

# Универсальные СВЧ USB-генераторы как замена настольным гигантам

Андрей Горевой (г. Томск)

В статье описаны способы повышения экономичности портативных СВЧ-устройств, реализованные при разработке универсального СВЧ-генератора с питанием и управлением по шине USB 2.0. Приведены результаты тестирования разработанного прибора и сравнение его с аналогами.

## ВВЕДЕНИЕ

В эпоху активного развития компактной электронной аппаратуры вполне закономерно появление портативных приборов для инженерных задач. Современные устройства сочетают компактность и экономичность с достаточно высокими техническими характеристиками. Сегодня в арсенале разработчика уже появились портативные измерители мощности, осциллографы, частотомеры, анализаторы цепей, спектроанализаторы и генераторы сигналов, подключаемые к компьютеру по шине USB.

Ориентация производителей портативных приборов на эту шину неслучайна: интерфейс USB обладает большими возможностями, универсален и широко распространён. Однако ограничение по мощности подаваемого электропитания – максимум 2,5 Вт для USB версии 2.0 – существенно снижает возможности для создания сложных измерительных приборов на этой шине (вариант с использованием сдвоенных кабелей для получения мощности питания 5 Вт на практике оказывается неудобным).

Поэтому, к сожалению, компактные анализаторы и генераторы заметно проигрывают по функциональности полноразмерным настольным приборам. Но, несмотря на это, развитие разработок в области USB-приборов продолжается – в первую очередь, за счёт совершенствования их элементной базы.

Как известно, набор функций современного универсального СВЧ-генератора должен включать:

- управление частотой;
- управление мощностью;
- аналоговую модуляцию (АМ, ЧМ, ФМ, ИМ);
- сканирование по частоте, мощности или списку;
- возможность построения сложных

комплексов (наличие портов синхронизации и поддержка стандартной системы команд).

Какими способами можно обеспечить подобный функционал при низкой мощности питания? Познакомимся с ними на примере разработки портативного USB-генератора СВЧ-сигналов.

## СИНТЕЗ ЧАСТОТЫ

Начать следует с обеспечения главной функции генератора – синтеза частоты. Для определённости ограничимся классическим методом с фазовой автоподстройкой (ФАПЧ).

За свою долгую историю этот метод претерпел несколько трансформаций – от использования целочисленного делителя частоты, имеющего известные ограничения, до применения дробного делителя с дельта-сигма модулятором, позволяющим получать высокие спектральные характеристики и большое разрешение по частоте. Такое усовершенствование метода далось ценой роста энергопотребления синтезатора частоты, который, впрочем, можно считать вполне приемлемым: примерно с 30 мВт до 120 мВт для микросхем ADF4106 и ADF4159 соответственно [1, 2].

Нужно учитывать, что у подобных микросхем есть два ограничения. Первое – высокий собственный шум частотно-фазового детектора (ЧФД), не позволяющий реализовать шумовой потенциал высокочастотных опорных кварцевых генераторов [3]. Попытки избавиться от избыточного шума ЧФД неизбежно приводят к резкому росту сложности, цены и энергопотребления системы, скорее всего, несовместимого с питанием по шине USB. Второе ограничение, которое придётся так или иначе обходить, – недостаточное разрешение по частоте (немного больше 1 Гц) с артефактами типа «Integer Boundary Spurs» в спектре [4]. Даже в передовых

микросхемах ADF4159 и HMC704, судя по документации, такие артефакты имеют недопустимо высокий уровень (до –50 дБн), а их присутствие в характерных точках диапазона неизбежно. При таких спектральных характеристиках преимущество микросхем по разрешению в несколько герц практически теряет смысл.

Таким образом, шаг перестройки по частоте не может быть меньше сотен килогерц из-за необходимости существенного подавления помех дробности с помощью петли ФАПЧ. Естественный выход из этой ситуации – изменение положения «поражённых» помехами областей спектра перестройкой опорной частоты. Казалось бы, более удобным мог быть вариант с применением цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС) в качестве опорного. Однако такие устройства не обеспечивают достаточно чистый спектр, а также характеризуются высоким энергопотреблением. Существуют решения с заметно лучшими спектральными характеристиками ЦВС, достигаемыми, опять же, ценой повышения энергопотребления [6].

Как показывают расчёты, изменение частоты на выходе дробного делителя может достигать субгерцовых значений при разрядности модулятора выше 24 бит и входной частоте 1...2 ГГц [7].

$$\delta f = F_{in} \left( \frac{1}{N + \frac{F}{M}} - \frac{1}{N + \frac{F+1}{M}} \right) \approx \frac{F_{in}}{MN^2},$$

где  $F_{in}$  – частота входного сигнала,  $N$  – целая часть коэффициента деления,  $F$  – показатель дробности коэффициента деления,  $M$  – разрядность модулятора.

При этом потребление делителя, очевидно, в разы ниже, чем у ЦВС. В итоге схема [6] легко трансформируется в компактное и экономичное решение [8].

Использование для дробной ФАПЧ микросхемы ADF4159 при входной частоте 2 ГГц, даёт частотное разрешение с наихудшим значением 0,113 Гц на этой же частоте. При таком подходе можно получить разрешение порядка 1 Гц для частот вплоть до 20 ГГц.

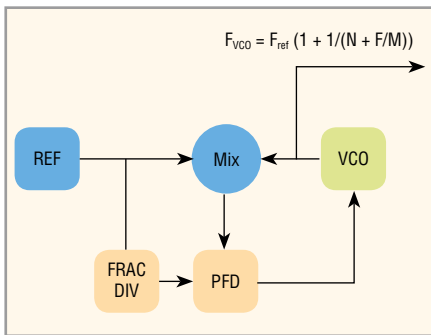


Рис. 1. Схема опорного синтезатора

Частоту выходного сигнала синтезатора остаётся поделить и подать в качестве опорной на вход основной петли ФАПЧ.

Получение высокочастотного опорного сигнала для синтезатора (см. рис. 1) вполне реализуемо путём умножения сигнала от высокочастотного кварцевого генератора, управляемого напряжением (ГУН), который построен на КМОП-логике и стабилизирован недорогим термокомпенсированным кварцевым генератором [3]. Как правило, такие ГУН выдают сигнал, обогащённый гармониками, любую из которых можно выделить недорогим фильтром на ПАВ без существенного повышения энергопотребления.

Рассмотрим непосредственно источник выходного сигнала генератора – ГУН. Во многих отношениях выгодно использовать ГУН, работающий в верхней октаве выходного диапазона. Деление частоты с переменным коэффициентом позволит получить практически любую более низкую частоту [9]. Нако-

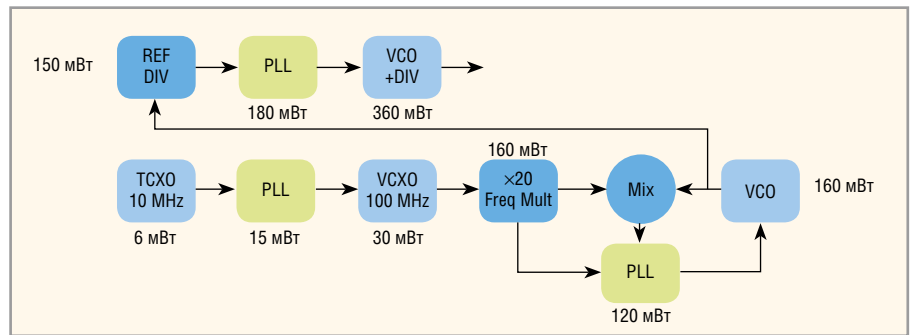


Рис. 2. Схема синтезатора с указанием энергопотребления узлов

нец, наилучший вариант – это размещение ГУН и делителя частоты (как, впрочем, и остальных узлов синтезатора) в одной микросхеме. Проблеме присущей резонаторам монокристаллических ГУН низкой добротности решают путём использования набора переключаемых ГУН. При этом возникает положительный побочный эффект: быстрое переключение на нужный ГУН с благоприятными начальными условиями для захвата частоты при её перестройке.

Среди первых микросхем, в которых были реализованы такие схемотехнические решения, были изделия производства Analog Devices (ADF436x, ADF4350) и Hittite Microwave (некоторые модели серий HMC82x, HMC83x). Затем появились микросхемы Maxim Integrated MAX287x, модели ADF4355 и ADF5355 производства Analog Devices, Skyworks SKY73134-11 и ST Microelectronics STW81200.

Эти компоненты имеют некоторые отличия. Микросхемы Hittite традиционно характеризуются повышен-

ным энергопотреблением и пониженными шумами синтезатора. Наиболее высокочастотные изделия ADF4355 и ADF5355 не предоставляют доступ к ручному выбору ГУН, в то время как встроенный автовыбор обеспечивает миллисекундное переключение частоты. В отличие от остальных, модель MAX2870 имеет достаточно гибкое управление. Пожалуй, эта микросхема и её менее шумящий «преемник» MAX2871 наиболее выгодны для построения скоростных сверхширокополосных универсальных генераторов для тестирования систем связи и дальней радиолокации.

Объединяя всё вышесказанное, можно составить блок-схему синтезатора и рассчитать его энергопотребление (см. рис. 2).

Суммарное потребление синтезатора оценивается на уровне 1,18 Вт, что составляет около половины ресурса шины USB 2.0.

На рисунке 3 показаны спектры сигналов синтезатора на двух частотах.

## СЕРИЯ НОВЫХ ПОРТАТИВНЫХ USB-УСТРОЙСТВ

### Portable Lab Sensor

Портативные измерители мощности

### Portable Lab Generator

Портативные генераторы сигналов



тел.+7 (3822) 42-18-77, e-mail: kia@micran.ru

www.micran.ru/PLD

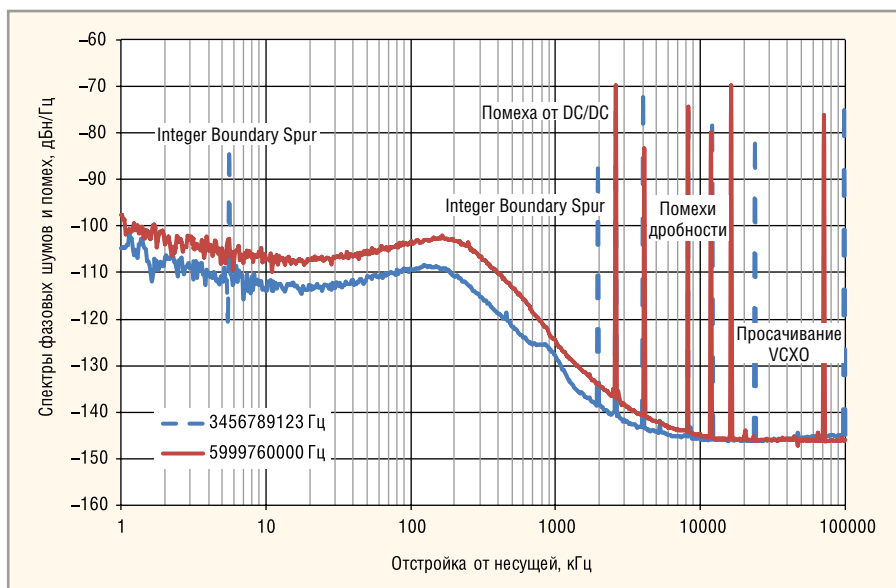


Рис. 3. Спектры сигналов синтезатора вблизи несущей частоты

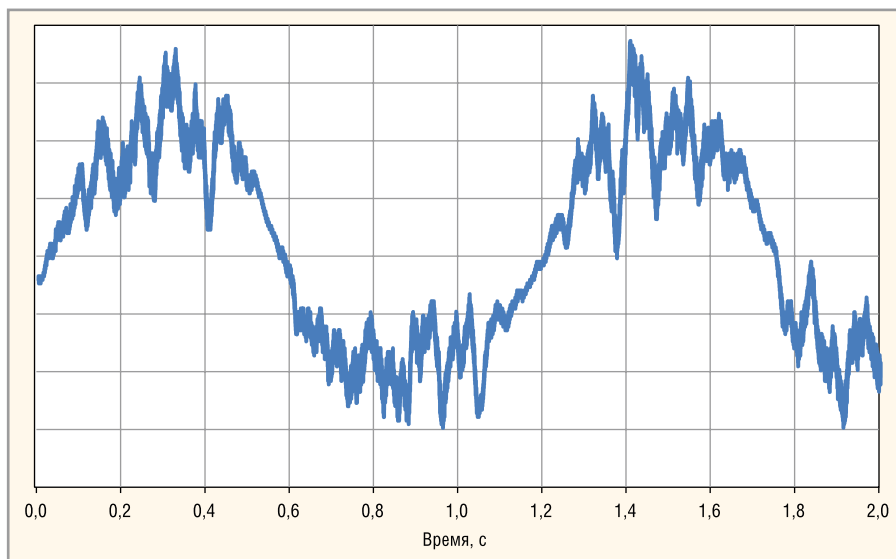


Рис. 4. Сигнал биений двух синтезаторов, работающих на частотах 6 ГГц и 6 ГГц минус 1 Гц

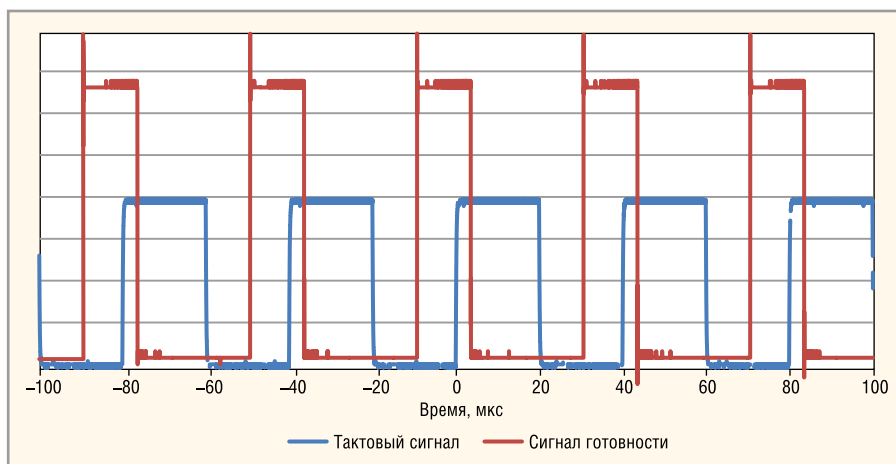


Рис. 5. Осциллограммы сигналов тактирования и готовности прибора при сканировании по частоте

Примечательно, что современная малошумящая микросхема ФАПЧ с дельта-сигма-модулятором даёт в основной петле очень высокий уровень помех дробности на частотах, кратных 4 МГц. Режим работы её дели-

теля частоты таков, что дробная часть коэффициента деления кратна 1/8, и в спектре появляются мощные помехи, характерные для ранних версий микросхем с дробными делителями, например, ADF4153 [10]. В результате,

приходится усложнять схему петлевого фильтра для подавления помех до приемлемого уровня (-70 дБн), применяя звенья с резонансными контурами и ФНЧ на LC-звеньях. Побочными эффектами являются наводки на индуктивности фильтра от импульсных преобразователей питания, дающие дополнительные помехи в спектре на частотах кратных 2,5 МГц.

На рисунке 4 показан сигнал биений двух синтезаторов, расстроенных на номинальный шаг 1 Гц на частоте 6 ГГц.

Период сигнала биений составляет около 1,2 с, а частота – около 0,8 Гц. Учитывая предельную погрешность шага на этой частоте (0,33 Гц), можно утверждать, что описанное выше решение вполне эффективно.

На рисунке 5 показаны осциллограммы сигналов тактирования при сканировании по частоте в диапазоне 3...6 ГГц и сигнала готовности синтезатора (захват частоты текущей точки и установка мощности).

Период тактового сигнала составляет 40 мкс. С момента его поступления на соответствующий порт синхронизации прибора проходит порядка 5 мкс, пока микроконтроллер захватывает внешнее событие и входит в прерывание обработки перехода на следующую точку. В прерывании микроконтроллер отправляет все необходимые данные в микросхемы (перепрограммирует микросхемы ФАПЧ, ГУН и делители частоты, ступенчатые аттенюаторы управления мощностью). Через 30 мкс от момента поступления тактового сигнала микроконтроллер контролирует захваты частоты, сигнализирует о готовности и выходит из прерывания. Сканирование происходит по 501 точке с фиксированной мощностью в диапазоне частот 3...6 ГГц. Благодаря прямому доступу к переключению ГУН и достаточно простой архитектуре синтезатора удаётся получить выдающиеся скоростные характеристики.

На рисунке 6 показано поведение частоты при сканировании с внешним тактированием с периодом 40 мкс. Начало отсчёта совпадает с приходом первого импульса.

### Модуляции, управление мощностью и фильтрация гармоник

Как уже было отмечено, универсальный СВЧ-генератор должен обеспечивать полный набор видов аналоговой модуляции выходного сигнала. Как

правило, импульсный и амплитудный модуляторы выполнены как разные устройства в силу жёстких требований к характеристикам импульсного. А фазовую и частотную модуляции можно реализовать в одном канале, применяя линейную фильтрацию модулирующего сигнала.

Амплитудную модуляцию удобно реализовывать через плавный аттенуатор, угловую – через фазовращатель или через канал управления ГУН [11], а импульсную – переключателями или теми же плавными аттенуаторами, в зависимости от требований к фронтам радиоимпульсов и степени подавления несущей в паузе.

В настоящее время широко доступны дешёвые плавные аттенуаторы производства Hittite Microwave, выпускаемые в разных исполнениях и обладающие хорошими динамическими и временными характеристиками. Такие аттенуаторы идеально подходят для реализации АМ и ИМ (с временами нарастания и спада меньше 10 нс). Один такой аттенуатор при амплитудной модуляции обеспечивает регулировку амплитуды в 30 раз, глубиной до 96%. На рисунке 7 показаны временные характеристики ИМ, а на рисунке 8 – спектр сигнала на 6 ГГц.

Как видно на рисунке 7, аттенуаторы обеспечивают высокие временные характеристики фронтов огибающих радиоимпульсов (времена нарастания и спада – 8...9 нс). При выбранных параметрах модуляции (период – 2 мс, длительность – 1 мкс) уровень боковых составляющих должен составлять –66 дБ по отношению к мощности и импульсе, что и наблюдается на рисунке 8. Уровень несущей немного выше, что соответствует подавлению в паузе на 56 дБ (при теоретическом максимуме ослабления, равном 62 дБ).

Выбирая количество каскадов, следует учитывать, что потери мощности придётся компенсировать наращиванием коэффициента усиления выходного усилителя, нередко, с ростом его энергопотребления. К тому же специфика конструкции разрабатываемого компактного СВЧ-прибора подразумевает моноблочное исполнение с одной платой и неизбежно высоким уровнем наводок СВЧ-сигналов в разные линии из-за их высокой плотности.

То же самое можно сказать и про регулировку мощности. Самый простой и удобный вариант – применение программируемых ступенчатых

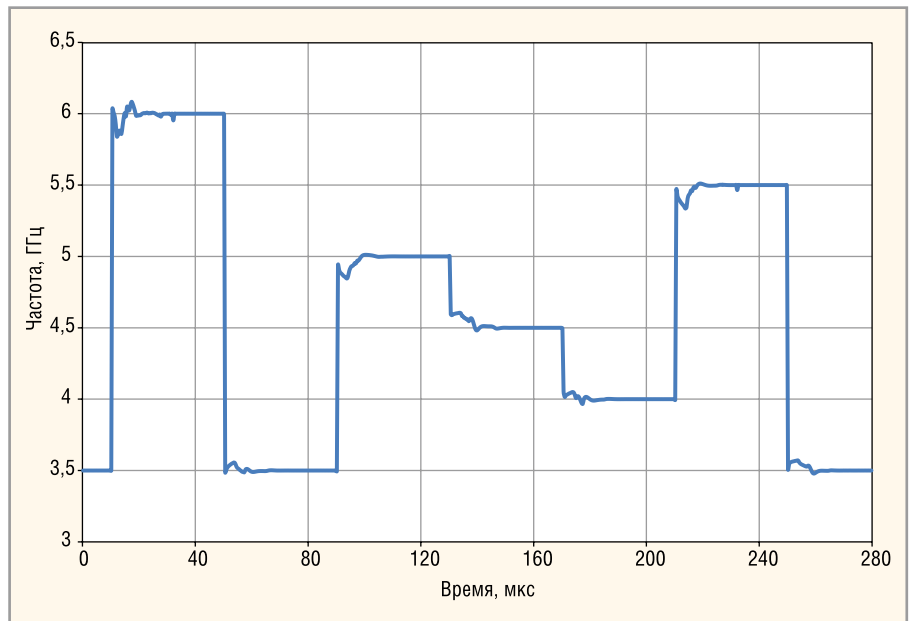


Рис. 6. График частоты при сканировании

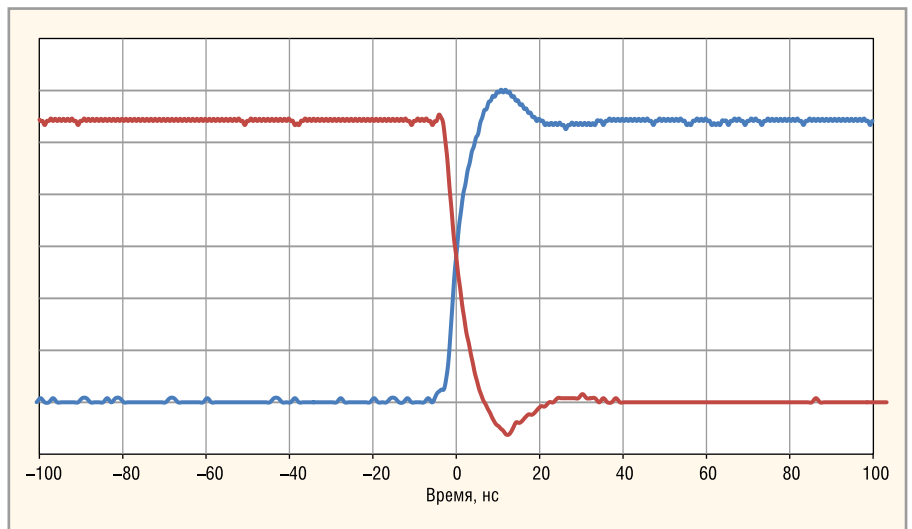


Рис. 7. Передний и задний фронты видеоимпульсов на выходе детектора мощности выходного сигнала

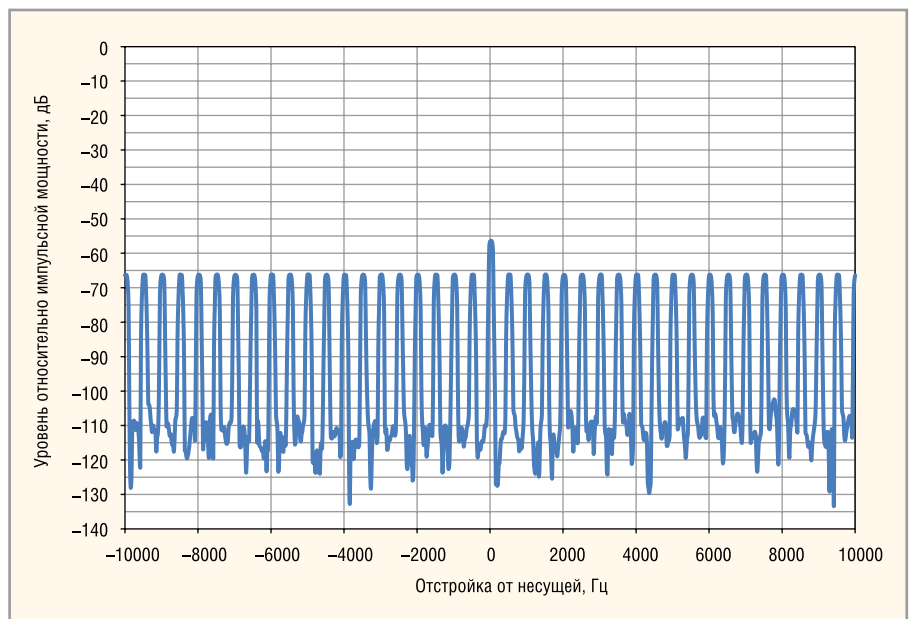


Рис. 8. Спектр сигнала 6 ГГц с ИМ (верхняя линия сетки вертикальной оси соответствует уровню мощности в импульсе)

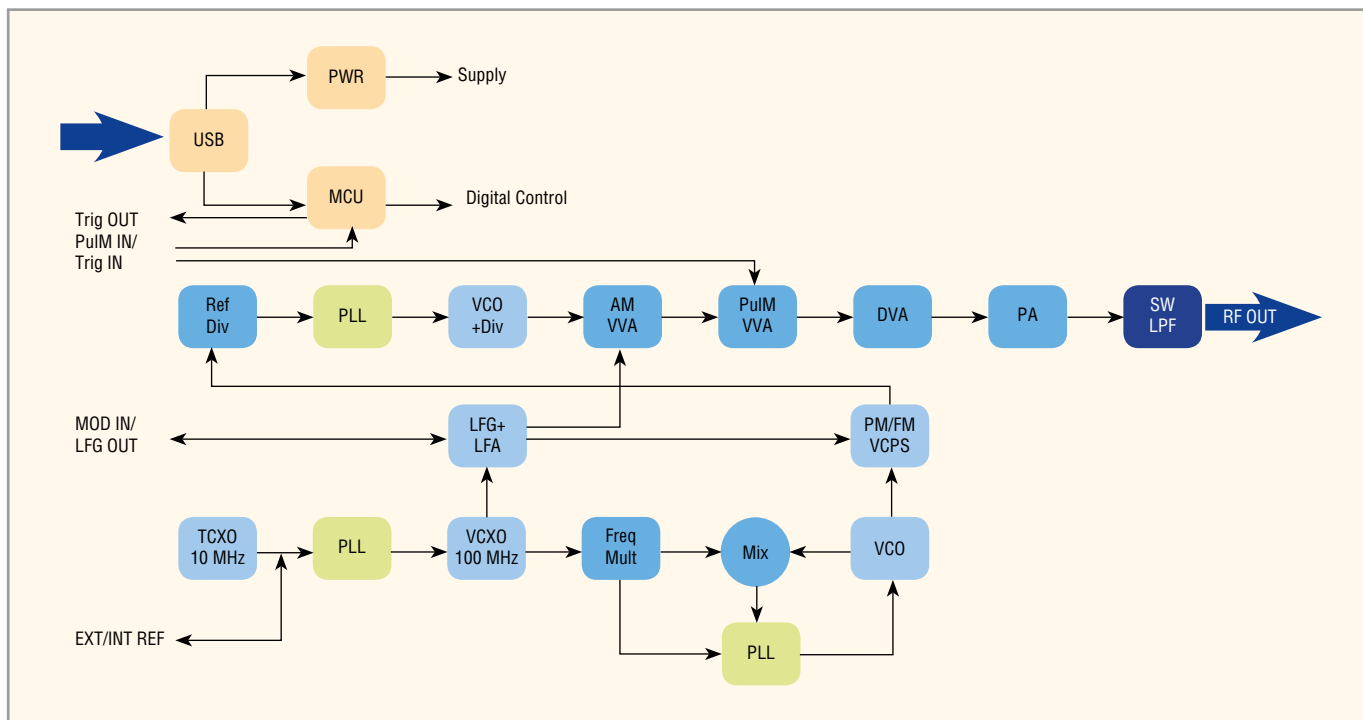


Рис. 9. Структурная схема разработанного прибора

аттенуаторов производства Peregrine Semiconductor или Hittite Microwave, обеспечивающих регулировку мощности до 30 дБ. Они же могут использоваться для выравнивания частотной характеристики выходной мощности.

Ещё один связанный с АМ момент, на который стоит обратить внимание, – поведение величины средней мощности сигнала при включённой и выключенной модуляции. Как известно, при АМ мгновенная мощность сигнала колеблется около установленного среднего значения с заданным отклонением. При глубине модуляции около 100% мгновенная мощность при максимуме превосходит среднюю на 6 дБ, а при минимуме равна нулю. Это значит, что выходной усилитель должен обеспечивать запас по мощности. В таком случае в зависимости от конкретных требований можно выбирать из двух вариантов:

- применение достаточно мощного усилителя с повышенным энергопотреблением и нереализуемым потенциалом по мощности;
- применение менее мощного усилителя, который обеспечит номинальный максимум выходной мощности и введение смещения по мощности при включении АМ.

Если для АМ и ИМ существуют сверхширокополосные плавные аттенуаторы, то с реализацией угловой модуляции дело обстоит сложнее.

Использование канала управления ГУН существенно усложняет его реа-

лизацию и ухудшает шумовые характеристики ГУН. Применение фазового модулятора ограничивает девиацию частоты при ЧМ и требует продуманного подхода к его размещению в синтезаторе. На выходе синтезатора установка фазовращателя неприменима из-за его узкополосности, поэтому точку размещения этого компонента приходится переносить в такое место схемы, где происходит небольшая перестройка частоты сигнала.

Естественно, полоса модуляции будет ограничена основной петлёй ФАПЧ. До недавнего времени можно было успешно применять монолитные фазовращатели фирмы Hittite Microwave [12], но, к сожалению, они снимаются с производства и дальнейшая судьба этих микросхем неизвестна. В качестве замены могут подойти крупногабаритные плавные фазовращатели на дискретных элементах фирмы Mini Circuits [13]. Такой компонент удобнее всего разместить на выходе опорного синтезатора.

Максимальная девиация частоты при угловой модуляции будет пропорциональна выходной частоте из-за масштабирующих свойств основной петли ФАПЧ с выходным делителем частоты.

Реализация внутреннего источника модуляции была бы затруднена или невозможна, если бы не некоторые микросхемы генераторов сигналов произвольной формы. Не без некоторых ухищрений, функционал этих микросхем можно расширить возмож-

ностью генерирования пилообразных и импульсных сигналов с расширенным диапазоном частот.

Выходной усилитель должен обеспечивать заданную максимальную выходную мощность, причём с некоторым запасом, компенсирующим потери в выходном ФНЧ, а также осуществлять соответствующее усиление сигнала синтезатора при минимальном ослаблении тракта управления мощностью и модуляции. С этим справятся два широкополосных усилителя общего применения (по возможности, с минимальными неравномерностью АЧХ в диапазоне рабочих частот и энергопотреблением) любого известного производителя.

Для подавления высших гармоник доступен широкий набор фильтров в дискретном и монолитном исполнении, например, фирм Mini Circuits, Johanson Technology. Переключение ФНЧ удобно осуществлять многопозиционными переключателями для портативных связных устройств, которые в широком ассортименте представлены у фирм Infineon Technologies, Skyworks и других. Такие устройства обладают малыми потерями во включённом состоянии (около 1 дБ), способны пропускать достаточно высокую мощность и имеют высокую развязку выключенных портов. Таким образом, суммарное потребление выходного канала составляет 460...500 мВт а в сумме система будет потреблять уже 1,79...1,83 Вт.

## ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ

Уровень развития современных микроконтроллеров заслуживает восхищения. Многие из них сочетают в себе высокую производительность, поддержку множества интерфейсов, большой набор аппаратных средств, малое энергопотребление и габариты. Используя один микроконтроллер семейства ARM Cortex любого производителя, вполне реально сделать систему управления прибором от шины USB с поддержкой стандартной системы команд типа SCPI, внутреннего программирования микросхем по последовательным интерфейсам типа SPI и встроенной дополнительной периферией типа индикаторов, накопителей и тому подобного. В данном случае минимальный набор требований к микроконтроллеру будет заключаться в поддержке USB 2.0, аппаратных SPI (больше одного), интерфейса работы с флэш-накопителями типа MicroSD и, естественно, минимальным энергопотреблением. Выбор остаётся обширным, но в среднем можно принять, что потребление системы управления будет составлять порядка 150 мВт. Итоговое потребление прибора составит 1,94...1,98 Вт.

## ПИТАНИЕ

В отличие от настольных приборов с «неограниченным» ресурсом питания от сети переменного тока, для портативных устройств задача проработки системы питания становится особенно актуальной. Несмотря на тщательно подобранные компоненты и продуманную структуру, прибор все же остаётся довольно энергоёмкой нагрузкой для шины USB 2.0. Большинство упомянутых микросхем адаптированы для низковольтного питания (2,7...3,3 В). С одной стороны, это положительный момент,

позволяющий подавать на них относительно чистое питание с помощью линейного стабилизатора (так как качество питающего напряжения шины USB не гарантировано). С другой стороны, необходимо делать качественное преобразование напряжения 5 В в напряжение 3,3...3,6 В, а также генерировать отрицательное напряжение для питания ОУ и драйверов плавных аттенуаторов.

Естественное решение в данном случае – применение импульсных преобразователей постоянного тока. Главный критерий при их выборе – КПД, составляющий в лучшем случае около 90%. По возможности, преобразователь должен иметь минимальное количество дополнительных элементов. Поэтому хотелось бы особо отметить преобразователи фирмы Murata Mfg. Выходное фиксированное напряжение, высокая нагрузочная способность, высокая частота переключения и полное отсутствие дополнительных компонентов делают их весьма привлекательными для разработчиков. Формирование отрицательного напряжения реализуется немного сложнее, в силу отсутствия подобных стабилизаторов в серии Murata. Существует достаточное количество микросхем, требующих внешних элементов. Так как потери мощности при преобразовании составят примерно 10%, доступная мощность для прибора составит около 2,25 Вт.

Очевидно, что рассмотренные методы позволяют «уместить» указанный в начале статьи функционал универсального СВЧ-генератора в скромный энергоресурс шины USB 2.0.

Примерная структурная схема разработанного компактного прибора показана на рисунке 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своё воплощение описанные выше идеи нашли в реальном генераторе



Рис. 10. Внешний вид СВЧ USB-генератора PLG06

PLG06, внешний вид которого показан на рисунке 10 [14].

Как показал сравнительный анализ технических характеристик ближайших аналогов этого генератора, прибор во многом оказался уникальным. Обзор некоторых портативных изделий производства Holzworth, Mini Circuits и Signal Hound демонстрирует, что при сравнимых характеристиках они существенно проигрывают устройству PLG06 по компактности. В таблице 1 приведены характеристики некоторых сравниваемых СВЧ-приборов.

Очевидно, что даже бюджетные настольные СВЧ-приборы известных фирм намного дороже рассматриваемого компактного прибора, обладающего аналогичными функциями и электрическими характеристиками. Таким образом, была достигнута цель разработки PLG06 – создание альтернативы полноразмерным генераторам. В таблице 2 приведены сводные характеристики некоторых настольных приборов в сравнении с характеристиками PLG06.

Существующая на сегодняшний день компонентная база и технические решения, представленные в данной статье, дают возможность расширения диапазона рабочих частот компактных универсальных СВЧ-генераторов, по

Таблица 1. Сравнение характеристик портативных СВЧ-генераторов, включая PLG06

Характеристика	Прибор	PLG06	SSG-6400HS Mini Circuits [15]	HSM6001A Holzworth [16]	LSG-602 Vaunix [17]
Диапазон мощностей (дБм), шаг (дБ)		-40...10, 1	-75...14, 0,01	-70...10, 0,01	-45...10, 0,5
Диапазон частот (МГц), шаг		25...6000, 1 Гц	0,25...6400, 0,01 Гц	0,25...6400, 0,001 Гц	1500...6000, 100 кГц
Уровень ФШ на 10 кГц от несущей 1 ГГц (дБн/Гц)		-122	-133	-135	-75
Уровень помех дискретного спектра (дБн)		-70	-40	-50	-70
Модуляции		AM, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.	AM, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.	AM, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.	-
Параметры ИМ:					
подавление в паузе (дБ)		56	70	70	-
длительность фронтов (нс)		8...9	100	100	-
Минимальное время перестройки (мкс)		50	100	100	-
Потребляемая мощность (Вт)		2,5	29	9	2
Габариты (мм)		125 × 65 × 25	280 × 216 × 38	152,4 × 96,5 × 23	124 × 80 × 40
Масса (кг)		0,25	2,70	3,50	0,45

Таблица 2. Сравнение характеристик полноразмерных СВЧ-генераторов и PLG06

Характеристика	Прибор	PLG06	N5181A Keysight [18]	SMC100A R&S [19]
Диапазон мощностей (дБм), шаг (дБ)		-40...10, 1	-110...23, 0,01	-120...19, 0,01
Диапазон частот (МГц), шаг (Гц)		25...6000, 1	0,1...6000, 0,01	0,009...3200, 0,001
Уровень ФШ на 10 кГц от несущей 1 ГГц (дБн/Гц)		-122	-121	-110
Уровень помех дискретного спектра (дБн)		-70	-47	-54
Модуляции		ФМ, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.	ФМ, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.	ФМ, ЧМ, ФМ, ИМ внеш./внутр.
Параметры ИМ: подавление в паузе (дБ) длительность фронтов (нс)		56 8...9	80 <10	80 <100
Минимальное время перестройки		50 мкс	400 мкс	<3 мс
Габариты (мм)		125 × 65 × 25	432 × 426 × 88	368 × 236 × 112
Масса (кг)		0,25	12,50	3,50

крайней мере, до 20 ГГц. Правда, для этого потребуется глубокая переработка рассмотренной структурной схемы с возможным переходом на более мощную шину USB 3.0 исключительно ради получения дополнительного энергоресурса. Первые наработки в этом направлении уже появились, поэтому появление новых уникальных приборов не за горами.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ADF4106. PLL Frequency Synthesizer. Datasheet. www.analog.com.
2. ADF4159. Direct Modulation/Fast Waveform Generating, 13 GHz, Fractional-N Frequency Synthesizer. Datasheet. www.analog.com.
3. Горевой А.В. Выбор генераторов для построения малошумящих СВЧ-синтезаторов. Компоненты и технологии. 2012. №6.
4. HMC704LP4E. 8 GHz Fractional-N PLL. Datasheet. www.hittite.com.
5. Chenakin A. Frequency Synthesizer: From Concept to Product. Artech House. 2011.
6. Горевой А.В. Получение субгерцового разрешения в синтезаторах частот при высокой степени спектральной чистоты и малом энергопотреблении. 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. 2014.
7. Горевой А.В. Синтезатор частот. Патент №2523188.
8. Горевой А.В. Архитектура широкополосных синтезаторов частот для панорамных сканирующих приборов СВЧ. Вестник метролога. 2013. №3.
9. ADF4153. Fractional-N Frequency Synthesizer. Datasheet. www.analog.com.
10. Андронов Е.В., Горевой А.В. Угловая модуляция в синтезаторах СВЧ с ФАПЧ. Доклады ТУСУР. 2009. Часть 1.
11. HMC928LP5E. 450 Analog Phase Shifter, 2-4 GHz. Datasheet. www.hittite.com.
12. SPHSA-152+. Surface Mount Phase Shifter. 360° Voltage Variable. Datasheet. www.minicircuits.com.
13. Синтезатор частот. Патент на промышленный образец №94988.
14. SSG-6400HS. Synthesized Signal Generator. Datasheet. www.minicircuits.com.
15. HSM Series RF Synthesizer Modules Ultra Low Phase Noise. Datasheet. www.holzworth.com.
16. www.vaunix.com.
17. N5181A MXG RF Analog Signal Generator, 10 kHz to 6 GHz. Datasheet. www.keysight.com.
18. SMC100A signal generator. Datasheet. www.rohde-schwarz.com.



**Новости мира News of the World Новости мира**

