

Почему интегрированный синтезатор с переносом частоты в петле обратной связи обеспечивает наименьший уровень фазового шума

Э. Акар¹

УДК 621.37 | ВАК 05.27.01

Сегодня все более востребованы ВЧ-системы, в которых несущая частота достигает нескольких десятков ГГц, что позволяет создавать гораздо более широкополосные устройства и не опасаться чрезмерного уплотнения спектра сигнала. Однако по мере повышения рабочих частот решения для измерения характеристик таких систем становятся все более сложными. Это связано с необходимостью иметь на порядок лучшие характеристики измерительных приборов, чтобы исключить их влияние на работу тестируемого устройства. В статье рассмотрено несколько методов генерации сигналов с низким фазовым шумом, их преимущества и недостатки. Представлен синтезатор с переносом частоты в петле обратной связи от компании Analog Devices, в котором сочетаются лучшие характеристики всех способов генерации частоты, что позволяет формировать сигналы со сверхнизким уровнем фазового шума.

СХЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) широко применяются во многих устройствах генерации частоты. Эти схемы выравнивают сигналы по фазе или синхронизируют их с опорным сигналом. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема ФАПЧ. Выходной сигнал генератора, управляемого напряжением (ГУН), делится с помощью N-счетчика и сравнивается с опорным сигналом с помощью фазо-частотного детектора (ФЧД). Эта простая схема была описана в многочисленных учебных пособиях. На основе хорошо известных положений определим, как можно существенно снизить фазовый шум на выходе системы.

Искажения или фазовый шум каждого функционального блока вносят вклад в общий фазовый шум схемы ФАПЧ. Фазовый шум, генерируемый каждым блоком, можно смоделировать, а общий фазовый шум ФАПЧ можно достаточно точно оценить, как с помощью моделирования, так и с помощью аналитических расчетов. Рассмотрим каждый из блоков и обсудим, как они влияют на выходной фазовый шум.

ФЧД сравнивает опорный сигнал с выходным сигналом после делителя. Этот блок генерирует сигнал ошибки для схемы накачки заряда, формирующей напряжение, которое регулирует ГУН так, чтобы совпали фазы выходного и опорного сигнала. Для большинства современных генераторов частоты со встроенным ФЧД в технической документации указан показатель качества (FOM). Используя FOM внутриполосный фазовый шум можно рассчитать следующим образом:

$$L_{\text{OUT}} = \text{FOM} + 10 \log f_{\text{PFD}} + 20 \log N, \quad (1)$$

где f_{PFD} – частота ФЧД, N – коэффициент деления выходной частоты.

Отметим, что выходная частота – это произведение f_{PFD} на N . Для заданной выходной частоты, когда f_{PFD} увеличивается в некоторое число раз, N уменьшается в такое же число раз. Это привело бы к снижению общего фазового шума на выходе, поскольку любое уменьшение коэффициента N уменьшает фазовый шум в два раза быстрее, чем это происходит из-за f_{PFD} . Можно сделать вывод о том, что чем выше частота ФЧД, тем меньше будет фазовый шум в ближней зоне. Мы воспользуемся этим положением в дальнейшем.

¹ Analog Devices, разработчик архитектуры ВЧ-систем, erkan.acar@analog.com.

Петлевой фильтр, установленный после ФЧД, сглаживает формируемый ФЧД сигнал ошибки, который управляет ГУН. Схему проектируют с использованием нескольких системных параметров, таких как ток накачки заряда, чувствительность ГУН, частота ФЧД. Одна из менее важных функций петлевого фильтра состоит в том, что он определяет полосу пропускания контура управления с отрицательной обратной связью. Опорный сигнал влияет на фазовый шум выходного сигнала в пределах полосы пропускания петлевого фильтра. За пределами частоты среза общий уровень фазового шума будет определяться характеристиками ГУН. Воспользуемся этим фактом в следующих разделах при оптимизации общего фазового шума системы.

ГУН формирует выходную частоту в зависимости от управляющего напряжения, подаваемого на его вход. Выходная частота ГУН регулируется контуром управления до тех пор, пока она не будет синхронизирована по фазе с фазой опорного сигнала. ГУН напрямую влияет на общий фазовый шум системы. Как правило, с увеличением добротности ГУН его фазовый шум снижается. Однако для достижения более высокой добротности обычно требуются компоненты, ограничивающие общий диапазон настройки. ГУН, настроенный на узкий диапазон частот, как правило, имеет лучшие показатели фазового шума.

СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТОТЫ

Есть много методов формирования сигналов с использованием различных схем генераторов с разным уровнем качества. В контрольно-измерительной аппаратуре обычно стремятся к достижению наилучших характеристик с точки зрения снижения как фазового шума, так и паразитных помех. Рассмотрим некоторые способы генерации частоты, которые позволяют добиться очень низкого фазового шума.

Синтез частоты с помощью генераторов фиксированной частоты

Класс устройств генерации сигналов, имеющих отличные характеристики фазового шума, – генераторы с фиксированной частотой. Эти устройства обычно имеют

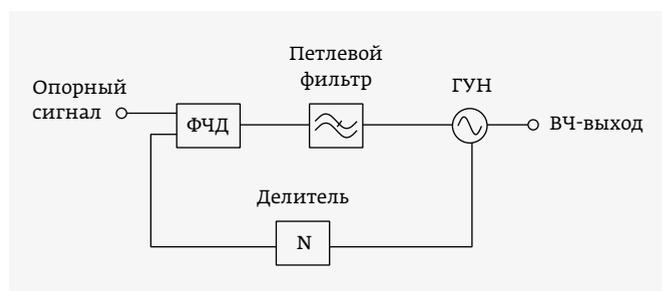


Рис. 1. Блок-схема ФАПЧ

очень высокую добротность, что обеспечивает превосходные характеристики фазового шума в ближней зоне. Эти генераторы работают на заранее установленной частоте, в значительной степени определяемой геометрией и конструкцией устройства, с некоторой возможностью регулировки, чтобы обеспечить синхронизацию фазы с опорным источником. Примерами такого типа устройств являются термостатированные кварцевые генераторы (ОСХО), кварцевые генераторы с температурной компенсацией (ТСХО) и ПАВ-генераторы, управляемые напряжением (VCXO). Один из основных недостатков генераторов с фиксированной частотой – ограниченный частотный диапазон. Хотя они могут использоваться для устройств, работающих на фиксированном наборе частот или кратных им, для большинства измерительных приборов требуется изменяемый диапазон частот.

Одно из решений этой проблемы – использование генератора прямого цифрового синтеза (DDS-генератора) или цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Сигнал с фиксированной частотой можно использовать для управления тактовым сигналом выборки DDS-генератора (рис. 2). Частоту генератора можно при необходимости умножить с помощью умножителя частоты или диода с накоплением заряда (ДНЗ) и отфильтровать перед подачей на DDS-генератор. DDS-генератор может создавать любую произвольную частоту вплоть до половины частоты дискретизации в первой зоне Найквиста. Некоторые современные ЦАП могут достаточно хорошо работать даже во второй зоне Найквиста. На рис. 3 показаны спектр выходного сигнала и характеристика фазового шума для ЦАП AD9164 от Analog Devices, управляемого генератором с диэлектрическим резонатором (DRO-генератором) с низким фазовым шумом на частоте 6 ГГц. Можно отметить невероятно низкий фазовый шум на выходе AD9164, а его выходной спектр характеризуется уровнем паразитных выбросов менее –70 дБн.

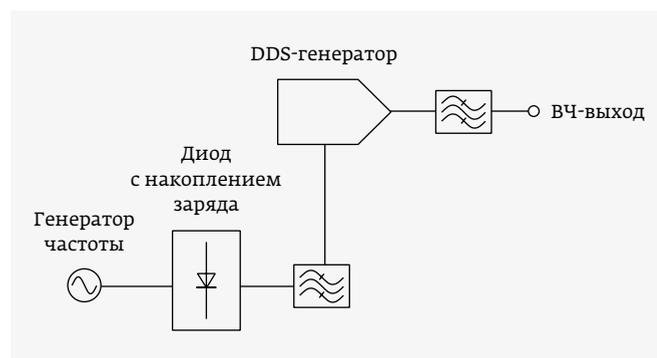


Рис. 2. Генерация переменной частоты с использованием источника фиксированной частоты

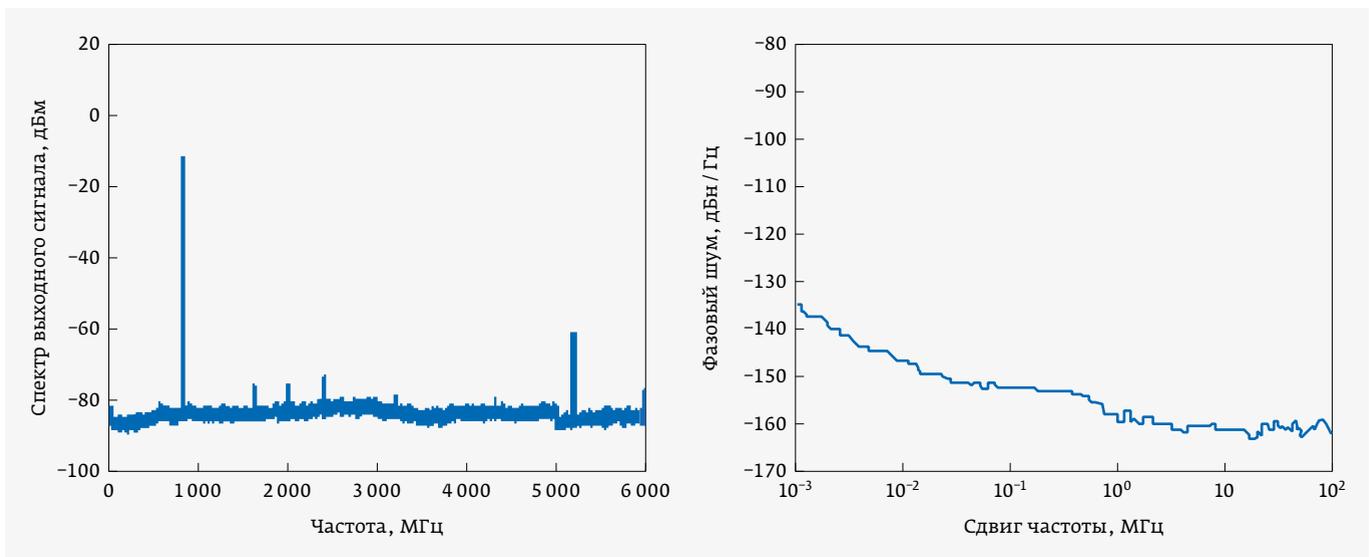


Рис. 3. Выходной спектр (слева) и фазовый шум (справа) ЦАП AD9164 на частоте 800 МГц с использованием генератора фиксированной частоты в качестве источника тактового сигнала

Спектральная чистота умноженной тактовой частоты дискретизации напрямую влияет на выход устройства. После умножения сигнала на выходе будет присутствовать много гармоник. Чтобы достичь очень низких уровней паразитных составляющих на выходе DDS-генератора, полезный сигнал нужно отфильтровать. Обычно паразитные выбросы, присутствующие в сигнале выборки, появляются на выходе с аналогичной амплитудой. Для больших коэффициентов умножения, возможно, понадобится фильтр с очень резкой характеристикой, что потребует значительной площади на плате.

Кроме того, фазовый шум сигнала увеличивается с увеличением коэффициента умножения. К примеру, каждый раз, когда частота сигнала удваивается, фазовый шум увеличивается на 6 дБ. Исходя из начального профиля фазового шума и коэффициента умножения, минимальный уровень шума (фазовый шум в дальней зоне) может значительно увеличиться, что сделает общее решение менее привлекательным. Хорошо известна дилемма, когда низкий фазовый шум в ближней зоне одночастотного генератора с высокой добротностью приводит к значительному повышению минимального уровня фазового шума в дальней зоне. Например, генераторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) обладают отличными характеристиками фазового шума при несущих частотах около 1 ГГц. Для устройств миллиметрового диапазона с рабочей частотой выше 40 ГГц требуется коэффициент умножения, достигающий 40. Это может привести к повышению минимального уровня фазового шума на 32 дБ и более, что может стать неприемлемым решением.

Генерация частоты с использованием широкополосных ФАПЧ

Широкополосные синтезаторы решают многие проблемы, связанные с одночастотными устройствами. Такие устройства, как СВЧ-синтезатор ADF4372, используют несколько ядер ГУН, которые дополнительно разделены на несколько перекрывающихся диапазонов. Такая архитектура позволяет достичь высокой добротности для каждого ядра, что значительно улучшает общие характеристики устройства по сравнению с одноядерными архитектурами.

Одним из ключевых преимуществ этих устройств является более высокая основная рабочая частота по сравнению с кварцевыми генераторами или ПАВ-генераторами. Многие современные ГУН могут иметь основные частоты в диапазоне от 4 до 20 ГГц и выше. Это значительно снижает фазовые шумы в дальней зоне в приложениях мм-диапазона. Например, генератору, работающему на основной частоте 10 ГГц, требуется коэффициент 4 для повышения частоты до 40 ГГц. Это означает увеличение минимального уровня фазового шума на 12 дБ по сравнению с увеличением на 32 дБ для кварцевого генератора.

Одной из проблем, связанных с многоядерными и широкополосными синтезаторами, является поиск оптимального диапазона для синтеза целевой частоты. Это может потребовать создания просмотрных таблиц для определения корректного диапазона. Генераторы, оснащенные функциями автокалибровки, такие как ADF4372 и ADF5610, значительно упрощают процесс определения корректного диапазона и делают его более надежным при изменении температуры и параметров технологического процесса.

Это существенно упрощает работу с устройством, поскольку изменение частоты можно просто запрограммировать в регистрах устройства, а оптимальный рабочий диапазон частот определяется автоматически.

Еще одна проблема таких генераторов заключается в том, что фазовый шум в ближней зоне, связанный с этими устройствами, обычно намного выше по сравнению с одночастотными генераторами. Даже при более низком уровне общего фазового шума более высокий фазовый шум в ближней зоне может привести к увеличению суммарных помех, что может ограничить применение этих устройств.

Генерация методом переноса частоты в петле обратной связи

Метод переноса частоты в петле обратной связи сочетает лучшее из всех рассмотренных выше методов генерации частоты и нивелирует их недостатки. Суммируем все, что мы обсудили ранее, прежде чем перейдем к описанию этого метода.

Одночастотные генераторы, такие как ОСХО, ПАВ-генераторы и кварцевые генераторы с высокой добротностью, отличаются наименьшим уровнем фазового шума в ближней зоне. Эти устройства обычно имеют низкие основные частоты, что отрицательно сказывается на фазовых шумах в дальней зоне после умножения частот до мм-диапазона. Поэтому идеальным решением могло бы стать сочетание характеристик этих устройств в ближней зоне без значительного ухудшения фазового шума в дальней зоне.

DDS-генераторы или ЦАП могут использоваться для генерации изменяемых частот с помощью генераторов с фиксированной частотой. Для этих устройств также необходимы большие коэффициенты умножения для частот мм-диапазона, а также фильтрация для подавления субгармоник и других нежелательных паразитных составляющих. Устранение этих недостатков может дать желаемое решение.

Широкополосные синтезаторы могут иметь очень высокие основные частоты с превосходными характеристиками фазового шума в дальней зоне. Однако эти устройства не отличаются высокой добротностью, что делает их фазовый шум в ближней зоне достаточно высоким по сравнению с одночастотными устройствами. Хорошо было бы воспользоваться их преимуществом, связанным с низкими фазовыми шумами в дальней зоне, без ухудшения фазового шума в ближней зоне.

Это приводит нас к такому решению, как синтезатор с переносом частоты в петле обратной связи (translation loop device) (рис. 4). Вместо деления выходной частоты на большой коэффициент деления используется частотный смеситель для сдвига выходного сигнала на промежуточную частоту (ПЧ), которая соответствует частоте

опорного сигнала. Это эффективно снижает коэффициент деления до 1, устраняя вносимый шум, возникающий обычно из-за больших коэффициентов деления в традиционных схемах ФАПЧ. Это также накладывает профиль фазового шума сигнала гетеродина на контур управления. Для создания сигнала гетеродина можно использовать одночастотный генератор с отличными характеристиками в ближней зоне и DDS-генератор.

Критический параметр синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи – полоса пропускания петлевого фильтра. Как мы обсуждали ранее, петлевой фильтр определяет общую полосу пропускания контура управления. Другими словами, он определяет, насколько опорный сигнал и сигнал гетеродина влияют на выходной фазовый шум. Мы можем выбрать широкую полосу пропускания петлевого фильтра в архитектуре с переносом частоты в петле обратной связи, так как фазовый шум в ближней зоне может быть чрезвычайно низким. На рис. 5 показаны характеристики фазового шума на выходе синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи и на его входе сигнала гетеродина. Обратите внимание на то, что, хотя сигнал гетеродина имеет чрезвычайно низкий фазовый шум в ближней зоне, минимальный уровень шума в дальней зоне высок. ВЧ-выход отслеживает фазовый шум сигнала гетеродина вплоть до полосы пропускания петлевого фильтра. После такого сдвига частоты фазовый шум в дальней зоне определяется ГУН и характеризуется чрезвычайно низким уровнем.

Синтезатор с переносом частоты в петле обратной связи эффективно сочетает как высокие характеристики в ближней зоне одночастотного устройства, используя DDS-генератор в качестве источника сигнала гетеродина, так и низкий фазовый шум в дальней зоне широкополосного ГУН за счет выбора широкой полосы пропускания контура управления. Это не только устраняет известную дилемму о том, какую область фазового шума следует

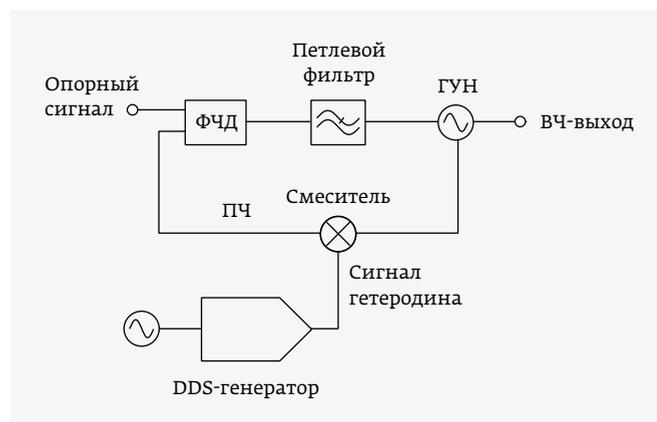


Рис. 4. Архитектура синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи

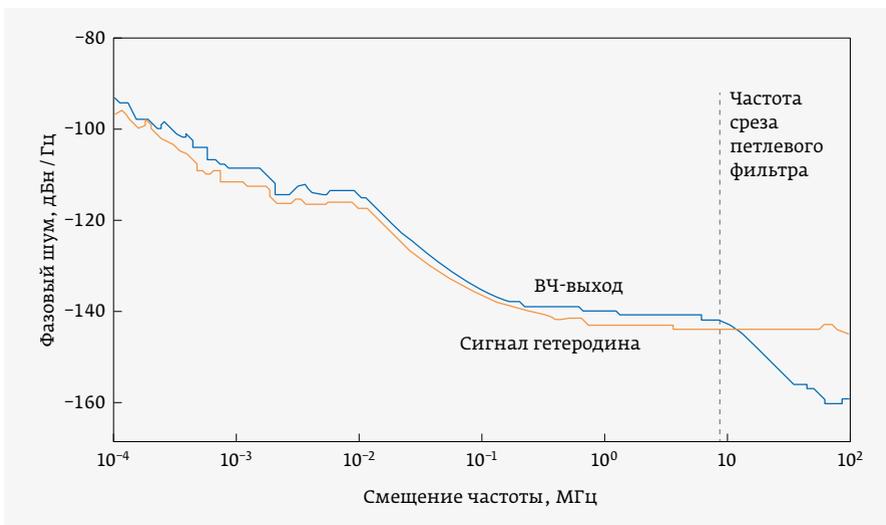


Рис. 5. Характеристика фазового шума синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи

оптимизировать, но также приводит к чрезвычайно низкому выходному фазовому шуму.

Превосходные характеристики фазового шума синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи делают его очень полезным для применения во многих измерительных приборах миллиметрового диапазона. Предполагается, что в дополнение к высоким характеристикам фазового шума, приборные решения должны также подавлять паразитные сигналы до очень низкого уровня. Для синтезаторов с переносом частоты в петле обратной связи это может вызвать проблемы из-за наличия

паразитных сигналов, которые могут существовать при дискретной реализации. Это достигается за счет встроенного экранирования и проектных решений, которые сводят к минимуму возможность создания сквозных каналов. Кроме того, устройство отличается высоким уровнем подавления паразитных сигналов (-90 дБн и ниже), соперничая с генераторами на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ). На выходе устройства могут быть низкие уровни паразитных сигналов, даже если входы системы не идеальны. На рис. 6 слева показан выходной спектр ADF4401A при подаче на вход сигнала гетеродина,

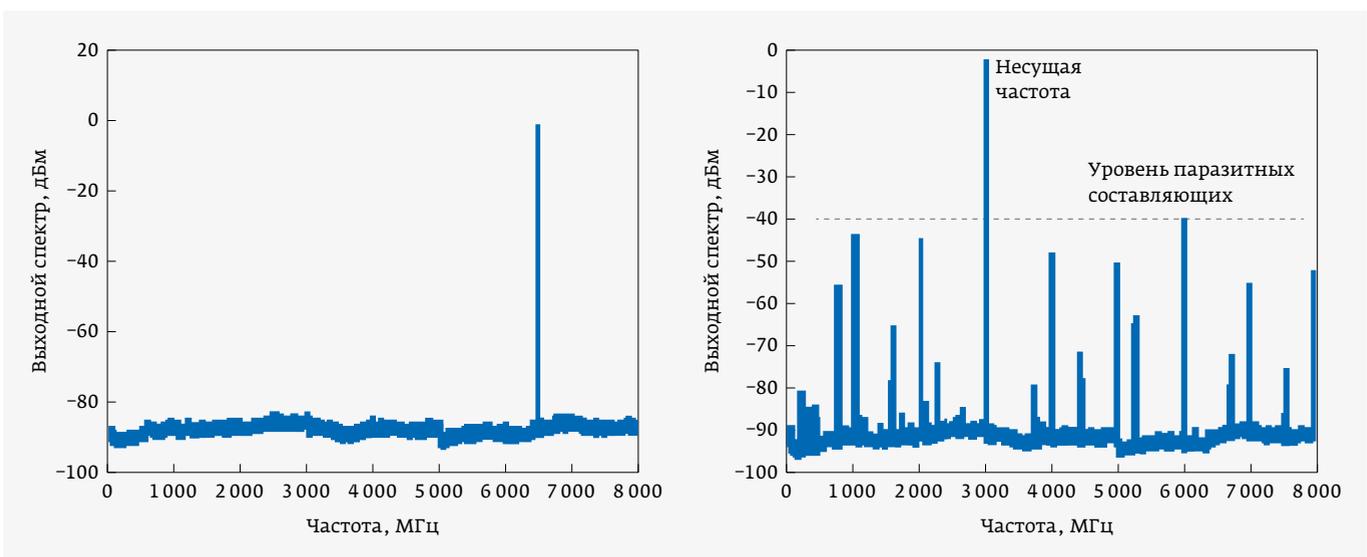


Рис. 6. Выходной спектр синтезатора с переносом частоты в петле обратной связи на частоте 6,5 ГГц (слева) и спектр сигнала на входе гетеродина на частоте 3 ГГц (справа) (при использовании внутреннего удвоителя частоты гетеродина ADF4401A эффективная частота гетеродина становится равной 6 ГГц; в данном примере ПЧ составляет 500 МГц)

который содержит множество паразитных составляющих на уровне около -40 дБн, как показано на рис. 6 справа. Как правило, сигнал гетеродина такого качества нельзя использовать в инструментальных решениях из-за сложной фильтрации. Однако на вход ADF4401A можно подавать такой несовершенный сигнал без необходимости дополнительной фильтрации.

Устройство оснащено системой автокалибровки, которая может определить оптимальный частотный диапазон ГУН для заданной целевой частоты. В режиме калибровки синтезатор может выполнять поиск нужного диапазона частот для заданной температуры и условий техпроцесса, что делает процесс настройки частоты весьма эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования устройств миллиметрового диапазона необходимо, чтобы измерительная аппаратура обеспечивала несущие сигналы с очень низким фазовым шумом

и чрезвычайно низкими уровнями паразитных составляющих. Хотя существуют различные методы синтеза таких сигналов, все они имеют недостатки, усложняющие комплексное решение. В синтезаторе с переносом частоты в петле обратной связи ADF4401A от Analog Devices сочетаются преимущества различных способов генерации частоты без их отрицательных свойств. Устройство обеспечивает сверхнизкий фазовый шум с непревзойденным уровнем паразитных составляющих без необходимости сложной фильтрации.

По вопросам поставки продукции Analog Devices обращайтесь в компанию ЭЛТЕХ по электронной почте analog@eltech.spb.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Collins I.** Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals. – Analog Dialogue, Vol. 52, No. 3, July 2018.
2. **Leeson D. B.** A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. – Proceedings of the IEEE, Vol. 54, No. 2, February 1966.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ КЛАССА F И ИНВЕРСНОГО КЛАССА F

Воронович В. В., Галах В. П., Кузьмин В. А., Потапов А. Ю.

Под редакцией В. В. Вороновича

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 154 с.,
ISBN: 978-5-94836-629-6

Цена 840 руб.

Монография базируется как на известных материалах, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, так и на оригинальных результатах, полученных самими авторами. В настоящее время при проектировании УМ класса F и класса F-1 приходится обращаться к множеству разнообразных публикаций в периодических изданиях. Настоящая работа представляет собой попытку систематизированного изложения как результатов теоретических исследований, так и вопросов проектирования.

В книге изложены элементы теории и основы проектирования высокоэффективных усилителей мощности класса F и инверсного класса F. Материал, приведенный в настоящем издании, иллюстрируется примерами расчетов.

Для радиоспециалистов, связанных с созданием радиоэлектронной аппаратуры.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📞 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru