linear.com/FracNWizard](http://www.linear.com/FracNWizard)