

Keysight Technologies

Технологии и методы формирования  
сигналов систем РЭБ

Рекомендации по применению

## Введение

Неотъемлемой частью процесса проектирования систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) является формирование испытательных сигналов, которые с высокой точностью и повторяемостью имитируют сигнально-помеховую обстановку в условиях ведения РЭБ. В частности, для проведения реалистичных и наглядных испытаний крайне важно иметь возможность формировать сложную сигнальную обстановку, имитирующую одновременное присутствие в эфире множества источников электромагнитного излучения.

В настоящее время такую обстановку зачастую имитируют с использованием громоздких и сложных систем, разрабатываемых под конкретные задачи и применяемых на этапе контрольных испытаний для подтверждения соответствия разработанного комплекса РЭБ заданным требованиям, поэтому такое испытательное оборудование не является широкодоступным для инженеров-проектировщиков средств РЭБ в ходе НИОКР. Поэтому конструкторы, работающие над оптимизацией и предварительной оценкой характеристик разрабатываемых устройств, находятся в невыгодном положении по сравнению с радиоинженерами, решающими аналогичные задачи. Инженеры зачастую узнают о характере и масштабах проблем, связанных с достижением определенного показателя той или иной технической характеристики, уже на заключительных этапах проектирования. Это приводит к срывам сроков и необходимости переработки проекта, а также принятию неоптимальных конструкторских решений.

Настоящие рекомендации по применению содержат сводную информацию относительно доступных технико-методических подходов к формированию сигналов и имитации сложной сигнально-помеховой обстановки, соответствующей реальным условиям ведения РЭБ, а также последние наработки в создании гибких и высококачественных контрольно-измерительных решений. К примеру, недавние инновационные разработки в области цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) обеспечили возможность практического применения технологии формирования сигналов посредством прямого цифрового синтеза (DDS) для задач, связанных с РЭБ, благодаря расширению полосы частот и повышению качества формируемого сигнала. Решения, основанные на технологии DDS, и другие инновационные разработки в области оперативного управления частотой и мощностью сигнала будут обсуждаться в контексте повышения производительности работы инженеров-разработчиков средств РЭБ на этапе проектирования.

## Реалистичность и достоверность при формировании сигнальной обстановки с множеством источников электромагнитного излучения

Результаты контрольных испытаний, проводимых с целью определения и установления соответствия характеристик систем и комплексов РЭБ заданным значениям, в значительной степени зависят от того, насколько воспроизводимая в ходе испытаний сигнально-помеховая обстановка соответствует реальным условиям ведения РЭБ. В свою очередь реалистичность возрастает по мере того, как к общей обстановке добавляется все большее количество источников электромагнитных излучений (ЭМИ) с параметрами, достоверно соответствующими реальным целям РЭБ, формируя определенную плотность сигналов в эфире. Помимо достоверности параметров сигналов от отдельных эмиттеров, перечень возможностей при испытаниях систем РЭБ в реалистичных условиях расширяется за счет применения подвижной платформы, различных параметров и схем поиска источников электромагнитного излучения, моделей приемных антенн, углов прихода сигналов, а также воспроизведения условий многолучевого распространения сигналов и различных моделей поведения и состояния атмосферы. Современные системы РЭБ создаются для обнаружения и идентификации источников электромагнитного излучения путем точного определения пеленга и параметров импульсных сигналов в условиях высокой плотности эфира с показателями от 8 до 10 миллионов импульсов в секунду.

Стоимость испытаний важна так же, как и их реалистичность, поскольку стоимость и достоверность испытаний связаны между собой экспоненциальной зависимостью. По мере повышения экономической эффективности и функциональности испытательного оборудования растет и число видов испытаний средств РЭБ, которые можно выполнить на земле, например в лаборатории или безэховой камере, а не в условиях летных или прочих разновидностей натурных испытаний. Несмотря на то, что летные испытания значительно расширяют возможности воспроизведения условий испытаний, они дорогостоящи и обычно проводятся на поздних этапах НИОКР, что повышает риски и дальнейший рост стоимости работ в связи со срывом сроков в случае выявления сбоев испытываемой системы (ИС). Гораздо выгоднее проводить максимально реалистичные испытания на ранних этапах в лабораторных условиях, где их можно легко повторять для постепенного выявления и устранения проблем.

## Сложности, с которыми сталкиваются инженеры при имитации сигнально-помеховой обстановки со множеством источников ЭМИ

Сигнально-помеховая обстановка, характеризующая современные условия ведения РЭБ, включает тысячи источников ЭМИ - радиопередатчиков, беспроводных устройств, а также от десятков до сотен РЛС-целей, - формирующих миллионы радиолокационных импульсов в секунду среди других фоновых сигналов и шумов. Общий обзор спектра сигналов целей представлен на рис. 1.



Рисунок 1. Общая картина распределения и плотности целей РЭБ по частотным диапазонам в обычной оперативной обстановке. Реальная сигнально-помеховая обстановка в ВЧ- и СВЧ-диапазонах сочетает в себе ряд источников ЭМИ, соответствующих образцам вооружения и военной техники (ВВТ), а также гражданского и коммерческого назначения.

Моделирование такой сигнально-помеховой обстановки представляет собой сложную задачу, особенно на этапе проектирования, поскольку на этом этапе требуется добиться максимальной гибкости и производительности разрабатываемой системы. Ситуация значительно отличается от типовой задачи проектирования устройств беспроводной связи, когда один генератор сигналов может формировать требуемый сигнал, на который, при необходимости, накладывается сигнал второго генератора для имитации помех или шума.

При проектировании систем РЭБ сложность и плотность сигнально-помеховой обстановки делают непрактичным использование одного генератора сигналов или небольшого их числа для имитации одного или нескольких источников ЭМИ. Использование таких подходов исключается по соображениям стоимости, сложности и требуемой плотности сигналов, которые должен сформировать отдельный источник на конечном временном интервале.

Единственным практичным решением является моделирование нескольких источников ЭМИ с помощью одного генератора сигналов, а также использование нескольких генераторов, каждый из которых обычно моделирует несколько источников ЭМИ, когда необходимо обеспечить требуемую плотность сигналов или смоделировать особые влияющие факторы или условия, например угол прихода волны на приемник.

Возможность смоделировать работу нескольких источников ЭМИ на различных частотах определяется частотой повторения импульсов, коэффициентом заполнения и числом эмиттеров в имитируемой обстановке, а также возможностью быстрого переключения генератора сигналов между значениями частоты, амплитуды и между типами модуляции.

Фактором, ограничивающим возможность применения одного генератора сигналов для моделирования нескольких источников ЭМИ, являются коллизии (наложения) импульсов. На рис. 2 и 3 показано число коллизий импульсов, ожидаемое в случаях низкой и высокой частоты повторения импульсов (PRF).

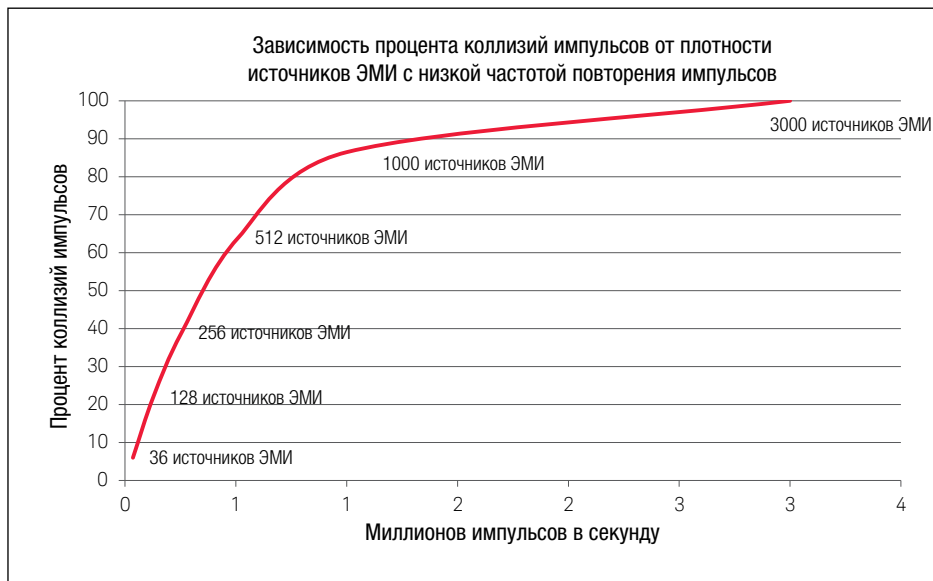


Рисунок 2. По мере роста числа источников ЭМИ растет и число коллизий импульсов, даже если все эмиттеры работают с низкой плотностью импульсов.

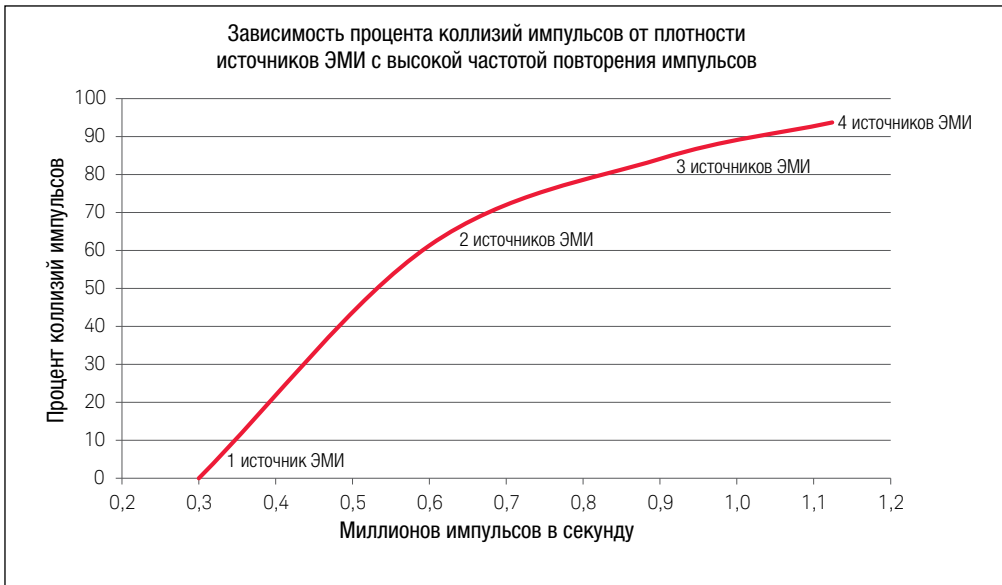


Рисунок 3. При включении в модель источников ЭМИ с высокой частотой повторения импульсов процент коллизий импульсов резко возрастает.

Скорость смены режимов генератора является одним из показателей, характеризующих его способность имитировать несколько источников ЭМИ. Время установки частоты и амплитуды генератора (в зависимости от того, что больше) ограничивает время перехода от воспроизведения одного дескриптора импульса (PDW) к воспроизведению следующего.

Общая плотность импульсов для одного генератора ограничена суммарно временем перестройки и длительностями импульсов, т.е. периодом блокировки, как показано на рис. 4. Очевидно, что период блокировки должен быть как можно более коротким, поэтому значения времени установления параметров генератора также должны быть минимальным.



Рисунок 4. Возможность имитации нескольких источников ЭМИ зависит не только от параметров этих источников (например, частоты повторения импульсов и длительности импульса), но и от скорости переключения и времени стабилизации частоты и амплитуды сигнала, которые определяются используемым генератором сигналов. Если генератор находится в процессе перестройки, он не может воспроизводить импульс. Если же воспроизводится заданный импульс эмиттера, то блокируется переключение. Генератор не в состоянии имитировать различные цели в период блокировки (время от подачи до завершения выполнения управляющей команды).

Для имитации сценариев с высокой плотностью импульсов и возможности наложения некоторых импульсов друг на друга зачастую необходимо объединять несколько генераторов. По мере включения большего числа генераторов в конфигурацию испытательного оборудования, плотность импульсов должна возрастать постепенно и непрерывно, чтобы в итоге было достигнуто оптимальное соотношение между реализмом модели и ее стоимостью.

## Как усовершенствование технологий упрощает процесс системной интеграции и снижает стоимость разработок

Имитация большего числа целей для повышения плотности импульсов в итоге требует большего числа каналов параллельного моделирования, даже если канал моделирования обеспечивает быстрое переключение частоты и амплитуды сигнала. Причина заключается в том, что по мере увеличения таких параметров, как число источников ЭМИ, частота повторения импульсов и коэффициент заполнения, импульсы начинают накладываться друг на друга во временной области<sup>1</sup>. Импульсы, накладывающиеся друг на друга во временной области, должны воспроизводиться параллельно запущенными генераторами или выборочно удаляться на основании схемы приоритета дескрипторов импульсов. К сожалению, повышение реализма сложной сигнально-помеховой обстановки с высокой плотностью сигналов приводит к значительному росту стоимости системы, как показано на рис. 5.

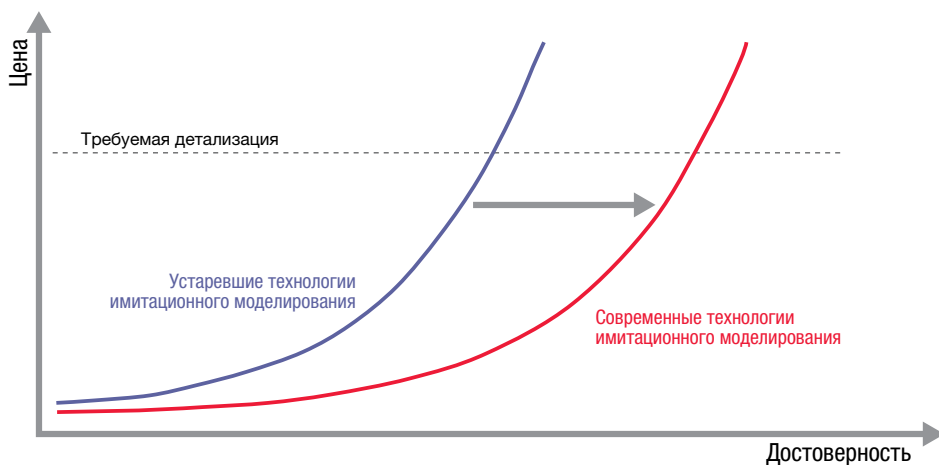


Рисунок 5. Повышение достоверности имитационного моделирования влечет за собой экспоненциальный рост стоимости испытательного оборудования. Специалисты в области системной интеграции и системного анализа должны выбрать такое соотношение стоимости и достоверности, которое гарантирует решение задачи оценки характеристик разрабатываемой системы. Новые технологии моделирования позволяют повысить реализм модели и ее достоверность при меньшей стоимости.

В прошлом, для имитации изменения одного из параметров модели, таких как внесение дополнительных сигналов, дополнительная модуляция/формирование импульсов, ослабление или усиление, сдвиг фазы, в систему имитации вводили дополнительные компоненты и устройства. Для формирования каждого импульса аналогичный дескриптор импульса посылался на каждый функциональный элемент системы. Например, синтезатор формировал сигнал на заданной выходной частоте, а отдельный модулятор обеспечивал импульсную модуляцию и/или модуляцию АМ/ЧМ/ФМ. После этого для регулировки и установления требуемого уровня выходной мощности использовались усилители или аттенуаторы. Пример топологии такой системы представлен на рис. 6.

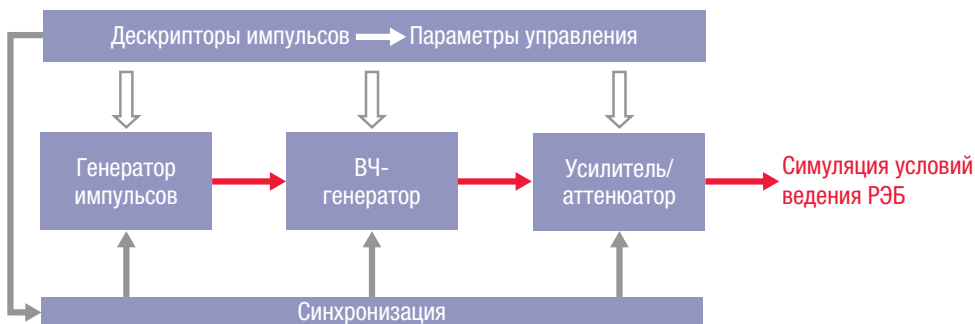


Рисунок 6. При использовании традиционного подхода для формирования и изменения требуемого сигнала параметры управления в виде дескрипторов импульсов посылаются параллельно на несколько функциональных элементов для каждого импульса. Такой подход приводит к созданию сложных систем, требующих точной синхронизации.

1. Philip Kazserman, "Frequency of pulse coincidence given  $n$  radars of different pulse widths and PRFs," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-6, p. 657-662, September 1970.

Поскольку для формирования сигнала каждого выходного канала требуется использовать несколько функциональных элементов системы, нетривиальной становится задача их синхронизации по времени при конфигурировании и дальнейшей эксплуатации системы. Необходимо полностью описать обширный ряд значений времени стабилизации и задержек, чтобы оптимизировать плотность импульсов путем максимального уменьшения длительности периодов блокировки.

При таком подходе система может быть непосредственно масштабирована для создания нескольких когерентных каналов, как показано на рис. 7. Однако сконфигурированные таким образом системы занимают больше пространства и места в стойках, а их стоимость быстро растет.

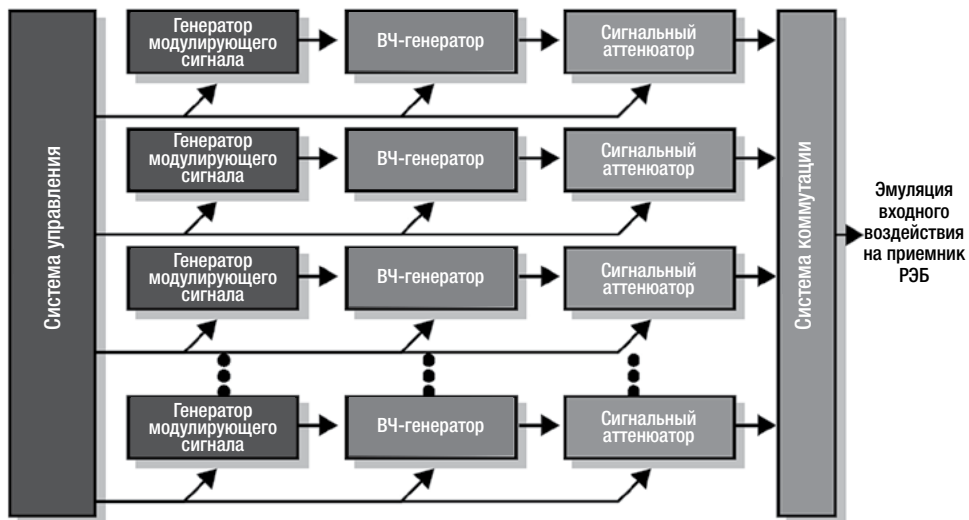


Рисунок 7. Подход к формированию сигналов с использованием отдельных функциональных элементов позволяет просто увеличивать масштаб системы для повышения плотности импульсов и создания более реалистичной сигнально-помеховой обстановки. К сожалению, с ростом масштаба системы также растет ее стоимость и размер.<sup>1</sup>

Схема управления и коммутации, показанная на рис. 7, может распределять дескрипторы импульсов по каналам, основываясь на требуемых параметрах моделируемых источников ЭМИ, например частоте несущей, амплитуде и частоте повторения импульсов, а также с учетом доступности каждого канала для приема дескриптора импульса. Поскольку канал не может одновременно имитировать параметры, описываемые двумя различными дескрипторами импульсов, один из них может быть перенаправлен в резервный канал или отклонен (в зависимости от приоритета).

В конечном счете приемники систем РЭБ должны иметь возможность обрабатывать 8–10 млн импульсов в секунду, при этом наибольшая плотность импульсов должна наблюдаться в X-диапазоне. Кроме того, они должны иметь возможность обрабатывать импульсы, одновременно приходящие на разных частотах под разными углами. Формирование импульсов, накладывающихся друг на друга во временной области, должно быть одной из основных задач моделирования для повышения степени реализма модели.

Несмотря на то, что на рис. 7 приведена очень эффективная система, степень интеграции элементов такой системы достаточно низка. Недавние разработки в области формирования аналоговых и синтеза цифровых сигналов дали возможность повысить степень интеграции, а также увеличить эффективность систем с точки зрения их стоимости и занимаемой площади (информация об этом приведена в разделе «Повышение степени интеграции решений для испытаний систем РЭБ»). Существует несколько способов управления процессами моделирования в зависимости от целей и задач испытаний.

1. Воспроизведено с разрешения Дэвида Эдеми (David Adamy), EW 101: A First Course in Electronic Warfare (Первый курс по радиоэлектронной борьбе), г. Норвуд, Массачусетс: Artech House, Inc., 2001 г. © Artech House, Inc, 2001 г.

## Управление испытательным оборудованием с обратной связью

В зависимости от степени интеграции элементов модели и ее длины сценарии можно воспроизводить из памяти по списку или транслировать через цифровой интерфейс, например с помощью протокола дифференциальной передачи сигналов (LVDS). В режиме списка воспроизводятся более короткие сценарии, при этом дескрипторы импульсов воспроизводятся из памяти согласно списку. Этот режим допускает возможность переключения импульсов между списками для адаптивного (с обратной связью) моделирования в ответ на действия ИС.

Например, часто возникает необходимость переключения между режимами моделирования в ответ на обнаружение и идентификацию ИС целей и переход в режим постановки помех. Для реализации более длинных сценариев, требующих оперативного контроля за всеми изменениями в ходе их выполнения, дескрипторы импульсов можно передавать в поточном режиме посредством LVDS на подсистему формирования сигналов, которая работает в режиме быстрого контроллера. В этом случае программное обеспечение для моделирования формирует пакеты дескрипторов импульсов в соответствии с кинематической детализацией модели и транслирует их в поточном режиме с опережением заданного времени их воспроизведения.

Целью обоих подходов является обеспечение нагрузки ИС с растущей плотностью импульсов в зависимости от числа доступных каналов моделирования и моделируемых параметров целей. По мере увеличения плотности импульсов, некоторые дескрипторы могут быть отклонены согласно схеме приоритета, т.к. количество их столкновений во временной области растет, а имеющихся каналов может становиться недостаточно для их воспроизведения.

## Имитация угла прихода волны

В дополнение к формированию заданной плотности и достоверности эмиттеров сигналов, также важно привести в соответствие параметры геометрии и кинематики сценариев ведения РЭБ, поскольку угол прихода сигналов от РЛС-целей изменяется медленно относительно системы РЭБ по сравнению с другими параметрами, такими как центральная частота и частота повторения импульсов.

Системы РЭБ измеряют угол прихода волны и оценивают расстояние путем сравнения амплитуд, дифференциального доплеровского метода, интерферометрии (разности фаз) и разницы во времени прихода сигнала (TDOA). Точные измерения угла прихода волны обеспечивают точное обнаружение РЛС-целей. В новых системах удаленной постановки помех, когда самолет - постановщик помех осуществляет прикрытие цели, находясь за пределами зоны поражения ПВО противника, используются активные фазированные антенные решетки (АФАР) с электронным управлением диаграммой направленности, способные обеспечить формирование оптимальной диаграммы направленности с целью снижения потерь мощности передатчика помех вследствие рассеяния пучка электромагнитной энергии в стороны от прикрываемой цели. Более того, приемники систем РЭБ с лучшими возможностями определения угла прихода волны снижают потребность в устранении перемежения импульсов и сортировке. Следовательно, угол прихода волны становится все более важным параметром, моделируемым при проведении испытаний.

## Методы имитации угла прихода волны

В прошлом параметры сигнала, соответствующие определенному углу прихода волны, задавались путем объединения нескольких генераторов и аналоговых фазовращателей, а также аттенюаторов и блоков усиления в кабельной линии, ведущей к ИС. Аналоговые элементы в кабельной линии занимали много места, имели ограниченную точность и высокую стоимость. В качестве альтернативы генераторы (в зависимости от их архитектуры) можно объединять для создания когерентного по фазе выходного сигнала, который обеспечивает более точное управление фазовым фронтом, идущим к ИС. Аналогичным образом управление амплитудой сигнала на выходе генераторов можно использовать для создания надлежащих соотношений амплитуд в каналах приема ИС.

Возможность контроля угла прихода волны с целью соответствия современным требованиям к испытаниям зависит от архитектуры генераторов. По меньшей мере должна существовать возможность синхронизировать работу гетеродинов различных генераторов таким образом, чтобы они все имели одинаковую фазу. Часто при калибровке необходимо точно настроить фазу и временные соотношения для различных генераторов.

Дальнейшей задачей становится создание небольших, точных и воспроизводимых фазовых или частотных сдвигов между сигналами в различных каналах. Генераторы сигналов, построенные на основе архитектуры и принципов прямого цифрового синтеза (DDS), позволяют изменять угол прихода волны посредством программных команд с помощью генератора с цифровым управлением. Фазовая синхронизация генератора сигналов с прямым цифровым синтезом заключается в подключении его к общему опорному генератору. Калибровочные коэффициенты, обеспечивающие точность и воспроизводимость, можно загрузить в таблицу и применять в реальном времени.



## Обзор технологий построения генераторов сигналов, используемых при испытаниях комплексов РЭБ

Характеристики и ограничения систем формирования сигналов, используемых при испытаниях комплексов РЭБ, в значительной степени определяются технологиями, положенными в основу архитектур синтезаторов и генераторов, являющихся сердцем таких систем. Чтобы инженеры-проектировщики комплексов РЭБ могли принять взвешенное решение при выборе фундамента для построения таких систем, в настоящем разделе приводится обобщенная информация о трех доступных в настоящий момент основных технологиях:

- прямой аналоговый синтез (DAS);
- фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) или непрямой аналоговый синтез (часто также используются делители с дробно-переменным коэффициентом деления);
- прямой цифровой синтез (DDS).

### Общие требования к генераторам сигналов

Генераторы сигналов, используемые при испытаниях комплексов РЭБ, должны иметь возможность формирования широкополосных сигналов. Традиционно был задействован диапазон частот от 0,5 до 18 ГГц. Но в последние годы требуемый диапазон частот значительно расширился, теперь он начинается практически от нуля и заканчивается частотами вплоть до 40 ГГц. Это позволяет имитировать работу систем раннего обнаружения, целенавещения и радиолокаторов специального назначения посредством формирования соответствующих сигналов на выходе одного канала.

Кроме перекрытия широкого диапазона частот, генераторы сигналов, используемые при испытаниях комплексов РЭБ, должны иметь высокую скорость перестройки частоты и амплитуды для моделирования различных радаров, работающих в разных режимах и на разных диапазонах частот.

### Синтезаторы частот с фазовой автоподстройкой частоты и делителями с дробно-переменным коэффициентом деления

#### Непрямой синтез

Большинство генераторов общего назначения работают на основе системы ФАПЧ, где широкополосный генератор, например генератор, управляемый напряжением, (ГУН) или на основе ЖИГ, связан со стабильным опорным генератором через петлю ФАПЧ. ФАПЧ повышает качество сигнала путем снижения фазового шума и паразитных сигналов на выходе. Чтобы совместить широкий диапазон частот и высокое разрешение по частоте, генераторы сигналов на основе ФАПЧ настраиваются с помощью сочетания контуров суммирования и пошаговой перестройки или с помощью одного контура с возможностью точного дробного деления. Такие ФАПЧ с дробно-переменным коэффициентом деления обеспечивают отличное качество сигнала и высокое разрешение по частоте в экономически эффективном одноконтурном исполнении, что делает их отличным выбором в качестве генераторов сигналов общего назначения.

К сожалению, необходимость фильтрации в контуре управления в системах ФАПЧ приводит к значительному времени стабилизации или реакции контура. Это ограничивает способность синтезатора быстро переключать частоты. В связи с относительно большим временем смены состояния такие генераторы ограничены в возможности моделирования нескольких радиолокационных целей с использованием одного канала, даже если они обеспечивают охват широкого диапазона частот и высокое разрешение по частоте. Кроме того, они преимущественно лишены возможности переключения с повторяемым значением фазы.

## Прямой аналоговый синтез

При прямом аналоговом синтезе обычно формируются несколько опорных сигналов стабильной частоты, полученных умножением или делением сигнала от одного и того же кварцевого генератора. Эти опорные частоты (и их гармоники) можно подавать в ВЧ-тракт и исключать из него, а также умножать, делить, суммировать или вычитать для быстрой перестройки и получения высокого разрешения по частоте. Частоты этих опорных сигналов выбираются таким образом, чтобы уменьшить необходимое число контуров умножения и добиться умеренного роста фазового шума с увеличением частоты. Деление в сторону более низких частот снижает фазовый шум.

Поскольку переключатели и арифметические операторы, используемые в системах прямого аналогового синтеза, работают очень быстро и не требуют фильтрации в контуре, такие синтезаторы имеют возможность очень быстрой перестройки частот. В связи с этим данный тип синтезаторов стал частью стандартной архитектурой, используемой при конфигурировании испытательного оборудования для комплексов РЭБ.

Однако технология прямого аналогового синтеза имеет свои недостатки. Во-первых, для достижения требуемого разрешения по частоте необходимо использование значительного количества ступеней. Переключение параллельных и последовательных каскадов умножения, деления и смешивания требует применения большего числа аппаратных компонентов по сравнению с ФАПЧ и в общем случае приводит к снижению надежности. Во-вторых, уровень шума возрастает от каскада к каскаду, а фазовый шум — умножается. Наконец, каждый каскад предполагает наличие компонентов, что увеличивает размер, вес и стоимость системы.

Преимуществом является то, что при использовании в составе испытательного оборудования для комплексов РЭБ, синтезаторы на основе прямого аналогового синтеза потенциально способны обеспечить повторяемость фазы сигнала в ограниченном диапазоне. Однако несмотря на то, что все частоты обычно получаются из одной опорной частоты, погрешности, вносимые при делении, зачастую исключают возможность сохранения когерентности по фазе при переключении.

## Применение технологии прямого цифрового синтеза при разработке систем РЭБ

Метод прямого цифрового синтеза, основанный на использовании цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), прекрасно подходит для моделирования сигналов при испытаниях комплексов РЭБ. При этом до недавних пор не существовало ЦАП с требуемым сочетанием высокой частоты дискретизации и чистоты спектра выходного сигнала.

Высокая частота дискретизации необходима для получения выходных сигналов в широком диапазоне частот, чтобы в дальнейшем для получения заданных сигналов можно было использовать минимальное число каскадов умножения. Использование большого числа каскадов умножения или отдельного блока ЦАП, не обеспечивающего достаточную чистоту спектра выходного сигнала, ограничит эффективный динамический диапазон синтезатора, свободный от паразитных составляющих (SFDR).

В теории генератор на основе прямого цифрового синтеза является одним из простейших типов генераторов сигналов. В генераторе сигналов на основе прямого цифрового синтеза перестройка по частоте осуществляется путем преобразования данных, поступающих от генератора с цифровым управлением, в аналоговую форму с помощью ЦАП, с последующим удалением зеркального канала и гармоник посредством фильтра нижних частот (ФНЧ). Блок-схема взаимодействия основных элементов генератора сигналов на основе прямого цифрового синтеза приведена на рис. 8.

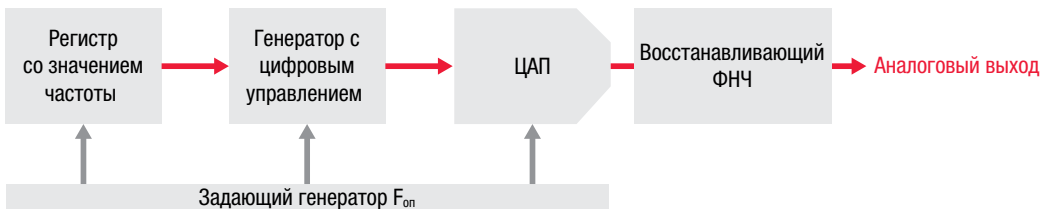


Рисунок 8. Функциональная блок-схема синтезатора на основе прямого цифрового синтеза.

Генератор с цифровым управлением состоит из двух элементов: фазового аккумулятора (ФА) и фазово-амплитудного преобразователя (ФААП), как показано на рис. 9. В современных схемах прямого цифрового синтеза эти блоки выполняются в виде программируемых логических интегральных (ПЛИС) или специализированных интегральных схем.



Рисунок 9. Функциональная блок-схема генератора с цифровым управлением.

В процессе формирования заданной частоты управляющий перестройкой сигнал (из разности фаз) в виде кода подается на фазовый аккумулятор вместе с опорной тактовой частотой. Для каждого периода синхронизации происходит высокоточное прибавление этой разности фаз в фазовом аккумуляторе. Сгенерированное аккумулятором значение фазы затем преобразуется в синусоиду в фазово-амплитудном преобразователе. После этого цифровой синусоидальный сигнал передается на ЦАП и появляется на выходе с частотой, определяемой уравнением настройки системы прямого цифрового синтеза, где  $N$  — число битов в управляющем коде<sup>1</sup>.

$$f_{\text{out}} = \frac{\Delta\text{phase}}{2^N} f_{\text{clk}}$$

Это уравнение демонстрирует, что более высокие значения выходной частоты достигаются за счет более высоких значений тактовой частоты ЦАП, а разрешение определяется числом бит в управляющем коде для перестройки частоты и фазовым аккумулятором. Генератор с цифровым управлением выступает в качестве делителя опорной тактовой частоты для формирования сигналов с высоким разрешением по частоте, определяемым разрядностью фазового регистра и значением управляющего слова. Следует отметить, что переходы на новую частоту происходят за один период синхронизации.

1. David Buchanan, Choosing DACs for direct digital synthesis, Analog Devices Application Note 237, доступно: <http://application-notes.digchip.com/013/13-14876.pdf>

## Преимущества прямого цифрового синтеза

Новый генератор сигналов с быстрой перестройкой частоты серии UXG компании Keysight использует технологию прямого цифрового синтеза, реализованную с использованием собственного ЦАП компании Keysight для формирования сигналов в сценариях с множеством эмиттеров. Прямой цифровой синтез обладает несколькими преимуществами относительно других технологий синтеза сигналов, используемых для целей РЭБ.

- Чрезвычайно точная цифровая перестройка частоты и фазы в рамках одного цикла синхронизации. Для генератора сигналов серии UXG компании Keysight разрешение по частоте составляет один герц, а разрешение по фазе — менее одного градуса. Методы синтеза с использованием деления частоты обеспечивают разрешение с точностью до микрогерц, однако перестройка частоты значительно замедляется системой ФАПЧ с фильтрацией. Методики прямого аналогового синтеза обеспечивают быструю перестройку частоты, но за счет снижения разрешения по частоте.
- Быстрые скачкообразные изменения частоты с сохранением целостности и повторяемости фазовой характеристики для моделирования многочисленных импульсных доплеровских РЛС на различных частотах в условиях поддержания исходной фазы. Такое сочетание управления фазой и временем перестройки является уникальным отличием генератора серии UXG компании Keysight. Методы прямого аналогового синтеза предлагают высокую скорость скачкообразной перестройки частоты и воспроизводимости частоты/фазы только в ограниченных условиях.
- Модуляция осуществляется в цифровом виде, обеспечивая цифровую точность и воспроизводимость.

Существуют и другие преимущества использования технологии прямого цифрового синтеза, представляющие интерес для инженера систем и комплексов РЭБ. Многие генераторы сигналов на основе прямого цифрового синтеза обеспечивают модуляцию по амплитуде, частоте и фазе с помощью цифрового модулятора для создания сигналов с цифровой модуляцией в генераторе с цифровым управлением. Импульсы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) и коды Баркера можно также напрямую синтезировать с помощью генератора с цифровым управлением. Полоса ЛЧМ-импульса зависит от полосы пропускания фильтров после каждой ступени умножения, а также от того, пересекает ли сигнал границы поддиапазонов.

## Архитектура генератора СВЧ-сигналов на основе прямого цифрового синтеза

Для испытаний современных систем РЭБ требуется использование частотного диапазона до 40 ГГц, также необходима высокая скорость перестройки частоты и высокая чистота спектра сигнала. Технологии цифровой обработки сигналов (ЦОС) для формирования сигналов в цифровом виде некоторое время пользовались популярностью, однако характеристики широкополосных ЦАП не подходили для этих задач. Имеющиеся ЦАП с очень широкой полосой пропускания и высокой тактовой частотой не обеспечивали достаточную чистоту спектра сигнала, а ЦАП с хорошей чистотой сигнала и большой разрядностью были ограничены использованием более низких тактовых частот и более узкой полосы пропускания.

Последние инновационные разработки компании Keysight в области ЦАП позволили представить образцы ЦАП и генератора сигналов на основе прямого цифрового синтезатора, которые подходят для решения задач, возникающих при испытаниях комплексов РЭБ. ЦАП был спроектирован для обработки высоких частот, он сочетает большую разрядность и превосходные показатели по чистоте спектра сигнала, включая динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, и фазовый шум. Высокая частота дискретизации ЦАП обеспечивает прямой цифровой синтез в широкой полосе частот. Это позволяет формировать СВЧ-сигналы с использованием малого числа ступеней умножения. Ограничение числа ступеней умножения позволяет ограничить фазовый шум и паразитные сигналы, присутствующие в спектре выходных СВЧ-сигналов.

Для испытаний комплексов РЭБ также требуется обеспечить возможность точной установки амплитуд сигналов в широком диапазоне уровней мощности. Уровни мощности должны переключаться так же быстро, как происходит перестройка по частоте, без искажения сигнала из-за переключения ступеней аттенюатора. Как и в случае с ЦАП, эти требования привели к разработке компанией Keysight новой серии переключателей на полевых транзисторах для производства твердотельного аттенюатора с возможностью быстрой перестройки, низким уровнем искажений и диапазоном ослабления сигналов в 120 дБ. Диапазон быстрой перестройки аттенюатора составляет 80 дБ во всем диапазоне значений выходной мощности от 0 дБм до -120 дБм.

Архитектура генератора СВЧ-сигналов с быстрой перестройкой показана на рис. 10. Этот генератор полностью основан на технологии прямого цифрового синтеза и вобрал в себя достижения в области создания ЦАП и переключателей на полевых транзисторах.

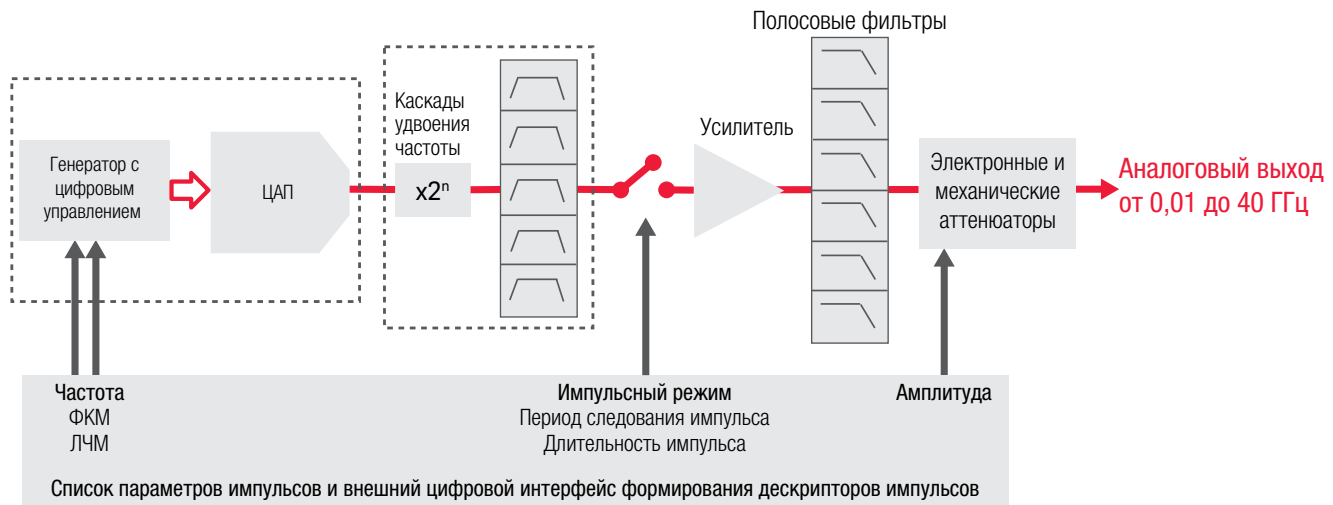


Рисунок 10. Высокоуровневая функциональная блок-схема генератора сигналов с быстрой перестройкой частоты на основе прямого цифрового синтеза, работающего в диапазоне от 0,01 до 40 ГГц.

Процесс формирования сигнала начинается со схемы цифрового синтеза, обеспечивающей минимальные негармонические искажения, так как они возрастают после каждого каскада удвоения частоты. Далее располагается ряд каскадов удвоения частоты, необходимых для формирования сигналов с частотой до 40 ГГц. Каждый каскад умножения содержит полосовые фильтры для удаления нежелательных сигналов, возникающих в результате умножения.

После этого используется аттенюатор с высокой скоростью переключения на основе полевых транзисторов для получения нужного уровня выходного сигнала. Переключение аттенюатора обеспечивает заданную скорость перестройки частоты. В результате этого в генераторе сигналов может быть реализована разомкнутая петля в тракте высокоточной регулировки мощности, и при этом не тратится дополнительное время на ее перестройку.

## Повышение степени интеграции решений для испытаний систем и комплексов РЭБ

Общим направлением развития решений для моделирования сигнально-помеховой обстановки для испытаний систем и комплексов РЭБ является расширение возможностей и функциональных элементов моделирования, обеспечиваемых генератором сигналов в ВЧ-/СВЧ-диапазонах. Например, генератор сигналов с быстрой перестройкой частоты серии UXC компании Keysight объединяет внутри быстрого синтезатора частот каскады внутриимпульсной модуляции, импульсной модуляции и усиления/ослабления.

Имея высокий уровень функциональной интеграции, генератор сигналов с быстрой перестройкой частот на основе прямого цифрового синтеза, а также соответствующий быстрый аттенуатор, генератор UXC по своей функциональности и производительности идеально подходит для тестирования систем и комплексов РЭБ.

- Быстрое переключение частоты, амплитуды и фазы для имитации большого количества эмиттеров с высокой динамикой изменения состояний
- Широкий динамический диапазон, соответствующий динамическим диапазонам современных приемников комплексов РЭБ
- Точная и быстрая перестройка по амплитуде в широком диапазоне для моделирования многочисленных целей с контролируемыми уровнями мощности, а также для переключения амплитуд со скоростью перестройки частоты
- Низкий минимальный уровень шума для контроля чувствительности приемника при комбинировании каналов
- Импульсная модуляция с высоким значением подавления в паузе и быстрой стабилизацией для снижения искажений
- Функция внутриимпульсной модуляции для испытаний схем со сверткой импульсов, например, с использованием кодов Баркера и ЛЧМ
- Возможности наращивания генераторов в системе для имитации целей в многоканальном и многопортовом режиме обеспечивают простое повышение плотности импульсов и реализма сценария
- Широкий диапазон частот до 40 ГГц, отвечающий современным требованиям к моделированию целей
- Интерфейс управления частотами VCD для обратной совместимости со старыми системами, которые использовались в качестве гетеродинов
- Интерфейс LVDS позволяет осуществлять высокоскоростную передачу дескрипторов импульсов в потоковом режиме, а также имитационное моделирование с обратной связью в процессе испытаний комплексов РЭБ, где требуется быстрый и полнофункциональный интерфейс для высокоскоростной потоковой передачи дескрипторов импульсов целиком, а не только команд управления частотой.

В системах с традиционной, распределенной архитектурой (как показано на рис. 7) синхронизация быстрого гетеродина с такими функциями, как импульсная модуляция, частотная/фазовая модуляция и управление амплитудой представляет собой сложную задачу. В таком интегрированном решении для испытаний систем и комплексов РЭБ, как генератор UXC, эта синхронизация выполняется автоматически непосредственно самим испытательным оборудованием. Благодаря снижению сложности оборудования и систем, такой интегрированный подход позволит повысить как производительность, так и надежность измерений.

## Заключение

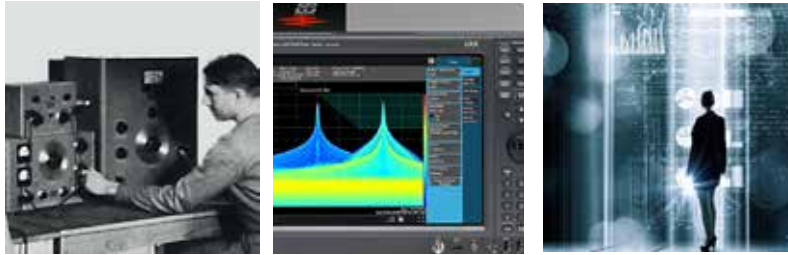
Для повышения эффективности формирования сигналов, применяемых в ходе моделирования сигнально-помеховой обстановки при испытаниях систем и комплексов РЭБ, может использоваться множество различных технологий. Каждая из них обладает своими достоинствами и недостатками. Решения, позволяющие получить наибольшую достоверность, обеспечивают очень реалистичное моделирование сигнально-помеховой обстановки в условиях ведения РЭБ, однако их применение ограничено их сложностью и стоимостью.

Недавние инновационные открытия в области производства таких ключевых компонентов, как цифро-аналоговые преобразователи и ПЛИС, позволили создать новые решения с более простой и надежной аппаратной частью по сравнению с традиционным испытательным оборудованием. Эти решения позволят значительно оптимизировать стоимость и размеры испытательного оборудования, а также дать возможность моделировать обстановку в условиях ведения РЭБ с высокой точностью на значительно более ранних этапах процесса проектирования. Реалистичное моделирование обстановки в условиях ведения РЭБ на этапах оптимизации и предварительной оценки характеристик позволит повысить производительность, ускорить процесс проектирования и снизить общую стоимость разработки и производства систем РЭБ.

## Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, технической поддержки, знаний и опыта наших инженеров позволит вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От HewlettPackard и Agilent к Keysight



Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте: [www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

### 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](mailto:tmo_russia@keysight.com)  
[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

ЦСМ Keysight Technologies  
115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3  
Тел.: +7 (495) 7973930  
Факс: +7 (495) 7973901  
e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

(BP-2-23-17)

  
DEKRA Certified  
ISO 9001 Quality Management System

[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Система управления качеством  
Keysight Technologies, Inc.  
сертифицирована DEKRA  
по ISO 9001:2015

### myKeysight

myKeysight

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

Индивидуальная подборка наиболее важной для вас информации.

### KEYSIGHT SERVICES

Accelerate Technology Adoption.  
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

[www.keysight.com/find/service](http://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](http://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](http://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.