

Генератор функций. Прямой цифровой синтез (DDS).

Влияние на конструкцию генератора функций

Генераторы функций существуют уже давно. Со временем эти инструменты накопили длинный список функций. Начиная с нескольких регуляторов для настройки амплитуды и частоты синусоидального выходного сигнала, генераторы функций теперь обеспечивают более широкие частотные диапазоны, откалиброванные выходные уровни, различные формы сигналов, режимы модуляции, компьютерные интерфейсы и в некоторых случаях произвольные функции.

Многие возможности, добавленные к генераторам функций, усложнили их конструкцию и увеличили их стоимость. Есть возможность радикального перепроектирования знакомого функционального генератора с использованием прямого цифрового синтеза (DDS).

DDS обеспечивает замечательное частотное разрешение и позволяет напрямую реализовать частотную, фазовую и амплитудную модуляцию. Эти функции, которые были «прикреплены» к генераторам функций, теперь обрабатываются DDS ясным и фундаментальным способом.

Прямой цифровой синтез

Многие концепции DDS проиллюстрированы тем, как генерируется синусоидальная волна. На рисунке ниже показана блок-схема простого генератора функций DDS. Функция синуса хранится в таблице RAM. Цифровой синусоидальный выход RAM преобразуется в аналоговую синусоидальную волну с помощью ЦАП. Ступеньки, видимые на выходе ЦАП, фильтруются фильтром нижних частот, чтобы обеспечить чистый синусоидальный выход.

Частота синусоидального сигнала зависит от скорости изменения адресов в таблице RAM. Адреса генерируются путем добавления константы, хранящейся в регистре приращения фазы (PIR), к накопителю фазы. Обычно скорость добавления постоянна, а частота изменяется путем изменения числа в PIR.

Разрешение по частоте зависит от числа битов в PIR. Если PIR, сумматор и фазовый аккумулятор поддерживают 48-битное сложение, то дробное частотное разрешение составляет одну часть из 2^{47} , или примерно 1×10^{14} . Это означает, что 48-битный генератор DDS может обеспечить разрешение лучше, чем 1 ГГц на выходе 10 МГц.

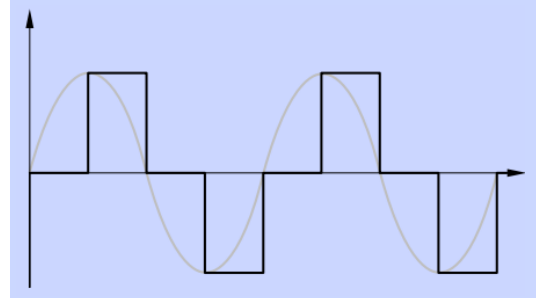
Есть еще несколько деталей, которые необходимо рассмотреть, чтобы понять DDS в этом приложении. Необходимо ответить на вопросы о частоте дискретизации, размере оперативной памяти, разрешении ЦАП, характеристиках фильтра и спектральной чистоте выходного сигнала.

Выборки за цикл

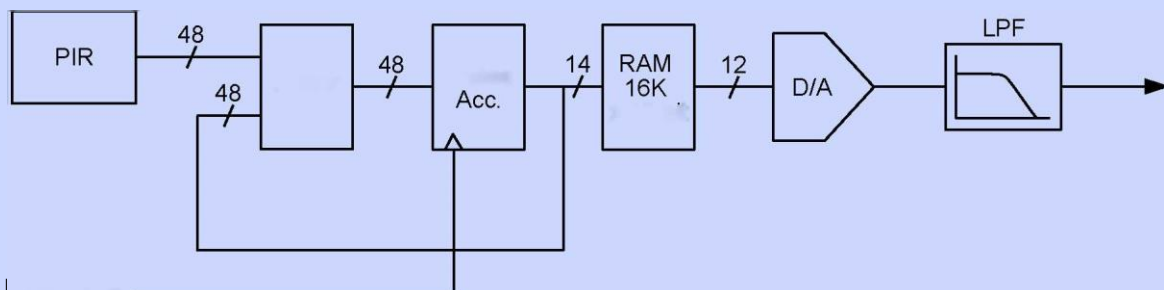
Наша интуиция может предположить, что для каждого цикла синусоидальной волны требуется большое количество выборок, чтобы добиться хорошей спектральной чистоты выходного сигнала. набросок синуса, который аппроксимируется небольшим количеством выборок за цикл, вряд ли выглядит как синусоида. Примечательно, что во время каждого цикла требуется всего около трех выборок. Фактически, если бы мы могли сделать фильтр нижних частот с произвольной резкостью, нам потребовалось бы всего два отсчета за цикл.

Чтобы обосновать это, рассмотрим случай, когда у нас есть четыре выборки на синусоидальный цикл. Эта ситуация показана ниже. Выборка

Дискретизированная синусоида



Простой генератор функций DDS



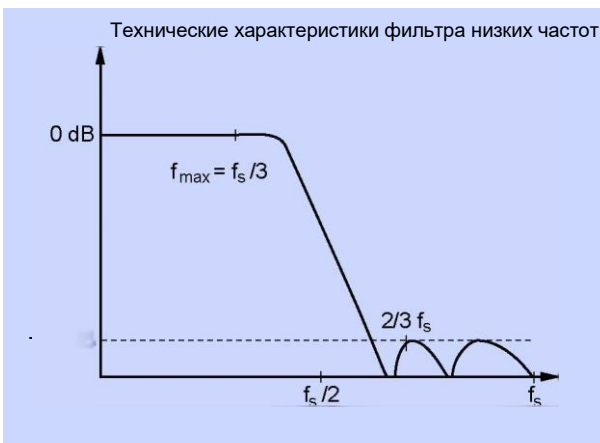
синусоидального сигнала сводится к последовательности импульсов (или прямоугольному сигналу, если бы мы начали отбор выборок с угла 45 градусов, а не с 0 градусов).

Спектры Фурье этой серии импульсов имеют компоненты на f , $2f$, $3f$... и т. д. Если мы сможем настроить фильтр нижних частот для устранения гармонических составляющих последовательности импульсов, то у нас останется основная гармоника (чистая синусоида на частоте f).

В более общем случае генерация выходного сигнала на f путем дискретизации со скоростью f_s , получим наиболее низкочастотную составляющую Фурье на частоте $f_s - f$. Этот простой результат становится основой спецификации фильтра нижних частот: фильтр должен пропускать f , но останавливать $f_s - f$.

Фильтры

На графике ниже показана передаточная функция фильтра нижних частот. Как мы видели, фильтр должен пропускать самую высокую частоту, которую мы хотим сгенерировать (f_{max}), но должен начинать свою полосу задерживания с $f_s - f_{max}$. Фильтры с крутым спадом и большим затуханием в полосе задерживания построить сложно. Разумный компромисс в этом случае достигается, когда $f_{max} = f_s / 3$. Это позволяет фильтру иметь полосу перехода в одну октаву.



Фильтр нижних частот для выходов DDS

Какое затухание в полосе задерживания необходимо? Это зависит от спецификации паразитных компонентов вывода. Типичная спецификация для приложения функционального генератора -70 дБн.

Фильтры Кьюэра (эллиптические) - хороший выбор для этого приложения. Они имеют полосы с быстрым переходом и могут быть разработаны с очень низким уровнем пульсации в полосе пропускания. Спецификации для этого примера удовлетворяет фильтр Кьюэра девятого порядка.

Фильтр Бесселя

Хотя фильтры Кьюэра являются лучшим выбором для приложений с непрерывной генерацией (CW), они непригодны для генерации сигналов произвольной формы. Во временной области фильтры Кьюэра имеют очень неприятный выброс. Гораздо лучшим выбором для сигналов произвольной формы (или пилообразных сигналов и треугольников) является фильтр Бесселя. Фильтр Бесселя имеет более медленный спад по сравнению с фильтром Кьюэра, но он почти

фазово-линейный. Отсутствие дисперсии в фазово-линейном фильтре сохраняет форму импульса и предотвращает появление дребезга во временной области. Фильтр Бесселя седьмого порядка с частотой среза -3 дБ $f_c = f_s / 4$ является хорошим выбором для фильтрации сигналов произвольной формы. Этот фильтр будет демонстрировать выходное нарастание $0,35 / f_c$.

Требования к ЦАП и ОЗУ

Большие и быстрые ОЗУ и высокоскоростные ЦАП с высоким разрешением сделали DDS жизнеспособной технологией для использования в генераторах функций. Какого размера, с какой скоростью и с каким разрешением требуется?

Как мы видели, максимальная практическая выходная частота составляет $f_s / 3$. Таким образом, фазовый аккумулятор DDS, ОЗУ и ЦАП должны работать с трехкратной максимальной желаемой выходной частотой.

Разрешение ЦАП зависит от спецификации паразитных составляющих для выхода (или желаемого разрешения сигнала произвольной формы). Ошибка квантования и нелинейности ЦАП приводят к ложным выходным сигналам. Чтобы получить приблизительное представление о величине паразитной частотной составляющей, осознайте, что разница между фактическим выходным сигналом ЦАП и желаемым значением синусоиды является источником этих паразитных выходных составляющих. Таким образом, 12-битный ЦАП, который является линейным и монотонным для 2 младших разрядов, будет иметь выходные ошибки порядка одной части из 2048, или около -66 дБ.

Короткая таблица RAM - еще один способ получить неверное значение из ЦАП. Чтобы избежать «шума фазового квантования», в ОЗУ должно быть на два бита адреса больше, чем битов в ЦАП.

Расширение диапазона частот

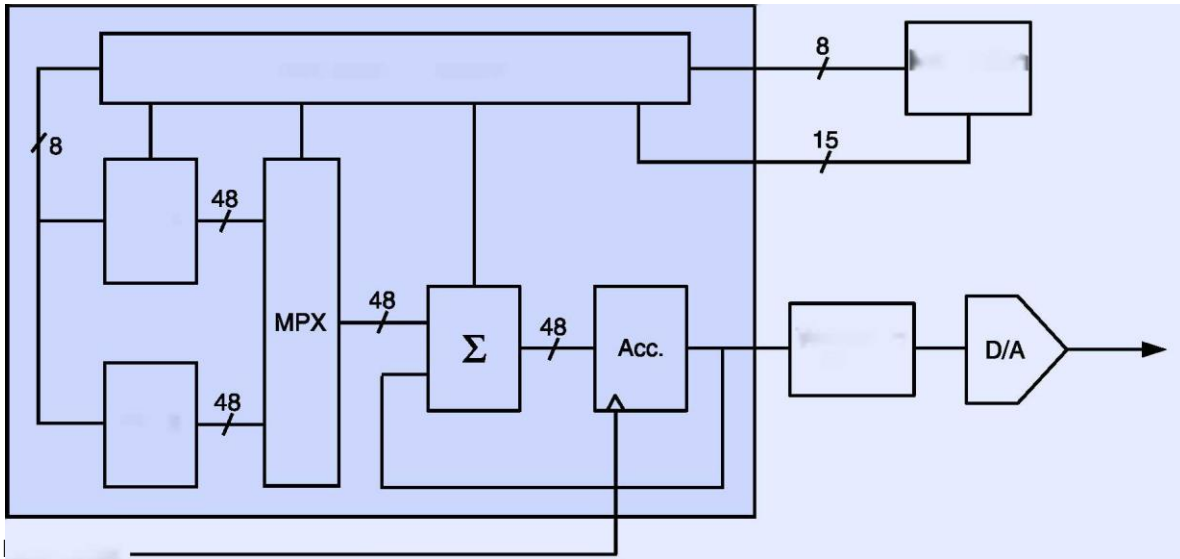
Частотный диапазон вывода DDS может быть расширен различными способами. В зависимости от того, какой метод используется, некоторые преимущества DDS могут быть потеряны. Как и в случае с более традиционными синтезаторами частот, выход DDS может быть удвоен, смешан с другими фиксированными источниками или использоваться в качестве эталона внутри контура фазовой автоподстройки частоты.

Методы модуляции

Мощность и элегантность DDS наиболее очевидны, когда требуется модулированный источник. Частоту выхода можно мгновенно изменить на любую частоту от нуля до f_{max} , просто изменив число в регистре приращения фазы. На графике ниже показана блок-схема фазового аккумулятора DDS с возможностью программируемой модуляции.

Этот фазовый аккумулятор, оптимизированный для приложений генератора функций, имеет два регистра приращения фазы: PIRA и PIRB. Мультиплексор шириной 48 бит может переключаться между PIR за один такт. Процессор модуляции может изменять PIR со скоростью до 10 миллионов байтов в секунду, заполняя один PIR, а другой используется как вход для сумматора.

Сложные программы модуляции могут храниться в ОЗУ модуляции. Эта RAM содержит коды операций и данные для



Фазовый аккумулятор DDS с процессором модуляции

процессора модуляции. Частотные сканирования иллюстрируют работу этого процессора. При программировании логарифмической развертки частоты список до 4000 дискретных частот сохраняется в ОЗУ модуляции хост-системой. Процессор модуляции изменяет PIRA, в то время как сумматор использует PIRB, и наоборот.

Могут быть сохранены более сложные программы модуляции, такие как частотная модуляция любой произвольной функцией, линейная или логарифмическая развертка, скачкообразная перестройка частоты и т. д. Фазовую модуляцию легко выполнить, запрограммировав PIRA с номинальной частотой и используя PIRB, который содержит номинальное приращение фазы плюс любой желаемый фазовый сдвиг для одного тактового цикла.

Широкие девиации частоты или фазы не проблема. Любой скачок фазы или частоты может быть запрограммирован и выполнен за один такт. А поскольку PIR можно изменять очень быстро, возможны частоты модуляции до нескольких сотен килогерц.

Фактически, могут быть сохранены произвольные программы модуляции. Эта возможность позволяет использовать генератор функций для тестирования модема, связи, определения частоты ошибок по битам и т. д.

Амплитудная модуляция

Есть два подхода к амплитудной модуляции выходного сигнала. Цифровые выходы ОЗУ или аналоговые выходы ЦАП могут быть умножены на желаемую амплитуду. Последний подход лучше подходит для генераторов функций, так что для амплитудной модуляции можно использовать внутренний или внешний источник.

Произвольные функции

Одним из непосредственных преимуществ архитектуры DDS является то, что генерация сигналов произвольной формы предоставляется бесплатно. Вместо того, чтобы сохранять таблицы синусов в ОЗУ сигналов, сохраняется список произвольных значений. Фазовый аккумулятор запрограммирован на пошаговое выполнение сохраненных значений по одному для воспроизведения желаемой формы сигнала через выходной ЦАП.

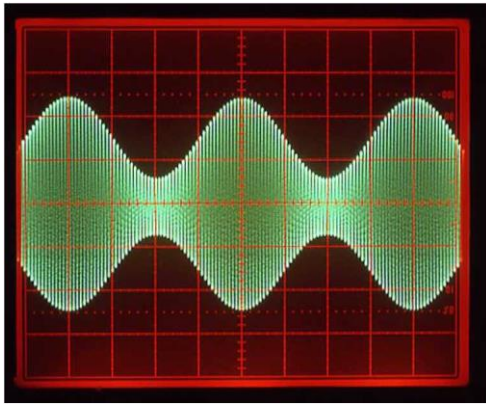
Возможность произвольной формы сигнала DDS упрощает задачу генерации других «стандартных» сигналов, имеющихся в генераторах функций. Линейный, пилообразный и даже гауссовский белый шум может быть сгенерирован путем изменения списка значений в ОЗУ сигналов.

Аккумулятор фазы должен быть разработан для поддержки определенных режимов, необходимых для сигналов произвольной формы. Скорость, с которой извлекаются значения ОЗУ, можно изменить, просто используя другое значение PIR. Однако переменная длина записи, функции запуска и циклическая адресация уникальны для генерации произвольной функции.

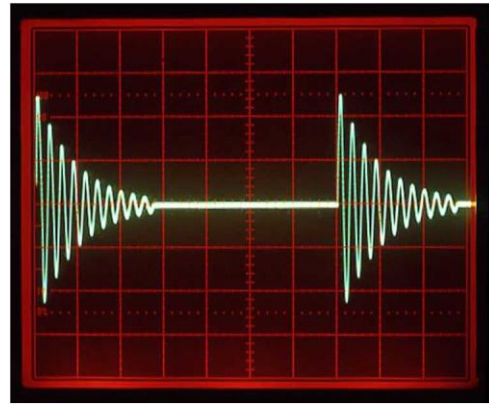
Как упоминалось ранее, для генерации сигналов произвольной формы требуется фильтр Бесселя. Фильтр Бесселя сглаживает ступеньки на выходе ЦАП. При частоте среза -3 дБ , f_c , равной $f \sqrt{4}$, выходной сигнал будет показывать контролируемое время нарастания $0,35/f_c$ без выбросов.

Прямоугольные сигналы

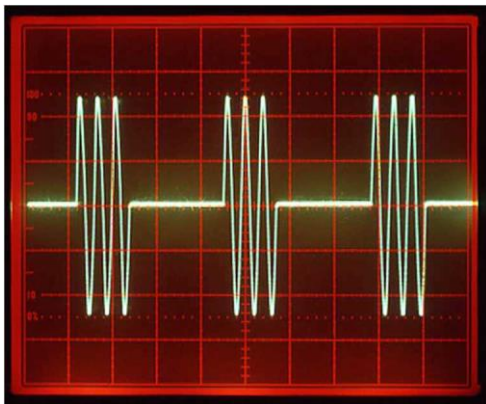
Прямоугольные сигналы - это особый случай для DDS. Можно подумать, что прямоугольный сигнал можно создать, загрузив $+1$ и -1 .



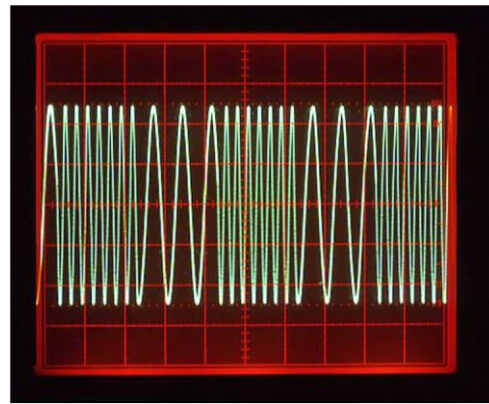
Амплитудная модуляция синуса синусом



Сигналы произвольной формы



Три пакета синусоидального сигнала



Частотная манипуляция синусоидальной волны

в ОЗУ сигналов. Действительно, могут, но с досадным ограничением, заключающимся в том, что края прямоугольной волны должны быть синхронизированы с тактовой частотой дискретизации DDS. Это условие сильно ограничит разрешенные доступные частоты, особенно на высоких частотах.

Намного лучший подход для генерации прямоугольных сигналов - это генерировать чистую синусоидальную волну, а затем дискриминировать синусоидальную волну в прямоугольный сигнал. Таким образом, прямоугольные сигналы будут иметь тот же частотный диапазон и разрешение, что и синусоиды.

Выходные усилители

Выходной усилитель, используемый в функциональном генераторе DDS, должен отвечать некоторым строгим требованиям. Чтобы сохранить формы сигналов, генерируемые в произвольном режиме, усилитель должен иметь широкую и плоскую полосу пропускания и демонстрировать линейный фазовый отклик, значительно превышающий частоту среза фильтра Бесселя.

Полоса пропускания усилителя также определяет время нарастания выходного сигнала прямоугольной формы. Здесь снова требуется хорошо настроенный (линейный по фазе) спад, чтобы предотвратить выброс выходного прямоугольного сигнала.

защищен от короткого замыкания или подключения к внешним источникам питания. Выходной усилитель должен иметь выходной импеданс 50 Ом независимо от настройки выходного уровня.

Для генерации сигналов низкого уровня большинство функциональных генераторов имеют выходные аттенюаторы. Аттенюаторы позволяют выходному усилителю работать в ограниченном диапазоне выходных уровней, так что искажения и отношения сигнал/шум остаются постоянными при изменении выходных уровней.

Плавающий генератор

Многие приложения требуют, чтобы функциональные генераторы могли подавать сигнал на нагрузку, которая не привязана к земле. Даже если нагрузка номинально привязана к земле, выход плавающего генератора обеспечит гораздо более чистый сигнал, поскольку контуры заземления системы исключены. Важно, чтобы выходной экран генератора был плавающим при любых обстоятельствах, даже если функциональный генератор подключен к контроллеру GPIB или если к прибору подключен внешний источник опорной частоты.

Специализированные интегральные схемы (ASICs)

DDS предлагает новый, ясный подход к проектированию генераторов функций. Большая часть аналогового «багажа», необходимого для генераторов функций, обрабатывается цифровыми логическими схемами. К сожалению, эти логические схемы большие, сложные и должны работать быстро. Например, для DDS 15 МГц требуется 48-битный сумматор, работающий на частоте 40 МГц с большим количеством связующей логики. К счастью, специализированные интегральные схемы (ASIC) обеспечивают дешевое решение проблемы.

На схеме, изображенной ранее, для TTL-прототипа фазового аккумулятора требовалось около 150 микросхем. Прототип мог работать лишь с тактовой частотой 10 МГц. Матрица затворов КМОП такой же конструкции была изготовлена в 68-выводном пластиковом корпусе PLCC. Матрица затвора работает на частоте 40 МГц (наихудший случай), потребляет около 0,25 Вт мощности и имеет текущую стоимость около 10 долларов.

Заключение

Генераторы функций на основе DDS появляются на рынке. Эти функциональные генераторы предлагают существенное повышение производительности при меньших затратах по сравнению с традиционными аналоговыми функциональными генераторами. По мере того, как стоимость ASIC, ПЗУ и ЦАП снижается, а их скорость и разрешение возрастают, можно ожидать, что генераторы функций на основе DDS вскоре заменят их аналоговых собратьев.