

Особенности проектирования широкополосных синтезаторов частот на основе ФАПЧ с интегрированным ГУН

Александр АРЕДОВ
aredov.alexandr@ic-design.ru
Евгений МАРКОСЯН

В настоящее время для синтезирования сетки частот в диапазоне до нескольких гигагерц в распоряжении разработчиков аппаратуры имеются синтезаторы с фазовой автоподстройкой частоты двух типов: без встроенного генератора, управляемого напряжением (ГУН), и с его наличием в составе ИС.

Для построения законченного источника ВЧ-колебания в составе аппаратуры совместно с микросхемами первого типа необходимо использование отдельной ИС ГУН, что увеличивает габариты схемы, делает схему более чувствительной к помехам и требует дополнительных внешних элементов. Уровень управляющего напряжения, при котором обеспечивается нужный диапазон синтезируемых частот, в большинстве управляемых генераторов может достигать 15 В. Потребность реализовывать стабильное напряжение питания столь высоких значений входит в противоречие с современными тенденциями к снижению напряжения питания и потребляемой мощности. Кроме того, этот уровень напряжения следует согласовывать с максимальным уровнем выходного напряжения фазового детектора микросхемы синтезатора, обычно не превышающего 5,5 В. Как правило, для данного согласования применяются активные фильтры контура ФАПЧ, для построения которых требуется малошумящий ОУ с высоким напряжением

питания. Из-за всех указанных недостатков в последние годы наметилась тенденция к применению микросхем синтезаторов частот с интегрированным ГУН (MAX2870, ADF4350). В этих микросхемах реализован октавный ГУН, чей диапазон частот для микросхемы ADF4350 составляет 2,2×4,4 ГГц, а для MAX2870 3×6 ГГц. Единственным минусом подобных систем является несколько больший уровень фазового шума встроенного ГУН по сравнению с отдельной ИС ГУН, однако этого оказывается достаточно для большинства приложений. На рынке отечественной ЭКБ подобные ИС отсутствуют. В настоящий момент российская компания «ПКК Миландр» ведет разработку микросхемы, аналогичной по своему функциональному наполнению MAX2870. В статье пойдет речь о некоторых особенностях проектирования подобных широкополосных синтезаторов частот.

На рис. 1 представлена типичная структурная схема синтезатора частоты с интегрированным ГУН. Частота с выхода ГУН, охваченного контуром ФАПЧ, может допол-

нительно делиться выходным делителем частоты на 2, 4, 8, 16 и т. д. При этом если ГУН обеспечивает перестройку частоты в два раза, то совместно с делителем частоты и дробной петлей ФАПЧ становится возможным синтезировать сетку частот в широком диапазоне без разрывов (рис. 1).

Схемотехника широкополосных интегральных LC-генераторов, управляемых напряжением

В качестве ГУН в синтезаторах частот применяются LC-генераторы, поскольку генераторы других типов не обеспечивают необходимый уровень фазового шума. Для управления частотой, как правило, используются варикапы на основе подзатворной емкости МДП-транзистора. Основным недостатком LC-генераторов является узкий относительный диапазон перестройки при изменении управляющего напряжения в диапазоне напряжения питания ИС (обычно составляет 0,5–3%). Для устранения такого недостатка помимо непрерывного управления частотой напряжением вводят дискретное управление, основанное на подключении различного числа емкостей к резонансному контуру генератора. На рис. 2 представлен один из возможных вариантов построения схемотехники широкополосного ГУН с дискретным управлением матрицей подключаемых конденсаторов. ГУН построен по симметричной схеме и вырабатывает дифференциальный сигнал, удобный для последующей буферизации и деления частоты. Резонансный колебательный контур образует симметричная катушка индуктивности L1, а также сумма емкостей варикапов V1, V2 и суммарной емкости подключенных в данный момент конденсаторов матрицы. Построение матрицы

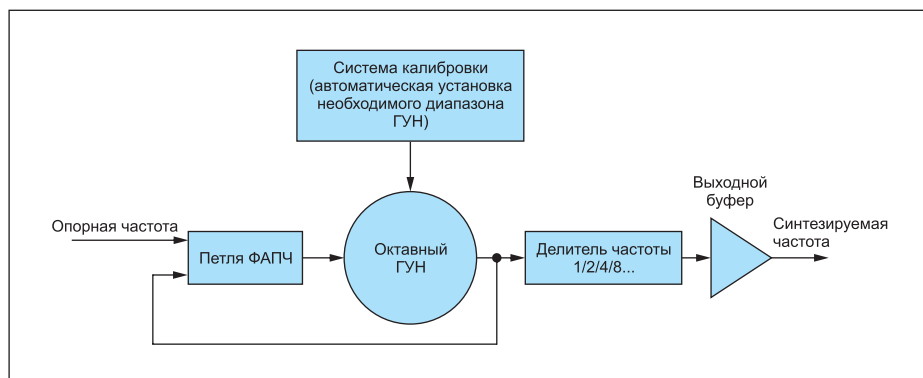


Рис. 1. Структурная схема широкополосных синтезаторов с интегрированным ГУН

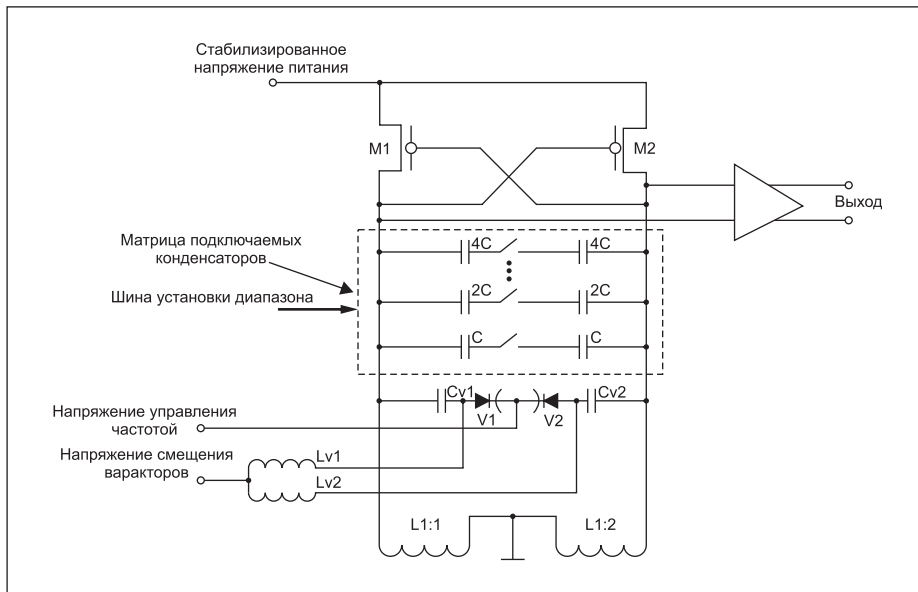


Рис. 2. Вариант построения схемотехники широкополосного ГУН

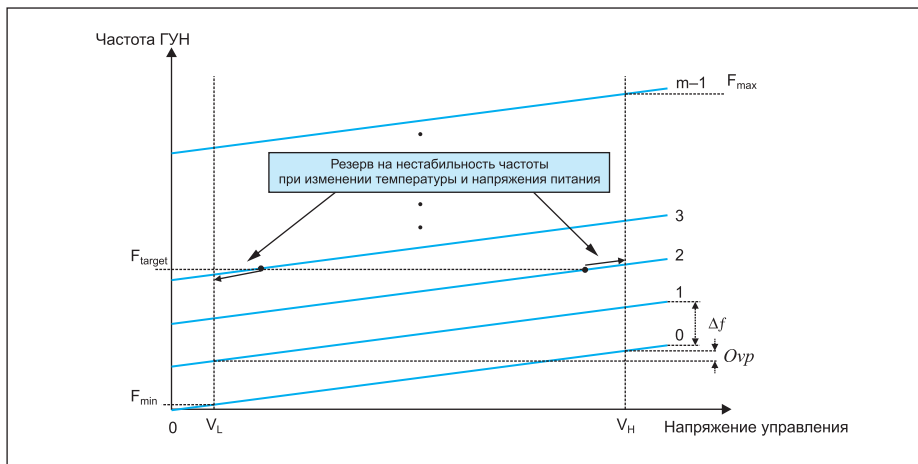


Рис. 3. Семейство перестроенных характеристик ГУН

Особенности маршрута проектирования интегральных LC-генераторов в САПР

Для корректного моделирования высокочастотных LC-генераторов в САПР большое значение имеет точность моделей пассивных и активных компонентов схемы. На начальном этапе создания схемы (до разработки топологии ИС) все необходимые модели элементов берутся из библиотек, поставляемых фабриками полупроводниковых приборов. Пассивные и активные элементы имеют подробные электрические модели, которые учитывают температурные зависимости и влияние технологических отклонений, поэтому на начальном этапе не возникает проблем с разработкой схемы. Однако на втором этапе (после разработки топологии), где требуется учесть влияние расположения элементов и межсоединений, возникают сложности. Для большинства аналоговых схем влияние паразитных эффектов топологической разводки учитывается при моделировании схемы с учетом паразитных емкостей и сопротивлений топологической структуры. Такой подход применительно к моделированию высокочастотных LC-генераторов не предусматривает ряд эффектов и может иметь значительные погрешности воспроизведения значений добротности и индуктивности использованных индукторов, что приводит к некорректным значениям основных параметров генератора (частота, фазовый шум). Это происходит в силу следующих причин:

1. Проводники, соединяющие индуктивность резонансного контура генератора с другими элементами, увеличивают суммарное значение индуктивности, что вызывает понижение частоты LC-генератора. Это наиболее критично для длинных проводников, которые используются в схемах ГУН с большим количеством поддиапазонов.
2. В соединительных проводниках, а также в результате их электромагнитных взаимодействий с подложкой кристалла и с другими элементами возникают потери энергии, что приводит к уменьшению добротности резонансного контура.
3. Расположение вблизи индуктивности каких-либо элементов разводки, контактов к подложке или других компонентов структуры может оказать влияние как на добротность, так и на значение индуктивности в результате электромагнитных взаимодействий.
4. Вследствие пространственной протяженности матрицы конденсаторов, которая используется в многодиапазонных ГУНах, может возникнуть неравномерность шага изменения емкости, поскольку разные части матрицы имеют разное удаление от индуктивности.

Все вышеперечисленные эффекты не могут быть предусмотрены с помощью стандартного моделирования только с учетом паразит-

конденсаторов возможно как по двоично взвешенному принципу, так и по линейному. Перекрестная пара транзисторов M1, M2 образует элемент отрицательного дифференциального сопротивления, которое компенсирует потери в колебательном контуре и обеспечивает незатухающий режим колебаний. Для задания оптимальной рабочей зоны варикапов используется отдельное напряжение смещения, подключаемое к анодам варикапов через разделительные индукторы Lv1, Lv2.

Введение дискретного управления частотой разбивает весь рабочий диапазон частот ГУН на поддиапазоны и порождает семейство перестроенных характеристик (рис. 3). Количество поддиапазонов, величина интервала между поддиапазонами, величина перекрытия соседних поддиапазонов устанавливаются такими, чтобы при выборе ближайшего к синтезируемой частоте F_{target} поддиапазона при изменении внешних условий (напряжения питания, окружающей

температуры) напряжение управления в замкнутом кольце ФАПЧ находилось в рабочем диапазоне значений и гарантировался режим синхронизма ФАПЧ. Для уменьшения температурной нестабильности частоты могут использоваться специальные схемы компенсации (рис. 3).

Для обеспечения октавного диапазона перестройки частот ГУН необходимо, чтобы суммарная емкость матрицы подключаемых конденсаторов изменялась более чем в 4 раза от минимальной до максимальной частоты ГУН. Это приводит к большим изменениям добротности контура и, следовательно, к вариациям амплитуды колебания и фазовых шумов. По этой причине весь октавный диапазон не удается покрыть одним резонансным контуром. В результате приходится разбивать диапазон на несколько частей и реализовывать несколько генераторов. Например, микросхема MAX2870 содержит четыре ГУН, в каждом из которых реализовано 16 поддиапазонов.

ных емкостей и сопротивлений. Необходимо иметь в виду электромагнитные взаимодействия при помощи специальных приложений. Так как электромагнитный симулятор работает только с пассивными компонентами, следует разбить топологию схемы на две части. В первую часть должны входить пассивные элементы — конденсаторы, индуктивности и наиболее важные межсоединения. Эта часть топологии должна моделироваться при помощи электромагнитного симулятора. Ко второй части относятся активные компоненты и менее важные межсоединения. Данная часть топологии может моделироваться стандартным способом. Далее нужно соединить эти модели вместе и промоделировать интересные параметры.

Система автоматической калировки ГУН

При использовании в составе контура ФАПЧ генератора, управляемого напряжением с дискретным управлением частотой, возникает необходимость реализации системы автоматической установки соответствующего поддиапазона ГУН, перед тем как начнется процесс захвата контура ФАПЧ. Упрощенная структурная схема контура ФАПЧ с системой калировки ГУН показана на рис. 4.

Во время поиска нужного диапазона вычисляется целевая величина на основе выбранной опорной частоты и петлевых коэффициентов деления. На входе управляющего напряжения ГУН поддерживается постоянное напряжение, соответствующее середине поддиапазона. Частота ГУН в текущем поддиапазоне переводится в цифровой код специальным преобразователем. Затем эта величина сравнивается с целевой величиной, и в соответствии с бинарным поиском (деление отрезка пополам) устанавливается новый поддиапазон ГУН. В результате за несколько итераций устанавливается поддиапазон ГУН, в котором разница между цифровым эквивалентом частоты ГУН и целевой величиной минимальна.

Критичным местом в системе калировки является преобразователь частоты ГУН — код. Для этого преобразования обычно применяется КМОП-счетчик, значения с которого считываются через заданный интервал времени. Предельная частота КМОП-счетчиков не превышает 500 МГц при использовании подходящих для данного класса систем технологических процессов с проектными нормами 0,18 мкм. Вследствие этого частоту ГУН в несколько гигагерц необходимо поделить предварительным делителем (рис. 5). Значения с выхода счетчика записываются в защелку через равные интервалы времени, задаваемые частотой опроса. Эта частота вырабатывается делением опорной частоты синтезатора. Тогда, вычисляя разницу между текущим и предыдущим значениями в защелке, получаем число, пропорциональное текущей частоте ГУН. Точность

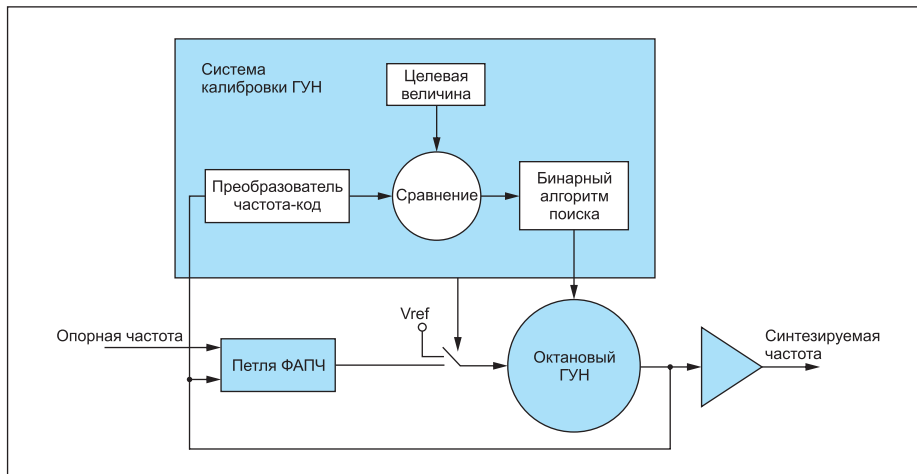


Рис. 4. Структурная схема петли ФАПЧ с системой калировки ГУН

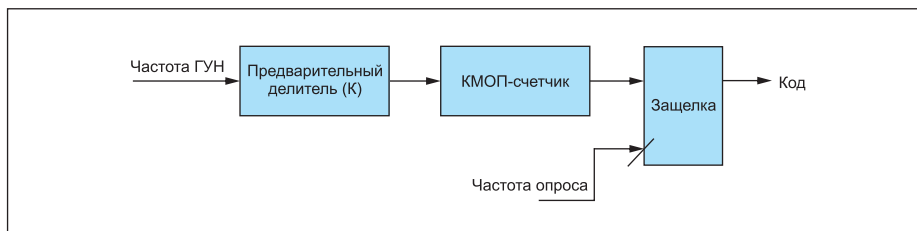


Рис. 5. Структурная схема преобразователя частота-код

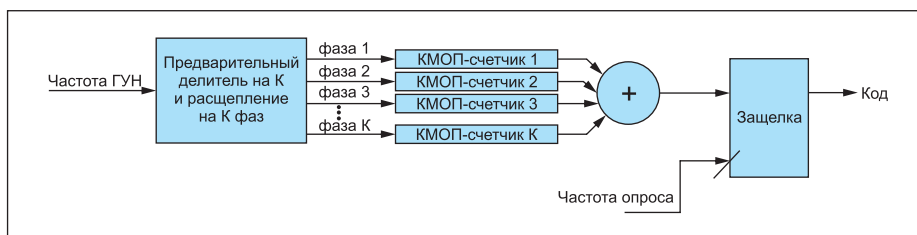


Рис. 6. Структурная схема преобразователя частота-код с применением метода расщепления на фазы

такого преобразования (единица младшего разряда выходного кода) будет определяться выражением:

$$dF = KF_{\text{опроса}}, \quad (1)$$

где K — коэффициент предварительного делителя.

Требуемая точность преобразования — важная системная величина, выбираемая исходя из запасов на нестабильность частоты при изменении температуры и напряжения питания во всех поддиапазонах ГУН. Время такого преобразования задается частотой опроса. Из формулы (1) следует, что при делении частоты ГУН предварительным делителем ухудшается точность преобразования. Компенсировать это можно только уменьшением частоты опроса, что увеличивает время преобразования и, следовательно, время всего процесса калировки ГУН. Поскольку данный процесс происходит каждый раз при перестройке частоты синтезатора, время процесса калировки является частью общего времени

смены частоты. Для приложений, где нужна быстрая смена частоты, возможно усовершенствование преобразователя частота-код и применение метода расщепления на фазы (рис. 6). Метод основан на том, что в процессе предварительного деления высокой частоты ГУН в делителе легко реализуется набор выходных сигналов, сдвинутых по фазе относительно друг друга. Далее устанавливается индивидуальный счетчик на каждую фазу, а результаты всех счетчиков суммируются. В итоге за период опроса суммарно на все счетчики поступит такое же число периодов частоты ГУН, как на счетчик без предварительного деления. В этом случае точность такого преобразования:

$$dF = F_{\text{опроса}}, \quad (2)$$

Другими словами, описанный метод позволяет сократить время калировки ГУН в K раз по сравнению с подходом без расщепления фаз, не ухудшив при этом точность преобразования.

Разработка микросхемы широкополосного синтезатора частоты до 6 ГГц с интегрированным ГУН компании «ПКК Миландр»

В настоящее время российская компания «ПКК Миландр» ведет разработку микросхемы, аналогичной по своему функциональному наполнению МАХ2870. Микросхема содержит многодиапазонный октавный ГУН на частоты 3–6 ГГц. В системе автокалибровки ГУН применен описанный метод расщепления на фазы.

Ориентировочные параметры разрабатываемой микросхемы следующие:

- диапазон выходных частот: 23,5×6000 МГц;
- максимальный уровень мощности выходной частоты на СВЧ-выходах: 5 дБм;
- коэффициенты деления делителей выходной частоты: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128;
- максимальная опорная частота: 200 МГц;
- максимальная частота фазового детектора: 100 МГц (целочисленный режим); 50 МГц (дробный режим);
- фазовый шум ГУН на выходной частоте 6 ГГц и отстройке 100 кГц: –100,5 дБн/Гц;
- фазовый шум ГУН на выходной частоте 3 ГГц и отстройке 100 кГц: –108 дБн/Гц;
- время автоматической калибровки ГУН: не более 40 мкс;
- нормированный уровень собственных шумов: –226 дБн/Гц (целочисленный режим); –222 дБн/Гц (дробный режим);
- напряжение питания: 3,3 В ±10%;
- динамический ток потребления: не более 320 мА. ■