

Keysight Technologies

Генерация сигналов со сложными схемами модуляции с помощью недорогих генераторов сигналов произвольной формы

Информационный бюллетень

Аннотация

Цель этого информационного бюллетеня - показать, как генераторы сигналов с архитектурой Trueform серии 33500B компании Keysight можно применить для генерации сложных модулированных сигналов. Генераторы сигналов с архитектурой Trueform серии 33500B компании Keysight - это недорогое техническое решение для генерации многих современных сложных модулирующих сигналов IQ цифровой связи. Этот информационный бюллетень показывает, как генераторы сигналов с архитектурой Trueform серии 33500B компании Keysight реализуют современные сложные протоколы цифровой беспроводной связи, которые соответствуют стандартам W-CDMA, DVB и OFDM.

Введение

Сигналы с цифровой модуляцией заполняют пространство и передаются почти по каждой проводной и оптической сети. В настоящее время практически все беспроводные сервисы используют множество сложных схем модуляции сигнала несущей. Непрерывное совершенствование методов модуляции и компонентов, а также достижения в разработке кодов с коррекцией ошибок увеличили пропускную способность каналов связи и приблизили её к фундаментальному пределу, установленному теоремой Шеннона-Хартли.

Пропускная способность и эффективность были ещё в большей степени улучшены в результате разработки новых стратегий передачи данных, таких как технология MIMO (множественный вход, множественный выход), которая использует несколько антенн для передачи данных и несколько антенн для приёма, и реализации чрезвычайно гибких схем множественного доступа во временной, частотной и кодовой областях. Кроме того, всё больше и больше продуктов и сервисов для обеспечения надлежащего функционирования полагаются на возможности одной или нескольких беспроводных технологий по мере снижения их стоимости.

Высокий уровень сложности и функциональной совместимости стал возможным только в результате обширного тестирования на всех фазах жизненного цикла продукта или сервиса: от исследования основ базовой технологии до производства устройства или эксплуатации сети. Гибкость контрольно-измерительного оборудования является очень важным свойством для успешного удовлетворения потребностей такого тестирования. Полная стоимость контрольно-измерительного оборудования также важна, поскольку руководители должны убедиться в том, что это оборудование будет доступно для всех инженеров в течение всего времени реализации проекта.

Традиционно контрольно-измерительное оборудование для беспроводных приложений разрабатывалось специально для решения конкретной задачи. Внедрение новых технологий модуляции и полос частот сигналов часто происходит одновременно, что приводит к необходимости заказа нового оборудования или дорогостоящего обновления старого. При анализе сигналов основным инструментом, доступным для разработчиков систем беспроводной связи, является векторный анализатор сигналов, прибор, способный измерять спектр сигнала и его эволюцию с течением времени, а также обеспечивать полную информацию об амплитуде и фазе. При генерации сигналов стимулов предпочтительным инструментом является векторный генератор сигналов, который способен генерировать один или несколько сигналов несущих и непрерывно контролировать в реальном времени значения их амплитуд и фаз. Хотя некоторые тесты должны проводиться только на частоте, в точности равной частоте сигнала ВЧ-несущей, многие другие тесты должны проводиться на более низких частотах (ПЧ, или промежуточной частоте), либо даже в полосе модулирующих частот.

Генераторы сигналов произвольной формы в течение длительного времени использовались в качестве источников модулирующих сигналов для аналоговых квадратурных модуляторов в большинстве векторных генераторов сигналов. Иногда эти генераторы модулирующих сигналов встраиваются внутри векторных генераторов ВЧ-сигналов, в то время как другие технические решения базируются на использовании внешних генераторов сигналов произвольной формы. Чтобы генераторы ВЧ-сигналов можно было использовать для множества тестов и операторов связи, они должны иметь достаточно широкий диапазон частот, а также минимальный уровень рабочих характеристик, относящихся к модуляции и спектральному составу. В результате возникают ограничения, касающиеся полосы частот модуляции и стоимости. Хотя современные генераторы по-прежнему поддерживают эту архитектуру, новые генераторы сигналов произвольной формы с высокими характеристиками могут легко реализовывать модулирующие, ПЧ- и даже ВЧ-сигналы при гораздо меньших затратах. Поэтому они могут широко использоваться разработчиками, поскольку имеют возможность генерировать и другие аналоговые и цифровые сигналы, что недоступно для обычных генераторов ВЧ-сигналов. Недорогие генераторы сигналов произвольной формы обычно построены на удобной и гибкой архитектуре прямого цифрового синтеза (DDS). К сожалению, некоторые фундаментальные ограничения технологии DDS делают генераторы сигналов произвольной формы, построенные на её основе, почти бесполезными для генерации высококачественных (или хотя бы пригодных) ПЧ-/ВЧ-сигналов или широкополосных модулирующих сигналов. Компания Keysight, используя свою новую технологию Trueform, значительно изменила рынок недорогих средств генерации сигналов беспроводной связи. Основная цель этого информационного бюллетеня - показать, как генераторы сигналов с архитектурой Trueform серии 33500B компании Keysight можно использовать для генерации сложных модулированных сигналов.

Основы цифровой модуляции

На рисунке 1 показана структурная схема системы цифровой беспроводной связи. Сигнал несущей модулируется одновременно по амплитуде и фазе. Квадратурный модулятор реализует оба вида модуляции, применяя два модулирующих сигнала к двум ортогональным несущим (сдвинутым по фазе на 90° относительно друг друга). Каждый модулирующий сигнал можно представить в виде действительной и мнимой части сложного сигнала. Действительная часть называется сигналом I (синфазным), а мнимая часть - сигналом Q (квадратурным).

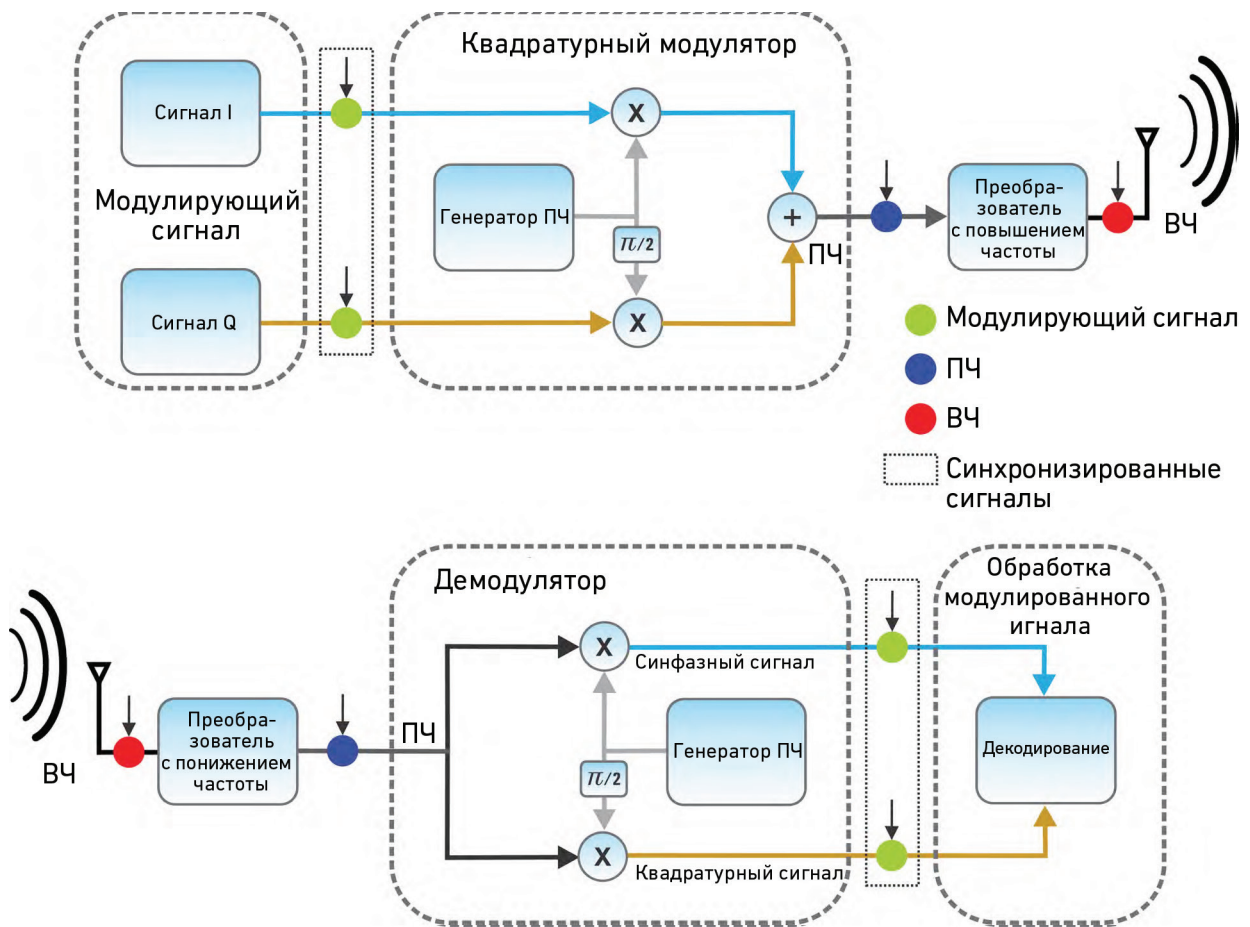


Рисунок 1. Упрощенная структурная схема системы цифровой беспроводной связи. Большинство современных схем модуляции основаны на квадратурной модуляции, когда две ортогональные несущие переносят части цифрового сообщения. На этом рисунке также показано, где можно применять генераторы сигналов в процессе тестирования передатчика и приёмника.

Многие схемы модуляции основаны на назначении различных состояний модуляции конечному множеству символов, обычно собранных из некоторого количества бит, в процессе, известном как преобразование символов. В результате N бит требуют 2^N различных состояний модуляции. Удобным способом графического отображения местоположений состояний модуляции является прямоугольная (декартова) система координат (I - Q), которая непосредственно отображает амплитуду и фазу для каждого символа (см. рисунок 2). Такое представление известно как диаграмма сигнального созвездия. Эта диаграмма также полезна для анализа, поскольку даёт непосредственную визуальную информацию для понимания причин любых аномалий или искажений, накладываемых на сигнал в процессе модуляции и передачи.

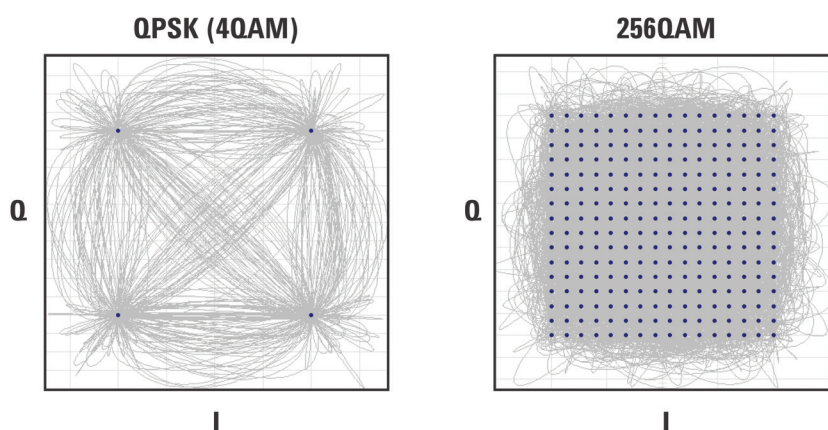


Рисунок 2. Диаграммы состояний/сигнальных созвездий - удобный способ представления схем модуляции. По существу это представление в прямоугольной (декартовой) системе координат (I - Q), которое непосредственно преобразуется в представление состояния модуляции несущей в полярной системе координат (амплитуда - фаза). На данном рисунке показаны созвездия (синие точки) схем модуляции QPSK и 256QAM. Хотя QPSK переносит только два бита на символ, а 256QAM - восемь бит на символ, большее расстояние между местоположениями различных символов (точками созвездия) делает QPSK более устойчивой к шумам или компонентам с более низкой точностью.

Чем сложнее сигнальное созвездие, тем больше бит на символ будет передаваться. Однако модуляция более высокого порядка требует использования более сложных и точных систем передачи и приёма, которые будут более чувствительными к шумам и другим искажениям, поскольку расстояние между местоположениями символов (точками созвездия) будет меньше при том же самом уровне мощности. Схема модуляции QPSK (два бита на символ) будет более устойчивой к шумам, чем 256QAM (восемь бит на символ). С другой стороны, сигнал 256QAM будет передавать в четыре раза больше информации, чем сигнал QPSK при той же самой символьной скорости (измеряемой в бодах или символах/с). На выбор конкретной схемы модуляции влияют и многие другие критерии. Соображения энергоэффективности и стоимости, например, будут влиять на выбор GMSK в качестве схемы модуляции для GSM, учитывая то, что постоянная модуляция уровня мощности позволит использовать очень эффективные, нелинейные и недорогие усилители мощности в абонентском оборудовании (оборудовании пользователя или мобильных телефонах).

Спектр – дефицитный ресурс, который должен использоваться эффективно, поскольку его делят между собой множество пользователей и сервисов. Это утверждение справедливо для беспроводных приложений (таких как кабельное телевидение), оптических приложений (таких как DWDM) и особенно для приложений беспроводной связи. Учитывая, что любой сигнал должен занимать ограниченную полосочастот (канал), символьная скорость должна быть ограничена, а сигнал должен пропускаться через полосовой фильтр, чтобы гарантировать, что он не будет помехой для соседних или удалённых каналов. Фильтрация может быть реализована непосредственно на ВЧ-частотах, но чаще применяется к модулирующим сигналам перед квадратурной модуляцией. Этот процесс, известный как формирование импульсов, заключается в применении подходящего фильтра нижних частот к обоим компонентам I и Q.

Фильтры с характеристикой типа “приподнятый косинус” (известные также как фильтры Найквиста) являются, вероятно самым популярным типом фильтров для схем модуляции QPSK/QAM, поскольку они создают сигналы, ограниченные по полосе и без межсимвольной интерференции. В большинстве систем связи итоговая характеристика типа “приподнятый косинус” получается посредством разделения фильтрации поровну между передатчиком и приёмником, что приводит в результате к фильтру с характеристикой типа “корень из приподнятого косинуса”. В схемах модуляции FSK, когда амплитуда является постоянной, а передаваемые данные контролируют частоту несущей, для модулирующих сигналов (но не для ВЧ-сигналов) обычно применяют фильтры Гаусса. Фильтры с характеристикой типа “приподнятый косинус” полностью определяются двумя параметрами: символьной скоростью и коэффициентом сглаживания (известным как альфа, α). Фильтры Гаусса определяются символьной скоростью и произведением параметров BT (где B – полоса фильтра; T – длительность символа). Параметры альфа (α) и BT влияют на форму спада АЧХ, воздействуя таким образом на параметр занимаемой полосы частот среди других характеристик сигнала.

Модулированные сигналы подвергаются различным линейным и нелинейным искажениям. Недостаточная точность передатчика может приводить к квадратурной ошибке (фаза между ортогональными несущими), дисбалансу (неравенство амплитуд компонентов I и Q) и просачиванию несущей (смещение постоянной составляющей, приводящее к остаточной несущей). Нелинейные ошибки, такие как искажения, связанные с преобразованием амплитудной модуляции на входе в амплитудную модуляцию на выходе (AM-AM) и амплитудной модуляции на входе в фазовую модуляцию на выходе (AM-PM), происходящие вследствие насыщения (и даже ограничения сигналов) в ВЧ-усилителях мощности передатчиков. Нелинейные искажения особенно опасны, поскольку вызывают увеличение спектральных составляющих. Современные передатчики используют методы предварительной коррекции для компенсации таких искажений.

Тракт передачи также может быть источником ошибок и искажений. Эти ошибки могут проявляться в виде помех, замираний и искажений, обусловленных многолучевым распространением, поскольку сигналы обычно поступают на приёмник от различных источников с разными амплитудами и задержками. Ещё хуже то, что искажения, вносимые трактом передачи, изменяются со временем. Поэтому они должны быть скомпенсированы в приёмнике посредством использования методов адаптивной коррекции. Влияние искажений, обусловленных многолучевым распространением, значительно возрастает с увеличением символьной скорости, поскольку задержанные копии сигнала будут помехой для более поздних символов в этом же самом сигнале. Для совершенной компенсации искажений, обусловленных многолучевым распространением, и даже извлечения пользы от них были специально разработаны некоторые методы модуляции.

Схема модуляции OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) использует 10, 100 или даже 1000 близко расположенных несущих для переноса сообщения после разделения данных между всеми несущими. В результате длительность символа уменьшается в той же самой пропорции. Разнос несущих выбирается так, чтобы он был равным обратной величине символьной скорости для того, чтобы несущие не являлись помехой друг для друга (то есть, они должны быть ортогональными). Некоторые дополнительные компоненты в сигнале OFDM предназначены для того, чтобы упростить оценку канала, по которому передаётся сигнал, и синхронизацию приёмника, а некоторое увеличение времени цикла добавлено для исключения влияния предшествующих символов. Эти преимущества сделали OFDM предпочтительной схемой модуляции для большинства современных беспроводных и проводных систем связи, таких как наземное ТВ-вещание, WiFi, UWB, LTE, WiMAX™ и так далее. Однако сигналы OFDM имеют некоторые недостатки, такие как повышенная сложность и возросшие требования к точности (по отношению к фазовому шуму), требуемые для управления ими, а высокое отношение максимальной мощности к средней делает их чувствительными к нелинейности характеристик передатчика.

Схема модуляции OFDM в сочетании с технологией MIMO и формированием диаграммы направленности являются основой для технологий мобильной связи четвёртого поколения (4G). Технология MIMO может увеличить пропускную способность, используя пространственное разнесение, достигаемое за счёт использования нескольких передающих и приёмных антенн, позволяя таким образом передавать несколько сигналов в одной и той же полосе частот. Формирование диаграммы направленности увеличивает пропускную способность посредством направления сигнала непосредственно на приёмник, используя фазированную антенную решётку, так что одна и та же частота может повторно использоваться для других пользователей, расположенных по другому азимутальному углу.

Генерация ВЧ-сигналов с использованием генераторов сигналов произвольной формы

Рисунок 3. Генераторы сигналов произвольной формы могут генерировать модулированные ВЧ-сигналы, используя один из двух основных методов. Двухканальные приборы могут генерировать модулирующие сигналы I и Q, которые можно подать на внешний квадратурный генератор. Одноканальные приборы с достаточно высокой частотой дискретизации могут непосредственно генерировать модулированный сигнал несущей на ПЧ- или даже на ВЧ-частотах.

Примечание: все сигналы, приведённые в этом информационном бюллетене, были сгенерированы с использованием генератора сигналов 33522В компании Keysight, за исключением сигнала, сгенерированного с использованием технологии прямого цифрового синтеза (DDS), который показан на рисунках 4 и 5. Сигналы на этих рисунках были созданы с использованием пакета прикладных программ для генерации сигналов произвольной формы.

Сгенерированные сигналы были аттестованы и проанализированы с использованием векторного анализатора сигналов CXA и осциллографа смешанных сигналов MSO7014В компании Keysight.

Быстрое развитие и растущая сложность схем модуляции и систем кодирования делает тестирование систем беспроводной связи серьёзной проблемой. Генераторы должны быть способны формировать сигналы множества стандартов, иногда даже одновременно, имитируя при этом сложные линейные и нелинейные искажения с тем, чтобы можно было надлежащим образом протестировать конструкцию и компоненты приёмника. Генераторы сигналов произвольной формы были основой большинства векторных генераторов сигналов, используемых для имитации ВЧ-сигналов сигналов беспроводной связи. Двухканальные внешние или внутренние генераторы сигналов произвольной формы обычно являются источниками прецизионных модулирующих сигналов I/Q, которые поступают на квадратурный модулятор (см. рисунок 3).



Эта рабочая схема позволяет полностью контролировать как амплитуду, так и фазу несущей, так что любая схема аналоговой или цифровой модуляции, с искажениями или без них, является осуществимой в пределах ограничений полосы пропускания системы. Генераторы сигналов произвольной формы являются идеальными приборами, поскольку никакого специального оборудования для реализации заданной схемы модуляции или стандарта модуляции не требуется, и добавление новых схем и стандартов модуляции зависит только от наличия соответствующего внешнего программного обеспечения. Поскольку характеристики частоты дискретизации и динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих (SFDR), генераторов сигналов произвольной формы со временем значительно улучшаются, непосредственная генерация нескольких, отличающихся друг от друга, модулированных ПЧ-ВЧ-несущих является в настоящее время практически реализуемой (см. рисунок 3).

Генераторы сигналов произвольной формы, по отдельности или в сочетании с квадратурным модулятором или преобразователем с повышением частоты, можно применять в качестве источников сигналов для множества различных точек тестирования внутри передатчика или приёмника ВЧ-сигналов (см. цветные пунктирные линии на рисунке 1). В общем случае генерация модулирующих сигналов требует наличия двух синхронизированных каналов, а генерация ПЧ-ВЧ-сигналов - только одного канала. Больше каналов потребуется в том случае, если предполагается имитация MIMO-систем или сценариев формирования луча. Модулирующие сигналы могут быть без труда сгенерированы недорогими генераторами сигналов произвольной формы, поскольку требования к ширине полосы частот этих сигналов являются умеренными для большинства стандартов модуляции и не превышают нескольких мегагерц. Однако любые отличия между этими двумя каналами, которые реализуют два модулирующих сигнала (I и Q), по амплитуде, амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или задержке приведёт к заметному ухудшению качества модуляции, поскольку в этом случае эти отличия будут создавать квадратурную ошибку и дисбаланс.

Крайне желательны равномерная АЧХ и хорошее соответствие характеристик между каналами. Генераторы сигналов произвольной формы могут добавлять некоторые собственные проблемы, поскольку типовая АЧХ обычно оптимизируется для получения требуемой импульсной характеристики во временной области и подавления зеркального канала. Фактически зеркальные составляющие могут генерировать паразитные внеполосные сигналы, которые, возможно, будут представлять собой помеху для соседних каналов после модуляции. Большинство недорогих генераторов сигналов произвольной формы базируются на гибкой и экономичной архитектуре DDS. Эта технология генерации в действительности вызывает джиттер. Хотя небольшой уровень джиттера может быть допустим для некоторых сигналов во временной области, его нелинейный характер будет являться причиной увеличения спектральных составляющих и внутриполосного шума (включая фазовый шум), что значительно влияет на качество модуляции.

Генерация большинства модулированных сигналов в точности на частоте ВЧ-сигнала несущей может оказаться невозможной для большинства недорогих генераторов сигналов произвольной формы. Однако большая часть приёмников и множество передатчиков не обрабатывает модулированный сигнал непосредственно на его конечной частоте; вместо этого используется сигнал намного меньшей промежуточной частоты (ПЧ). Типовые значения частот ПЧ находятся в диапазоне десятков мегагерц, поэтому они могут управляться большинством генераторов сигналов произвольной формы. Дисбаланс между компонентами модулирующего сигнала I и Q не является больше проблемой, поскольку эти компоненты существуют только в математической области. Тем не менее, неравномерность АЧХ всё ещё является проблемой, особенно для широкополосных видов модуляции. Влияние джиттера, сгенерированного архитектурой DDS, будет ещё более значительным, поскольку он влияет также и на сигнал несущей, что приводит к неприемлемым уровням искажений сигналов и увеличению спектральных составляющих.

Также важно рассмотреть такую техническую характеристику, как длина записи (объём доступной памяти сигналов). Чтобы тестируемый приёмник мог должным образом распознать многие модулированные сигналы, требуется обеспечить их присутствие в течение минимального временного окна (то есть, в течение полного кадра). Например, для распознавания сигнала DVB-T требуется минимум 68 символов OFDM (длина кадра TPS, который переносит информацию о модуляции) или приблизительно 70 мс. Для генераторов сигналов произвольной формы с частотой дискретизации 100 Мвыб/с это требование к длительности временного окна транслируется в минимальную длину записи, равную 7 Мвыб. Поскольку максимальная длина записи большинства недорогих генераторов сигналов произвольной формы на основе технологии DDS меньше 1 Мвыб, это не позволяет сгенерировать с их помощью большинство сложных модулированных сигналов.

Генераторы сигналов с архитектурой Trueform серии 33500B компании Keysight имеют отличные характеристики, доступные ранее только в генераторах сигналов высшего класса. Технология Trueform позволяет генератору сигналов произвольной формы генерировать высококачественные модулирующие сигналы и сигналы ПЧ по гораздо меньшей цене.

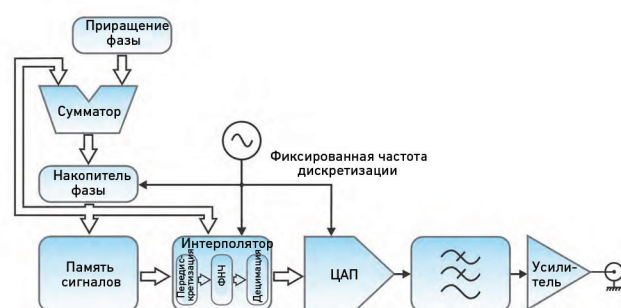
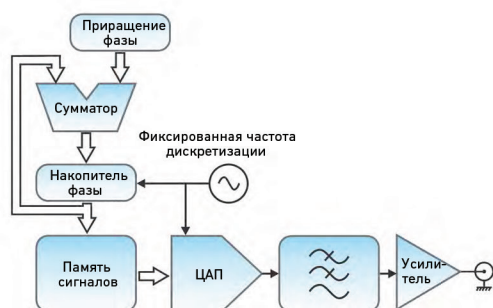
Архитектура Trueform компании Keysight

Новые генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight, построенные на основе архитектуры Trueform, предлагают гибкость и преимущества генераторов сигналов на основе технологии DDS без каких-либо присущих им недостатков (см. рисунки 4 и 5).

Недорогая технология DDS

Технология Trueform

Структурные схемы



Создание сигналов

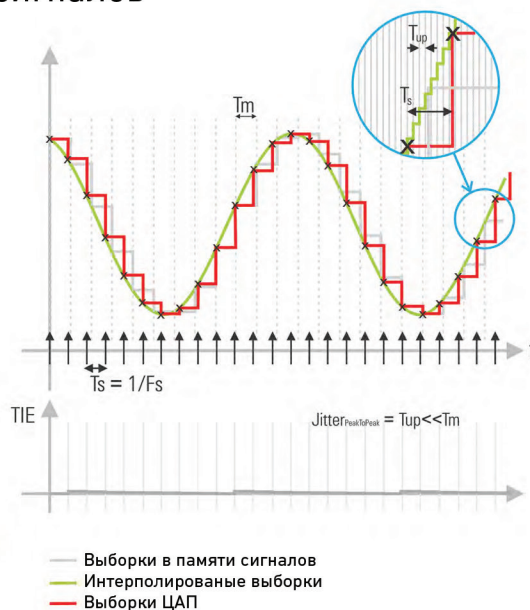
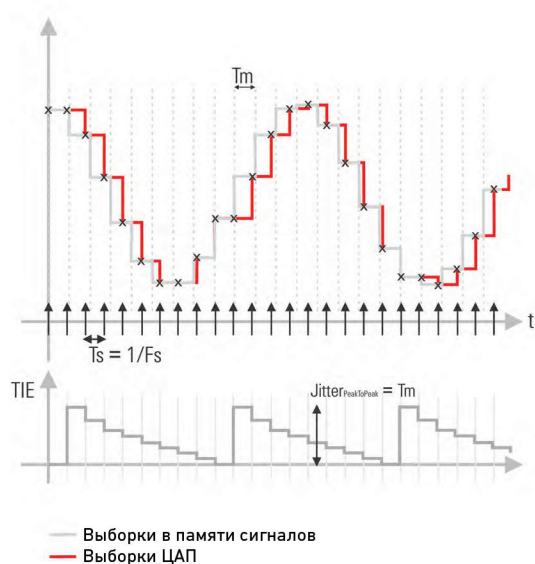
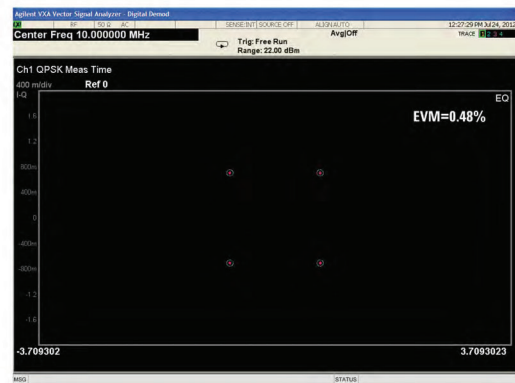


Рисунок 4. Сравнение технологий DDS и Trueform Keysight. Способ, с помощью которого традиционные архитектуры DDS (слева) к памяти сигналов, приводит к неприемлемому для генерации модулированных сигналов уровню джиттера. Новая архитектура Trueform компании Keysight (справа) устраняет джиттер, поскольку сигнал, запомненный в памяти, фильтруется, интерполируется и восстанавливается в реальном времени.

компании
обращаются
сигналов

Сигнальные созвездия



Спектры сигналов

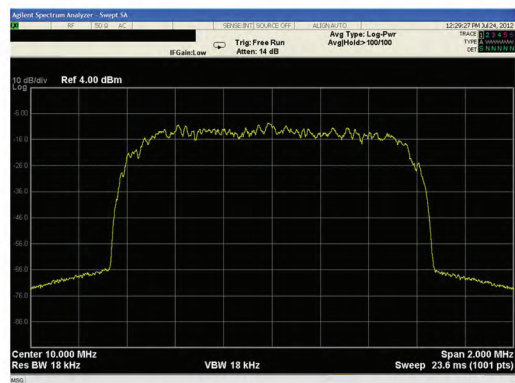
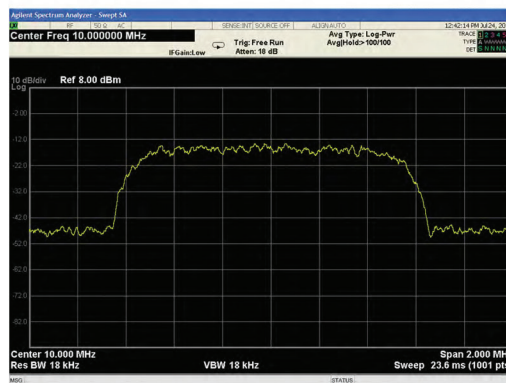


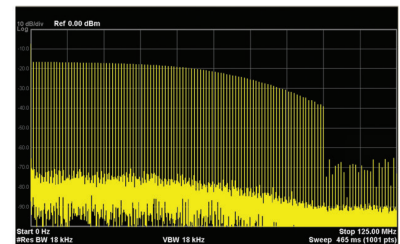
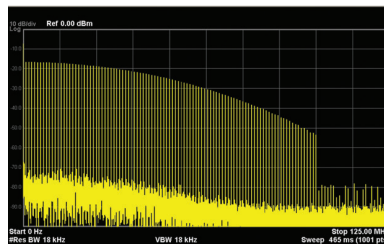
Рисунок 5. Сравнение диаграмм сигнальных созвездий и спектров, полученных с использованием технологии DDS и технологии Trueform компании Keysight. На этом рисунке один и тот же сигнал QPSK создаётся генераторами, которые используют архитектуры DDS либо Trueform. Различия достаточно существенны с точки зрения качества модуляции (EVM – модуль вектора ошибки) и качества спектра (следует отметить разницу 20 дБ в динамическом диапазоне). Эллиптическое распределение точек (красного цвета) в диаграмме сигнального созвездия, полученного для сигнала генератора с архитектурой DDS, показывает джиттер в виде фазового шума в модуляционной области; белый шум (гауссов шум) будет делать точки сигнального созвездия круглыми по форме, как видно на выходе генератора с архитектурой Trueform. Увеличение спектральных составляющих является результатом джиттера тактового сигнала дискретизации, создаваемого архитектурой DDS.

При использовании архитектуры Trueform улучшение характеристик достигается интерполяцией выборок, запомненных в памяти сигнала, в реальном времени. Эта операция проводится внутри блока цифровой обработки сигналов (ЦОС), включающего фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Таким образом, джиттер, связанный с привязкой выборок, запомненных в памяти сигналов, к конкретным моментам времени, может быть практически исключён без необходимости увеличения их исходного разрешения. Таким образом сохраняется глубина памяти сигналов и расширяется потенциальное временное окно воспроизведения сигнала. Частота среза и форма характеристики фильтра настраиваются так, чтобы спектральный состав результирующего сигнала можно было в точности воспроизвести цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) прибора. Наконец, отфильтрованный и представленный с повышенной частотой дискретизации сигнал будет прорежен, чтобы соответствовать фиксированной частоте дискретизации ЦАП. Эту конфигурацию можно рассматривать как систему повторной дискретизации, которая работает в реальном времени и будет всегда использовать все имеющиеся выборки в этом процессе, поскольку все выборки будут поступать в блок обработки. Детали сигнала, которые могут быть случайно пропущены или неправильно размещены в традиционных генераторах на базе технологии DDS, будут теперь отображаться надлежащим образом и с малой величиной джиттера. Эта архитектура обеспечивает намного более длительную эквивалентную длину записи благодаря реализации процесса интерполяции в реальном времени.

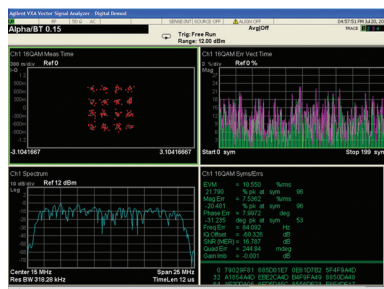
Цифровой фильтр нижних частот, работающий в реальном времени, можно также использовать для улучшения временной или частотной характеристики выхода. Например, в случае с генераторами сигналов серии 33500B компании Keysight сочетание высокой частоты дискретизации относительно полосы пропускания прибора (избыточная дискретизация) и хорошего аналогового интерполяционного фильтра на выходе приводит в результате к чистому сигналу без зеркальных составляющих. Цифровой фильтр предназначен для коррекции АЧХ цифро-аналогового преобразователя. Доступны два режима фильтрации: фильтр с крутым срезом для равномерной АЧХ (например, для генерации IQ-, многотональных или ПЧ-сигналов) или фильтр Бесселя для получения переходной характеристики с быстрым временем нарастания, но без каких-либо затухающих колебаний (например, для генерации импульсов или кодовых комбинаций). Равномерная АЧХ лучше всего подходит для генерации модулированных сигналов, поскольку равномерность АЧХ очень важна для получения хорошей точности модуляции (см. рисунок 6).

Рисунок 6. Архитектура Trueform может оптимизировать АЧХ генератора сигналов для получения равномерной АЧХ или идеальной переходной характеристики. У обычных генераторов сигналов произвольной формы АЧХ обычно оптимизирована для получения наилучшей переходной характеристики. На этом рисунке сигнал, включающий 100 тонов и перекрывающий диапазон от 1 до 100 МГц, был использован для оценки АЧХ в обоих режимах фильтрации (вверху). Генерация сигнала 16QAM с символьной скоростью 20 Мбод и анализ его качества в двух режимах показывает важность равномерной АЧХ для обеспечения высокого качества генерации сигнала с широкополосной модуляцией (внизу). При использовании частоты дискретизации 250 МГц и технологии генерации сигналов архитектуры Trueform применяемая цифровая полоса пропускания намного больше, чем при использовании других форм генерации. Эта полоса может быть нормализована с целью достижения равномерной АЧХ в пределах до 100 МГц.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)



Точность модуляции



Затухающие колебания больше не являются проблемой для модулированных сигналов, будь это модулирующие или ПЧ-/ВЧ-сигналы, поскольку сигналы уже ограничены по полосе и, как следствие, они демонстрируют только некоторый уровень собственных затухающих колебаний. Равномерная АЧХ делает ненужной любую коррекцию сигнала в большинстве ситуаций; она также расширяет динамический диапазон и улучшает согласование характеристик каналов, что является важным свойством для генерации модулированных сигналов. Качество генерации сигналов с несколькими несущими также повышается, так как качество модуляции и/или уровни сигнала становятся более согласованными по всем каналам.

Архитектура Trueform чрезвычайно полезна для генерации сигналов в тех случаях, когда качество как в частотной, так и модуляционной области важно по ряду причин (см. таблицу 1):

- Повторная дискретизация в реальном времени удаляет джиттер из сигнала независимо от выбранной частоты дискретизации.
- Частота среза АЧХ фильтра нижних частот с конечной импульсной характеристикой (КИХ) предотвращает проявление любых эффектов наложения спектров в выходном сигнале.
- Равномерная АЧХ, полученная в результате коррекции с использованием цифровой обработки сигналов, обеспечивает высокое качество генерации модулированных сигналов (как модулирующих, так и ПЧ-/ВЧ-сигналов), не требуя предварительной коррекции сигналов и сложной калибровки АЧХ.
- Высокая степень избыточной дискретизации (частота дискретизации 250 Мвыб/с для ширины полосы пропускания 30 МГц), процесс повторной дискретизации в реальном времени для поддержания постоянной частоты дискретизации для ЦАП и высокое качество аналогового восстанавливающего фильтра нижних частот – всё это в результате позволяет получить сигналы без побочных и паразитных составляющих.
- Согласование характеристик и синхронизация работы двух каналов обеспечивается на высшем уровне, что позволяет генерировать модулирующие сигналы высокого качества. Превосходные характеристики тактового сигнала с фиксированной частотой дискретизации минимизируют уровень фазового шума в сигнале.

Таблица 1. Сравнение возможностей генерации модулированных сигналов архитектуры DDS и архитектуры Trueform компании Keysight

	Недорогие генераторы сигналов с архитектурой DDS	Генераторы сигналов с архитектурой Trueform	Комментарии
Характеристики фазового шума, обусловленного джиттером	Плохие	Превосходные	Джиттер фазы оказывает значительное влияние на характеристики точности модуляции и спектра. Модулированные сигналы, сгенерированные генераторами сигналов с архитектурой DDS, не достигают минимально допустимого уровня качества.
Возможность выбора режима фильтрации для коррекции АЧХ	Нет Только для наилучшей переходной характеристики	Да Наилучшая переходная характеристика/ равномерная АЧХ	Неравномерная АЧХ ухудшает характеристики качества модуляции, особенно для широкополосных сигналов. Генерация сигналов с хорошим качеством требует математической коррекции после точной калибровки генератора для получения равномерной АЧХ.
Длина записи	<1 Мвыб	16 Мвыб	Эмуляция полезной нагрузки, канальное кодирование и реализация схем разделения полосы частот на каналы требуют задания длинных последовательностей символов, и, как следствие, очень длинной длины записи для выполнения этого. Генерация OFDM и шумового сигнала также имеет результатом требование продолжительной длины записи.
Задание последовательностей	Нет	32 последовательности	Задание последовательностей необходимо для реализации протоколов или пакетов с низкой частотой повторения. Также помогает значительно повысить производительность автоматических испытаний.

В отличие от традиционных недорогих генераторов на базе технологии DDS, генераторы серии 33500B компании Keysight имеют почти такие же возможности управления, как генераторы “истинных сигналов произвольной формы”. Это позволяет пользователям не только устанавливать любую требуемую частоту дискретизации для цифро-аналоговых преобразователей, но и использовать преимущество архитектуры с избыточной дискретизацией, работающей в реальном времени (и соответствующий выходной сигнал, свободный от зеркальных составляющих), а также удобство возможности изменения частоты повторения сигнала, не останавливая его воспроизведение, что невозможно сделать при использовании архитектуры DDS. Подобно генераторам сигналов на базе технологии DDS, цифро-аналоговые преобразователи в генераторах на базе технологии Trueform всегда работают на фиксированной (максимальной) частоте. За счёт этого система тактовых сигналов дискретизации значительно упрощается, а джиттер и стоимость сводятся к минимуму. Джиттер тактового сигнала дискретизации непосредственно переносится на модулированные сигналы в виде фазового шума..

Примеры применений

Характеристики генераторов сигналов серии 33500B компании Keysight позволяют использовать их при решении множества задач генерации модулирующих и ВЧ-сигналов.

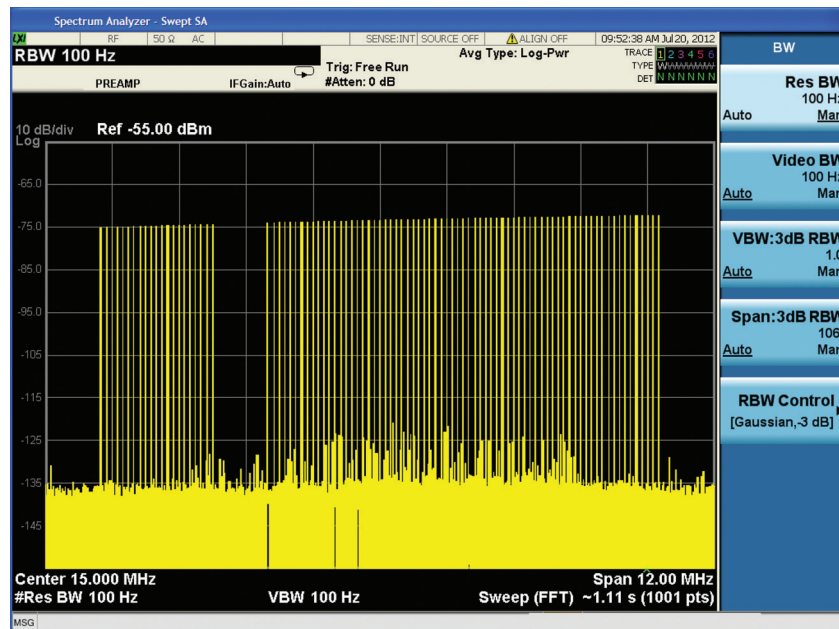
Генерация многотональных сигналов

Многотональные сигналы образованы из набора равноотстоящих по частоте немодулированных несущих. Эти сигналы полезны для определения как линейных (АЧХ), так и нелинейных (интермодуляционные искажения) характеристик любых устройств. Равномерность характеристики и динамический диапазон являются наиболее значимыми характеристиками многотональных сигналов. Фазовый шум, вносимый джиттером тактового сигнала дискретизации или традиционными архитектурами DDS может сделать сигнал бесполезным. Архитектура Trueform является идеальной для генерации этого вида сигналов. Для тестирования коэффициента мощности шума (NRP) используется многотональный сигнал, предназначенный для измерения внутриполосных интермодуляционных искажений, но изменённый посредством удаления некоторых несущих (см. рисунок 7).

Рисунок 7. Многотональные сигналы полезны для определения линейных и нелинейных характеристик систем. Эти сигналы состоят из набора равноотстоящих по частоте немодулированных несущих с одинаковыми уровнями. Фаза должна быть случайной для того, чтобы оптимизировать отношение максимальной мощности к средней (PAPR) и улучшить среднюю мощность.

Нелинейное поведение может быть установлено путём добавления полосы провала и поиска интермодуляционных составляющих в свободной полосе, как показано на рисунке. Генерация полосы провала, свободной от шумов, или обеспечение динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих (SFDR), > 55 дБ в полосе провала важны для нахождения различных интермодуляционных искажений.

Уровень интермодуляционных искажений, добавленный модулятором или усилителем, может быть определён путём измерения уровня нежелательных интермодуляционных составляющих в пределах полосы провала, которая будет отображаться по местонахождению удалённых несущих.



Высококачественный генератор модулированных сигналов общего назначения

Спутниковая связь, линии радиосвязи (см. рисунок 8), беспроводные телефоны, центральные станции кабельного телевидения, устаревшие сети WiFi, системы беспроводной связи малой мощности (например, Zigbee или радиочастотная идентификация - RFID) и многие другие устройства используют относительно простую схему модуляции с передачей на одной несущей. Генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight, обладающие превосходными характеристиками (равномерность, линейность и динамический диапазон), способны создавать модулированные сигналы с высоким качеством модуляции и отличными характеристиками в частотной области. Доступный диапазон частот позволяет генерировать сигналы с полосой модуляции до 60 МГц (33522B).

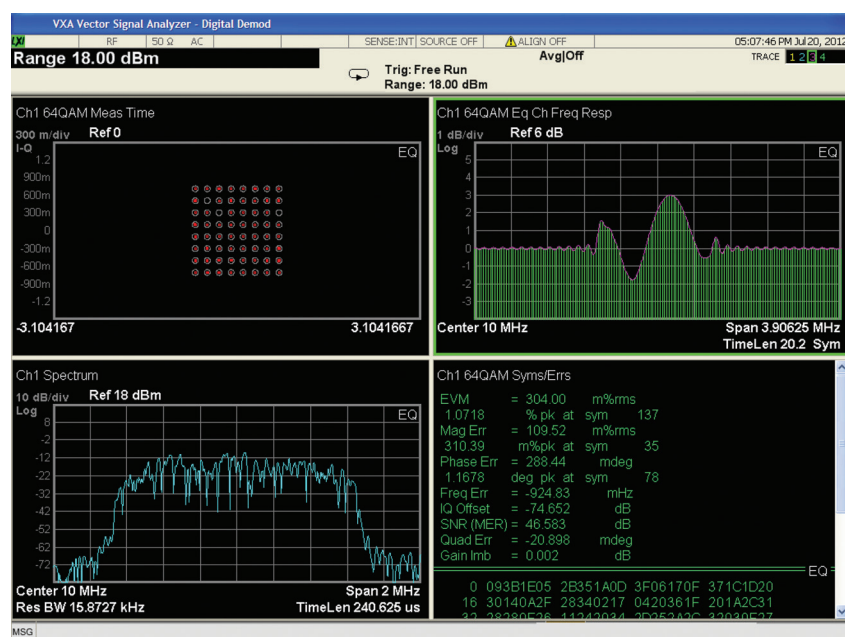
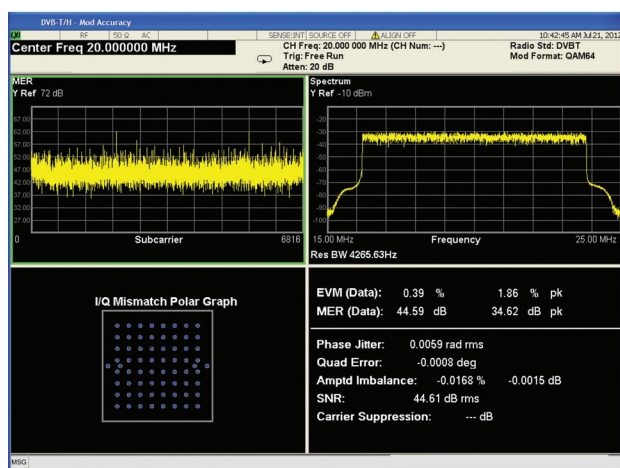


Рисунок 8. Качество модуляции и спектральный состав определяют характеристики любого модулированного генератора сигналов. Возможность имитации линейных и нелинейных искажений, вызванных аппаратурой передачи данных и трактом сигнала, также важна. На этом рисунке сигнал 64QAM, передаваемый по линии радиосвязи с искажениями, обусловленными многолучевым распространением, сгенерирован с использованием генератора сигналов 33522B компании Keysight. Адаптивный корректор анализатора SXA компании Keysight (справа сверху) отображает соответствующую АЧХ канала. Качество модуляции для скорректированного сигнала является превосходным (0,3%).

Генерация сигналов OFDM

К генерации высококачественных сигналов OFDM предъявляются особые требования, поскольку эти сигналы характеризуются высоким отношением максимальной мощности к средней и очень чувствительны к фазовому шуму и нелинейности характеристик передатчика. Кроме того, статистически полезные сигналы требуют генерации последовательностей, включающих как можно больше различных символов. Учитывая продолжительность каждого символа OFDM, для статистически обоснованных сигналов OFDM необходима намного большая длина записи, чем в случае схем модуляции с передачей на одной несущей. Генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight, обеспечивающие высокие уровни сигналов, разрешение ЦАП, равное 16 бит, и длину записи 16 Мвыб, являются идеальными приборами для генерации сигналов OFDM. Наземное ТВ-вещание (DVB-T/T2, ISDB-T, DTMB, DAB, DRM), WiFi (802.11a/g/n), WiMAX и LTE - это лишь некоторые из приложений, для которых можно использовать генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight (см. рисунок 9)..

Без искажений



Квадратурные искажения

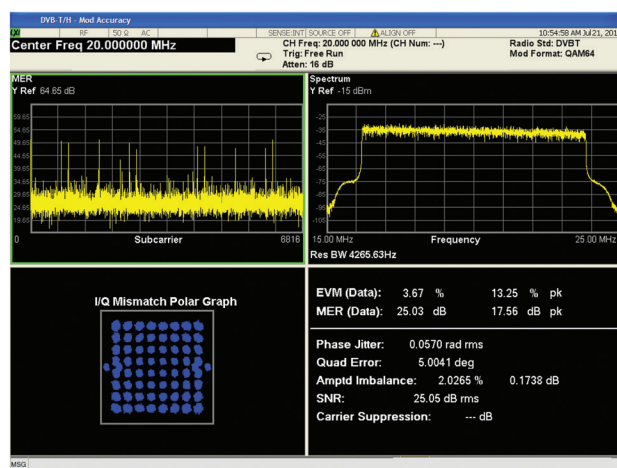


Рисунок 9. Генерация сигналов OFDM не только требует высоких характеристик генератора, но часто также и большой длительности записи. Этот сигнал DVB-T (режим 8K) требует несколько мегавыборок (Мвыб) для запоминания минимум 68 символов OFDM, необходимых для переноса информации кадра TPS. Эта информация требуется приёмникам для надлежащей демодуляции сигнала.

На этом рисунке идеальный сигнал (слева), сгенерированный генератором сигналов 33522B компании Keysight, характеризуется превосходным качеством модуляции (коэффициент ошибок модуляции MER > 45 дБ). На этом же рисунке (справа) к сигналу были математически добавлены квадратурная ошибка (5°) и дисбаланс (2%). Анализатор отображает значения искажений, сгенерированных с помощью точных генераторов сигналов произвольной формы. Заметим, что квадратурные ошибки отображаются внутри сигнального созвездия в виде квадратных точек, а не круглых пятен, как в случае аддитивного шума.

Поддержка канального кодирования и содержательных полезных нагрузок

Большинство стандартов беспроводной связи использует канальное кодирование (то есть, коды коррекции ошибок). Некоторые тесты требуют генерации надлежащим образом закодированных сигналов, а в некоторых случаях - передачи конкретных полезных нагрузок. Во многих случаях символы объединяются в кадры заданной длины и/или информация чередуется (то есть, порядок переданных данных изменяется). Например, типичный цифровой сигнал кабельного телевидения (DVB-C) может состоять из несущей с модуляцией QAM (от 16 до 256), но содержательный кадр требует послышки последовательности из 8 пакетов MPEG2 (188 байтов полезной нагрузки + 16 байтов избыточных данных для обеспечения коррекции ошибок с использованием кода Рида-Соломона). Те же соображения применимы и к системам мобильной связи (таким как UMTS, сигнал которой показан на рисунке 10) или беспроводным сетям связи (таким как Wi-Fi).

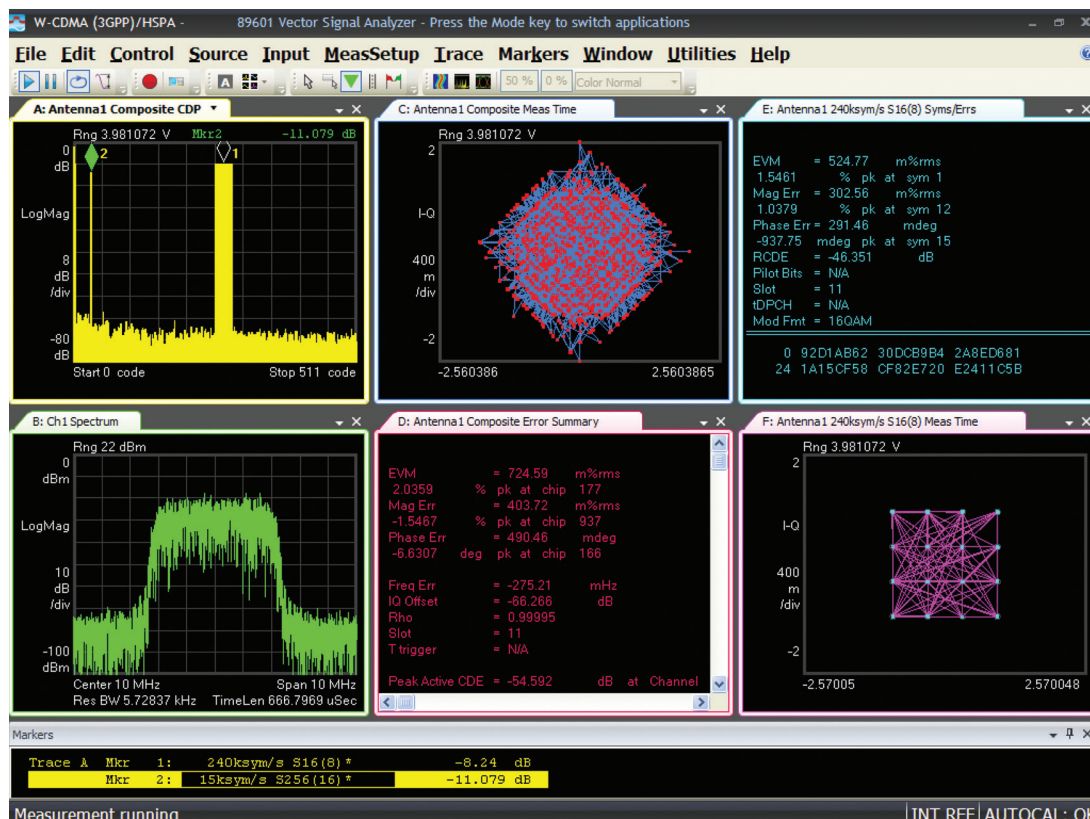


Рисунок 10. Сигнал ПЧ нисходящей линии связи стандарта 3GPP (UMTS) WCDMA, сгенерированный генератором сигналов 33522B компании Keysight. Это сложный сигнал, поскольку он переносит различные данные и каналы синхронизации.

Программное обеспечение 89601B компании Keysight, работающее в анализаторе сигналов СХА, отображает сигнал в нескольких областях: диаграмма мощности в кодовой области (слева сверху) - 4 канала (два канала расположены рядом с 0 Гц, которые являются фактически кодами синхронизации). Номер 2 - это первый сигнал, модулированный QPSK, который имитирует голос. Номер 1 - сигнал, модулированный 16QAM, который будет представлять передачу данных: отображение в модуляционной области (в центре сверху), отображение в частотной области (слева внизу) и канальное кодирование (справа внизу).

Здесь анализируется канал, в котором передается сигнал со схемой модуляции 16QAM, соответствующий стандарту HSDPA. Диаграмма сигнального созвездия композитного сигнала относится к полному сигналу (в центре сверху); заметим, что значение модуля вектора ошибки (EVM) приблизительно равно 0,5%, а это означает, что генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight могут генерировать сигналы с несколькими схемами модуляции, сохраняя при этом превосходные характеристики джиттера и шумов.

Генерация таких сигналов требует запоминания многих тысяч символов в памяти сигналов, а часто требуется длина записи, значительно превышающая значение 1 Мвыб, что недоступно для большинства недорогих генераторов. Генераторы сигналов серии 33500В компании Keysight, обладающие глубиной памяти сигналов 16 Мвыб для каждого канала, фактически способны поддерживать любые реалистичные требования канального кодирования. Длина записи в памяти сигналов генераторов сигналов серии 33500В может быть определена с точностью до одной выборки, что предоставляет пользователям полную свободу при настройке длины записи, обеспечивая высокую точность всех временных параметров сигнала, включая частоту несущей и символьную скорость.

Генерация нескольких сигналов

Для тестирования приёмника в реальных условиях эксплуатации требуется добавлять искажения (например, обусловленные многолучевым распространением) и аддитивный белый гауссов шум (AWGN). Поскольку доступная полоса частот спектра часто совместно используется несколькими сервисами, а эти сервисы могут совместно использоваться многими операторами и пользователями, реалистичная эмуляция может потребовать одновременной генерации нескольких модулированных сигналов, особенно тех, которые расположены в соседних каналах, как это происходит при эмуляции центральных станций кабельного телевидения (см. рисунок 11).

Рисунок 11. Три сигнала несущих с модуляцией 64QAM, соответствующих стандарту DVB-C, которые были одновременно сгенерированы генератором сигналов 33522В компании Keysight. Тесты проводятся в центральном канале, но для всех сигналов используется канальное кодирование в соответствии со стандартом DVB-C, хотя данные являются некоррелированными, чтобы избежать искусственно созданных пиков мощности в комбинированном сигнале. Анализ сигнала DVB-C показывает полученное качество модуляции (EVM = 0,35%). Поскольку сигнал сформирован надлежащим образом с учётом правил канального кодирования, его можно использовать для тестирования. Коэффициент битовых ошибок (BER) можно вычислить путём сравнения числа скорректированных и нескорректированных ошибок до и после декодирования кода Рида-Соломона.



Отметим следующие важные достоинства, которые можно увидеть на рисунке 11:

- Очень хороший сигнал и равномерная АЧХ.
- Полоса провала является очень хорошей и обеспечивает подавление 50 дБ относительно уровня сигнала.
- Сигналами являются три несущие с модуляцией 64QAM, соответствующие требованиям стандарта DVB, которые переносят настоящие потоки данных MPEG.
- Коэффициент битовых ошибок (BER) можно оценить как очень хороший, но сгенерированный сигнал должен иметь длину, которая соответствует данному виду коррекции ошибок.

Некоторые стандарты беспроводной связи даже предусматривают возможность одновременной работы в пределах одной и той же полосы. Например, беспроводные сервисы, такие как WiFi и Bluetooth® могут совместно использовать диапазон частот для промышленных, научных и медицинских организаций (ISM) с центральной частотой 2,450 ГГц. При этом оба сервиса, должны поддерживать работоспособность в условиях помех. В настоящее время устройства, излучающие и принимающие сигналы нескольких стандартов беспроводной связи (например, любой смартфон способен одновременно работать с сигналами стандартов GSM, UMTS, WiFi, Bluetooth и GPS) являются широко распространёнными, и обеспечение функциональной совместимости является очень важным требованием при разработке устройств. Всё больше и больше усилителей мощности в передатчиках (например, UMTS Node-B или DVB-T) предназначаются для одновременной работы с несколькими каналами, чтобы сэкономить средства и уменьшить габаритные размеры. Генераторы сигналов произвольной формы являются идеальными приборами для создания таких сложных сценариев, поскольку несколько похожих или отличающихся сигналов можно добавить математически и сгенерировать одновременно. Амплитуда сигналов, неравномерность АЧХ, длина записи и динамический диапазон являются важными характеристиками для создания таких сценариев сигналов, и генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight являются лучшими во всех этих аспектах.

Генерация пакетных сигналов

Многие современные беспроводные сервисы используют сложные протоколы подключения к устройству для установления связи с ним или управления передачей обслуживания. Некоторые из них могут основываться на прерывистых передачах данных с относительно длительными периодами неактивности между передачами пакетов информации. Периоды неактивности могут быть как короткими (несколько микросекунд или даже меньше), так и длинными (несколько секунд). Единственным способом управления сценариями эмуляции таких сигналов с помощью коммерческих генераторов сигналов является использование функции задания последовательностей, которая доступна только в генераторах с архитектурой “истинных сигналов произвольной формы” высшего класса. Традиционные недорогие генераторы сигналов на базе технологии DDS не поддерживают задание последовательностей, поскольку способ, с помощью которого они обращаются к памяти, не позволяет легко устанавливать связь между различными сегментами. Генераторы сигналов серии 33500B компании Keysight, использующие технологию Trueform, не имеют этого недостатка: каждая выборка в памяти сигналов считывается, и удобное задание последовательностей, составляемых из сегментов, стало возможным. Генератор сигналов 33522B может запомнить до 32 последовательностей, которые могут включать до 512 сегментов.

Заключение

Серия 33500B компании Keysight является первым недорогим семейством генераторов сигналов, которое способно создавать высококачественные модулирующие сигналы и модулированные ПЧ/ВЧ-сигналы. Эксклюзивная технология Trueform компании Keysight сохраняет все преимущества технологии DDS и устраняет все её недостатки. Особенно это относится к генерации сигналов с низким уровнем джиттера, необходимых для беспроводных приложений. Архитектура Trueform по своим возможностям даже превосходит архитектуры генераторов “истинных сигналов произвольной формы”, которые используются в приборах высшего класса, поскольку избыточная дискретизация и фильтрация на основе ЦОС позволяют пользователям получать сигналы без зеркальных составляющих и выбрать прибор с самой лучшей амплитудно-частотной и переходной характеристикой для данного приложения.

Библиографический список

Keysight Application Note 5952-8898E, The Fundamentals of Signal Analysis. Рекомендации по применению. Номер публикации 5952-8898E. Основы анализа сигналов). Keysight Technologies, Inc. 2000.

Keysight Application Note 5965-7160E, Digital Modulation in Communications Systems—An Introduction. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5965-7160E. Цифровая модуляция в системах связи. Введение). Keysight Technologies, Inc. 2001.

Keysight Application Note 5989-4138EN, The ABC's of Arbitrary Waveform Generation. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5989-4138EN. Основы генерации сигналов произвольной формы). Keysight Technologies, Inc. 2005.

Keysight Application Note 5990-5897EN, Creating Differential Signals with a Two-Channel Arbitrary Waveform Generator. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-5897EN. Создание дифференциальных сигналов с помощью двухканального генератора сигналов произвольной формы). Keysight Technologies, Inc. 2010

Keysight Application Note 5990-5965EN, Understanding Sequence Run and Sequence Advance Modes. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-5965EN. Объяснение режимов работы Sequence Run и Sequence Advance). Keysight Technologies, Inc. 2010.

Keysight Application Note 5990-7451EN, Keysight Vector Signal Analysis Basics. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-7451EN. Основы векторного анализа сигналов). Keysight Technologies, Inc. 2011.

Keysight Application Note 5990-7460EN, Comparing Function Generator Performance: Direct Digital Synthesis Versus Point-by-Point Technology. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-7460EN. Сравнение характеристик генераторов сигналов специальной формы: прямой цифровой синтез и построение сигналов произвольной формы по точкам). Keysight Technologies, Inc. 2011.

Keysight Application Note 5990-9871EN, Testing Broadband CATV Amplifiers with True Wideband Channel Rasters. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-9871EN. Тестирование широкополосных усилителей кабельного телевидения с реальными сетками широкополосных каналов). Keysight Technologies, Inc. 2012.

Keysight Application Note 5991-0370EN, Complete Digital RF Design and Test Process Fundamentals. (Рекомендации по применению. Номер публикации 5991-0370EN. Основы законченного процесса разработки и тестирования ВЧ-устройств). Keysight Technologies, Inc. 2012

Mercade, Joan, Ruling the Waves. (Джоан Меркейд. Управление генерацией сигналов). Evaluation Engineering, July 2004.

Mercade, Joan, Unwrapping Wireless Signals. (Джоан Меркейд. Развертывание фазы сигналов беспроводной связи). Test & Measurement World, December 2006.

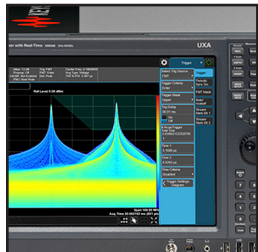
Mercade, Joan, Maximize a Waveform Generator's Memory. (Джоан Меркейд. Максимально эффективное использование памяти генераторов сигналов). Test & Measurement World, May 2011.

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи.

Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по проверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

Bluetooth является товарным знаком, принадлежащим Bluetooth SIG, Inc., США, и используется по лицензии компанией Keysight Technologies, Inc.

WiMAX является товарным знаком, принадлежащим ассоциации WiMAX Forum

Российское отделение

Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб.,
52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России

бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб.,
52,

стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие
стандарту ISO 9001:2015

Система управления качеством

Информация может быть изменена без
уведомления.

© Keysight Technologies, 2017

Published in USA, December 01, 2017

5991-1100RURU

www.keysight.com