

# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ФАПЧ СО ВСТРОЕННЫМИ ГУН: МОГУТ ЛИ ОНИ ЗАМЕНИТЬ ДИСКРЕТНОЕ РЕШЕНИЕ?

Практически в каждой ВЧ- и СВЧ-системе необходим синтезатор частоты. Синтезатор частоты генерирует сигнал гетеродина, который подается на смесители, модуляторы, демодуляторы и многие другие ВЧ- и СВЧ-компоненты. Одним из способов реализации синтезатора, который отвечает за «сердцебиение» системы, является использование синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ).

Традиционно простая петля ФАПЧ делит частоту выходного сигнала генератора, управляемого напряжением (ГУН), сравнивает полученный сигнал с опорным сигналом, а затем подстраивает управляющее напряжение ГУН с целью подстройки его выходной частоты. В течение многих лет петля ФАПЧ и ГУН представляли собой две отдельные микросхемы — дискретное решение. ГУН формирует выходные сигналы, петля ФАПЧ следит за этими выходными сигналами и подстраивает ГУН так, чтобы его выходной сигнал был синхронизирован относительно известного опорного сигнала.

Существует несколько преимуществ дискретного решения:

- Каждая дискретная микросхема может быть спроектирована так, чтобы обеспечить наилучшие характеристики.
- Физическая дистанция между ФАПЧ и ГУН уменьшает перекрестные наводки и минимизирует появление нежелательных паразитных гармоник на выходе.
- Если одна микросхема в цепи будет повреждена, то понадобится заменить меньшее количество компонентов

Долгое время дискретные решения доминировали в индустрии синтезаторов, но у них были и недостатки. Один из основных недостатков заключался в том, что для дискретного решения требуется много места на плате, поскольку в данном случае нужно разместить две микросхемы и все сопутствующие компоненты. В результате конечный продукт может быть больших размеров, а его стоимость высокой.

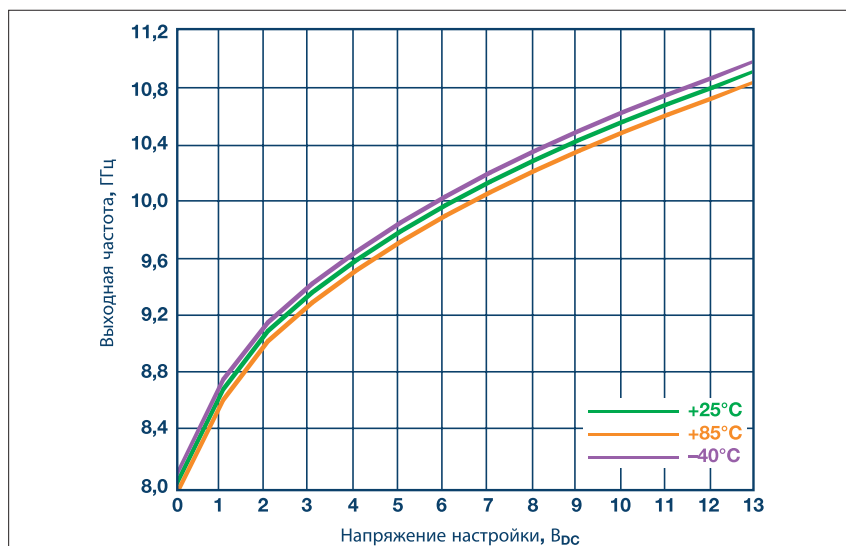
Другой серьезный недостаток заключается в том, что стандартные ГУН имеют узкий диапазон выходных частот. Стандартная ширина полосы ГУН со-

ставляет 50–500 МГц. Есть возможность увеличить частоту до 2 ГГц, но тогда потребуется активный фильтр на основе операционного усилителя. Это довольно сложная задача для тех, кто хочет реализовать систему с более широким частотным диапазоном, для чего необходимо несколько петель ФАПЧ, несколько ГУН, вспомогательные компоненты, фильтры, высокочастотные переключатели и источники питания. Это экспоненциально увеличивает занимаемую на плате площадь и стоимость конечного устройства. Помимо занимаемого места на плате, дискретные решения требуют большого объема дополнительной работы: настройки и тестирования, написания программного обеспечения, контроля за складскими запасами компонентов для каждого устройства.

Около 10 лет назад в индустрии синтезаторов на основе ФАПЧ произошел прорыв. На рынке начали появляться

первые интегрированные петли ФАПЧ с ГУН. Это означало, что платы могут быть меньше, затраты ниже, а объем дополнительных работ значительно сокращен. Интегрированное решение также предполагает, что архитектуру ГУН можно менять, чтобы создать широкополосный синтезатор на основе одного компонента. Давайте рассмотрим архитектуру ГУН и то, как переход к интегрированным ГУН открыл путь к созданию высококачественных синтезаторов.

Традиционные ГУН представляют собой простые устройства. На их вывод настройки частоты подается напряжение, и в зависимости от этого напряжения на выходе ГУН формируется определенная частота. С увеличением напряжения выходная частота повышается, и, наоборот, с уменьшением напряжения выходная частота также снижается. На рис. 1 показан пример зависимости выходной частоты от напряжения на-



▲ Рис. 1. Зависимость выходной частоты от напряжения настройки традиционного ГУН

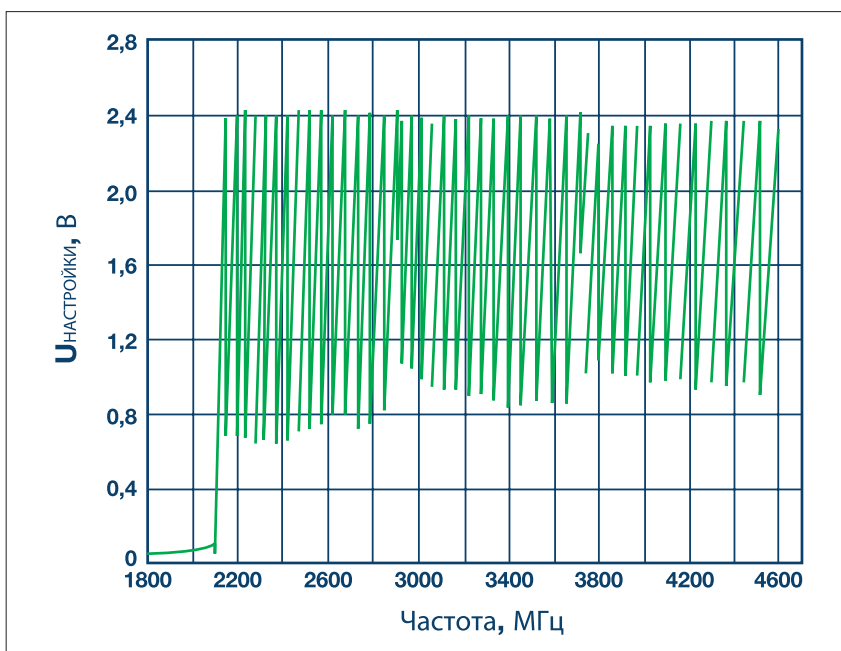
стройки арсенид-галлиевого ГУН. Для обеспечения диапазона настройки 13 В потребуется активный фильтр или петля ФАПЧ с высоковольтной накачкой заряда.

В интегрированном решении с ФАПЧ/ГУН используется архитектура ГУН другого типа, основанная на традиционной архитектуре. В интегрированном решении с ФАПЧ/ГУН эффективным образом объединено несколько традиционных ГУН, образующих такой генератор с очень широкой полосой. Каждый отдельный ГУН, формируемый путем включения и выключения конденсаторов, отвечает за свои полосы. Интеграция петли ФАПЧ и ГУН в одну микросхему делает возможной реализацию многополосной архитектуры. Каждый раз, когда необходимо перейти на новую частоту, устройство запускает процесс калибровки ГУН, при этом микросхема быстро сортирует полосы ГУН и выбирает оптимальную полосу для требуемой выходной частоты. После выбора полосы ГУН петля ФАПЧ замыкается и поддерживает на выходе желаемую частоту.

Микросхемы с ФАПЧ/ГУН первого поколения имели полосу пропускания более 4 ГГц. Сравните это с полосой пропускания дискретных решений, которая составляет 100–300 МГц. Такой частотный диапазон стал возможен лишь с появлением миниатюрных микросхем, а не наборов петля ФАПЧ, ГУН, фильтров и высокочастотных ключей. На рис. 2 показана зависимость выходной частоты от напряжения настройки многополосного ГУН.

Несмотря на то что эта инновационная технология стала огромным шагом вперед в расширении частотного диапазона, сокращения занимаемой на плате площади, снижения стоимости и уменьшения объема дополнительных работ, все еще были недостатки, которые мешали интегрированному решению полностью превзойти дискретное. Во многих высокочастотных устройствах наиболее важной характеристикой (помимо частотного диапазона) является фазовый шум.

Почему фазовый шум так важен? Представьте себе систему, в которой сигнал передается в чистом эфире. Предположим, отношение сигнал/шум передаваемого сигнала на передающей антенне составляет 50 дБ. Это означает,



▲ Рис. 2. Зависимость выходной частоты от напряжения настройки многополосного ГУН

что сигнал, который должен принять приемник, на 50 дБ сильнее, чем шум с обеих сторон передаваемого сигнала, то есть на соседних более высоких и более низких частотах. Допустим, этот сигнал может передаваться на 15 км до того, как он превратится в шум и передача будет потеряна. Теперь предположим, что фазовый шум синтезатора передатчика улучшен на 3 дБ. Это означает, что отношение сигнал/шум передаваемого сигнала составит 53 дБ. В результате мощность передаваемого сигнала по отношению к шуму будет в два раза выше, чем в предыдущем случае, и, следовательно, этот сигнал может быть передан на большее расстояние, прежде чем превратится в шум. Увеличение расстояния означает, что для передачи сигнала понадобится меньше количество ретрансляторов/передатчиков, что позволит снизить затраты.

Помимо этого примера можно привести еще один довод от экспертов в области электронного контрольно-измерительного оборудования в пользу важности фазового шума. Независимо от того, какие показатели фазового шума являются приемлемыми в области радиосвязи, в контрольно-измерительном оборудовании необходимы лучшие показатели фазового шума, чтобы можно было анализировать различные протоколы связи.

Хотя во многих случаях возможно было перейти от дискретного к интегрированному решению, сэкономив при этом миллионы долларов, показатели фазового шума в системах с ФАПЧ/ГУН первого поколения не были достаточно хороши, чтобы заменить интегрированным решением многие дискретные системы с низким фазовым шумом.

Помимо неприемлемого уровня фазового шума частотный диапазон интегрированных решений также был довольно узким по сравнению с частотным диапазоном, который имели дискретные наборы петля ФАПЧ и ГУН.

Частотный диапазон можно расширить с помощью удвоителей и умножителей частоты, но для их работы требуется много энергии, они занимают дополнительное место на плате, а стоимость решения увеличивается.

К счастью, в то время как эти интегрированные решения стали появляться на рынке, уже начались работы по переходу к новым технологическим процессам создания микросхем, позволившим снизить уровень фазового шума и расширить частотный диапазон.

Таким образом, на тот момент рынок был подготовлен к появлению второго поколения интегрированных решений с ФАПЧ/ГУН. Требования к новым устройствам были следующие:

- выходная частота выше 4,4 ГГц;
- показатели фазового шума должны быть сопоставимы с показателями фазового шума дискретных решений;
- интегрированные петли ФАПЧ и ГУН должны располагаться в одном компактном корпусе;
- стоимость должна быть ниже стоимости дискретных решений.

В конце 2014 года было представлено второе поколение интегрированных решений с ФАПЧ/ГУН. На рынке начали появляться продукты с диапазоном выходной частоты, превышающим 10 ГГц, фазовым шумом, сравнимым с фазовым шумом дискретных ГУН, компактными корпусами размером 5×5 мм и более

низкой стоимостью, чем у аналогичных дискретных решений с петлями ФАПЧ и ГУН (которые к тому же имели более узкий частотный диапазон).

Например, микросхемы семейства ADF4355 компании Analog Devices удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым ко второму поколению:

- Диапазон выходных частот: 50 МГц — 13,6 ГГц ( $\leq 6,8$  ГГц от одного порта,  $\geq 6,8$  ГГц от другого).
- Фазовый шум:
  - традиционный дискретный ГУН при 10 ГГц:  $-110$  дБн/Гц при отстройке 100 кГц и  $-135$  дБн/Гц при отстройке 1 МГц. В дискретном ГУН при сужении диапазона частот улучшаются показатели фазового шума;
  - семейство ADF4355 при 10 ГГц:  $-106,5$  дБн/Гц при отстройке 100 кГц и  $-130$  дБн/Гц при отстройке 1 МГц.
- Корпус LFCSP размером  $5 \times 5$  мм.
- Цены варьируются в зависимости от конкретных компонентов семейства, но все равно ниже, чем у дискретных решений.

Теперь пользователь может получить преимущество от низкого уровня фазового шума, свойственного дискретному решению, а также другие преимущества, которые предлагают интегрированные решения. Здесь следует отметить, что технология петли ФАПЧ также развивалась на протяжении многих лет, так что второе поколение устройств с ФАПЧ/ГУН еще предлагает преимущества в виде улучшенных характеристик петли ФАПЧ.

В устройствах с ФАПЧ/ГУН первого поколения блоки ФАПЧ имели максимальные частоты фазочастотных детекторов около 32 МГц, а разрешение делителя с дробным коэффициентом деления, как правило, не превышало 12 бит. Такая комбинация обеспечивала стандартное разрешение канала в десятки килогерц. Максимальные частоты фазочастотных детекторов устройств с ФАПЧ/ГУН второго поколения превышают 100 МГц, а делители с дробным коэффициентом деления имеют разрешение 25 бит или даже до 49 бит. Это дает два основных преимущества: более высокая частота фазочастотных детекторов позволяет снизить фазовый шум ФАПЧ (при каждом удвоении частоты фазочастотного детектора значение делителя частоты может быть уменьшено вдвое, что снижает вносимый делителем шум на 3 дБ); разрешение в 25 бит и выше позволяет точнее генерировать частоту с разрешением менее 1 Гц.

#### ПАРАЗИТНЫЕ ПОМЕХИ

Помимо прочего, существует еще один важный аспект интегрированных решений с ФАПЧ/ГУН, который необходимо рассмотреть. К преимуществам

дискретного решения следует отнести то, что физическая изоляция между двумя микросхемами минимизирует перекрестные наводки между петлями ФАПЧ и ГУН и, следовательно, снижает уровень нежелательных паразитных сигналов. Если петля ФАПЧ и ГУН интегрированы в один корпус, то уровень перекрестных наводок по сравнению с дискретным решением увеличивается. Некоторые компоненты, представленные сегодня на рынке, вопреки этой тенденции обладают удивительно низким уровнем перекрестных наводок между петлями ФАПЧ и ГУН. В качестве примера можно назвать HMC830. Для других же компонентов со встроенными петлями ФАПЧ и ГУН, применяемых в высококачественном оборудовании, нужны дополнительные средства, чтобы снизить уровень перекрестных наводок.

#### ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ФАЗОЧАСТОТНОГО ДЕТЕКТОРА С ЦЕЛЬЮ УСТРАНЕНИЯ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ГРАНИЧНЫХ ПАРАЗИТНЫХ ГАРМОНИК (INTEGER BOUNDARY SPURS)

Один из методов заключается в изменении частоты фазочастотного детектора ФАПЧ с использованием алгоритма частотного планирования, что позволит переместить паразитные сигналы, генерируемые блоком фазочастотного детектора, в область, где они не оказывают сильного воздействия и подавляются практически полностью. Это подробно описано в статье [1].

#### ИЗОЛЯЦИЯ ФАПЧ И ГУН

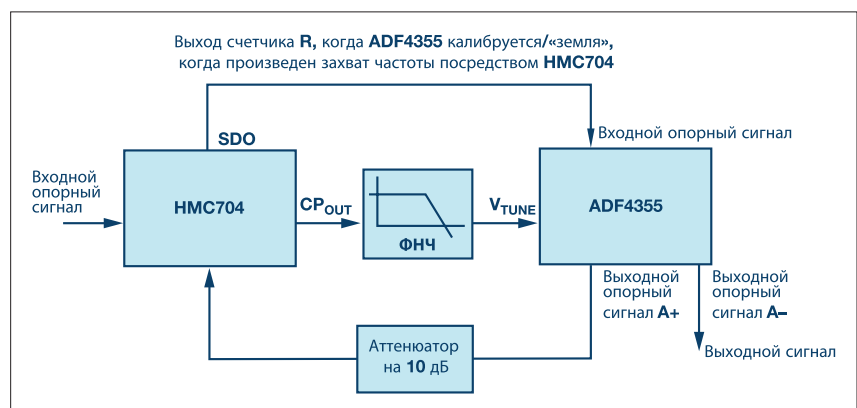
Как упоминалось ранее, близкое расположение цепей ФАПЧ и ГУН может привести к появлению нежелательных перекрестных наводок. Чтобы минимизировать этот эффект, можно использовать состоящее из двух микросхем решение для физического разделения цепей ФАПЧ и ГУН. Благодаря этому можно получить свойственное дискретным решениям преимущество, заключающееся

в поддержании малого уровня паразитных помех, и свойственное интегрированным решениям преимущество, обеспечивающее широкий диапазон выходных частот.

Дискретный синтезатор ФАПЧ с дробным коэффициентом деления HMC704 компании Analog Devices оптимален для этой задачи. В данном решении один из выходных сигналов ГУН ADF4355 (у всех представителей семейства имеется два выходных канала) подается на HMC704 (установка дополнительного аттенюатора на 10 дБ поможет еще больше снизить уровни паразитных гармоник). Петля ФАПЧ ADF4355 используется для завершения калибровки ГУН и захвата требуемой частоты. Затем каскад ФАПЧ в ADF4355 можно отключить, переведя в высокоимпедансное состояние схему накачки заряда и удерживая счетчики в состоянии сброса, устраняя таким образом появление любых паразитных гармоник в петле ФАПЧ, при этом HMC704 будет поддерживать контур замкнутым. У подобного подхода есть несколько преимуществ:

- использование петли ФАПЧ отдельно от микросхемы с ГУН снижает уровень паразитных гармоник;
- HMC704 изначально обладает более низким уровнем паразитных гармоник, чем петля ФАПЧ ADF4355, следовательно, уровень гармоник сокращается еще больше;
- HMC704 имеет более низкий уровень нормализованного фазового шума, чем у петли ФАПЧ ADF4355, поэтому шум на выходе синтезатора становится еще ниже.

Для того чтобы замкнуть контур, выход генератора накачки HMC704 подключается к петлевому фильтру. Выход этого фильтра должен быть подсоединен к выводу VTUNE микросхемы ADF4355. Когда контур замкнут, HMC704 функционирует исключительно как петля ФАПЧ, а ADF4355 работает исключительно как ГУН. Поскольку петля ФАПЧ



▲ Рис. 3. Захват частоты ADF4355 с помощью внешнего синтезатора с ФАПЧ HMC704 для минимизации паразитных гармоник

ADF4355 не используется, то для полного подавления паразитных гармоник в ней необходимо вход опорного сигнала ADF4355 подключить к «земле». К счастью, у НМС704 есть простой способ реализовать это. НМС704 имеет вывод выхода общего назначения (GPO), который может быть подсоединен непосредственно к выводу входного опорного сигнала ADF4355. Когда для ADF4355 требуется опорный сигнал, необходимый для калибровки ГУН, НМС704 может генерировать такой опорный сигнал на выводе GPO. Если нужно вход опорного сигнала ADF4355 подключить к «земле», то вывод GPO НМС704 также можно запрограммировать для этой задачи. На рис. 3 показана данная схема.

Компания Analog Devices выпустила четыре основных компонента семейства

ADF4355 с характеристиками второго поколения интегрированных решений с ФАПЧ/ГУН. Три из них во многом схожи за исключением частотного диапазона, а один компонент характеризуется низким энергопотреблением;

- ADF4355-2 — интегрированное решение с ФАПЧ/ГУН и диапазоном выходных частот от 53 до 4400 МГц;
- ADF4355 — интегрированное решение с ФАПЧ/ГУН и диапазоном выходных частот от 53 до 6800 МГц;
- ADF5355 — интегрированное решение с ФАПЧ/ГУН и диапазоном выходных частот от 53 до 13600 МГц.
- ADF4355-3 — интегрированное решение с ФАПЧ/ГУН, низким энергопотреблением и диапазоном выходных частот от 51 до 6600 МГц.

Все компоненты доступны на сайте [analog.com](http://analog.com), где можно найти их технические описания, заказать образцы и оценочные платы, загрузить управляющее программное обеспечение, программное обеспечение для моделирования, руководства пользователя, а также задать вопросы в сообществе EngineerZone и многое другое;

- [www.analog.com/ru/adf4355-2](http://www.analog.com/ru/adf4355-2)
- [www.analog.com/ru/adf4355](http://www.analog.com/ru/adf4355)
- [www.analog.com/ru/adf5355](http://www.analog.com/ru/adf5355)
- [www.analog.com/ru/adf4355-3](http://www.analog.com/ru/adf4355-3) ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Роберт Бреннан. Анализ, оптимизация и устранение целочисленных граничных паразитных гармоник в схемах ФАПЧ с ГУН на частотах до 13,6 ГГц. [www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/analyzing-integer-boundary-spurs.html](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/analyzing-integer-boundary-spurs.html)