

# Методы сжатия данных для потоковой передачи широкополосных импульсных сигналов РЛС

Майкл Мэй, Agilent Technologies, Inc.

В статье описываются методы сжатия данных, которые можно использовать для потоковой передачи импульсов РЛС с максимальной полосой на лучший в своём классе генератор сигналов произвольной формы M8190A.

## ВВЕДЕНИЕ

Для создания импульсов радиолокационных систем (РЛС), как правило, используется генератор сигналов произвольной формы. Самые быстродействующие современные генераторы имеют полосу модуляции до нескольких гигагерц. Но, кроме широкой полосы модуляции, генерирование импульсов РЛС требует очень длительного воспроизведения сигнала, в идеале – неограниченного по времени. Для увеличения времени воспроизведения генераторы сигналов произвольной формы предлагают большое разнообразие функциональных возможностей, такие как большой объём памяти выборок в сочетании с настройками сложных последовательностей и сценариев. Несмотря на то что такой подход существенно увеличивает время воспроизведения, ему присущи два основных ограничения: во-первых, время воспроизведения по-прежнему остаётся конечным; во-вторых, последовательность импульсов оказывается predetermined. Это означает, что генерирование импульсов не может быть приспособлено к изменениям в окружающей обстановке.

Хорошо известный подход [1], позволяющий преодолеть оба ограничения, заключается в потоковой подаче импульсов на генератор сигналов

произвольной формы. Поток импульсов РЛС можно создать в режиме реального времени или записать его заранее и воспроизвести с какого-либо накопителя, например, RAID-массива или твердотельного накопителя (SSD). Помимо этого, для потоковой подачи данных в генератор сигналов произвольной формы требуется управление захватом, коррекцией и воспроизведением, чтобы изменять импульсы РЛС.

Для создания импульсов РЛС с минимальными искажениями и очень широкой полосой необходимо использовать генератор сигналов произвольной формы с разрешением 12 или 14 разрядов и высокой частотой дискретизации – порядка 8 или даже 12 Гвыб/с. Поток выборок с разрешением 12 разрядов и частотой 12 Гвыб/с требует пропускную способность 144 Гбит/с или 18 Гбайт/с. Столь высокие скорости передачи могут легко превысить возможности даже самых быстродействующих компьютеров и самых скоростных накопителей. В настоящей статье описываются методы сжатия данных, которые можно использовать для потоковой передачи импульсов РЛС с максимальной полосой на лучший в своём классе генератор сигналов произвольной формы. Для потоковой передачи данных используются следующие методы сжатия:

- вставка пустых интервалов с внешней синхронизацией для сжатия типичных, периодически повторяющихся импульсов РЛС;
- цифровое преобразование с повышением частоты для прямого генерирования импульсов РЛС в диапазоне ПЧ;
- преобразование частоты и амплитуды импульсов с помощью технологии цифровой обработки сигнала.

Новейшее поколение генераторов сигналов произвольной формы поддерживает аппаратное восстановление данных, сжатых всеми упомянутыми методами, на полной скорости. В результате сжатые широкополосные импульсы РЛС можно подавать на генератор в виде потока, используя сравнительно небольшие скорости передачи (несколько гигабит в секунду). Генератор восстанавливает передаваемые в виде потока импульсы РЛС в специальной интегральной схеме и передаёт импульсы с наивысшим качеством сигнала в тракт ПЧ на частоте несколько гигагерц.

## ПОТОКОВАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Схема потоковой передачи, содержащая внешний RAID-массив (массив независимых жёстких дисков с резервированием), управляющий ПК и генератор сигналов произвольной формы, показана на рисунке 1. Генератор сигналов также можно использовать для преобразования с повышением частоты, например, в X-диапазон (8...12 ГГц) и даже выше. Дисковый RAID-массив и генератор обычно подключают к управляющему ПК через интерфейсы PCIe.

Для потоковой передачи сигналов в генератор можно использовать следующие источники:

1. RAID-массив, состоящий из множества жёстких дисков (HDD) и имеющий ёмкость до нескольких сотен терабайт. Скорость чтения такого массива часто достигает 1...2 Гбайт/с.
2. Высокоскоростные твердотельные накопители (SSD) предлагают скорость чтения 3...4 Гбайт/с и ёмкость в несколько терабайт.

При потоковой передаче данных из хранилища в генератор используется

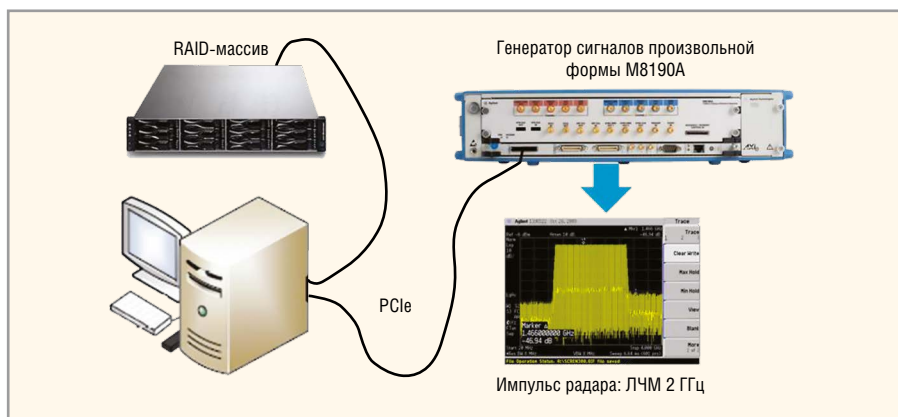


Рис. 1. Схема потоковой передачи данных

предварительный расчёт импульсов. Это даёт возможность обойтись без быстрых вычислений в режиме реального времени и позволяет использовать менее мощные процессоры.

Но иногда может потребоваться быстрая реакция на непредвиденные события, которые влияют на параметры последующих импульсов РЛС. Если это необходимо, то можно использовать следующий подход (см. далее).

3. Поточковые данные можно рассчитывать в режиме реального времени на внешнем процессоре. Это называется алгоритмическим генерированием данных в реальном времени. Конечно, производительность, необходимая для создания данных, сильно зависит от мощности процессора, а также от сложности и эффективности алгоритма.

Генератор сигналов произвольной формы должен уметь компенсировать отклонения в скорости передачи данных из ПК в генератор. Для этого используется кольцевой буфер памяти сигнала в генераторе. Это значит, что ПК может записывать импульсы в этот кольцевой буфер, а генератор – одновременно считывать данные из кольцевого буфера и передавать их на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) для формирования импульсов.

### Вставка пустых интервалов – синхронизируемая потоковая передача

В большинстве случаев импульсы РЛС имеют скважность в диапазоне от 1:5 до 1:100. Кроме того, последовательность импульсов РЛС часто имеет периодический характер. Поскольку в промежутках между импульсами сигнал не передаётся, сжатие потока может выполняться за счёт передачи из ПК в генератор только самих импульсов, а не промежутков между ними. В результате достигается коэффициент сжатия, идентичный скважности. Для генерирования следующего импульса используется синхросигнал, подаваемый на генератор с частотой повторения импульсов.

Для восстановления импульсов внутри генератора можно использовать механизм так называемой синхронизируемой потоковой передачи (см. рис. 2).

Память генератора сигналов произвольной формы организована в виде кольцевого буфера и разделена на отдельные сегменты. Каждый сегмент содержит импульс РЛС. Персональный компьютер, передающий данные в генератор, заполняет кольце-

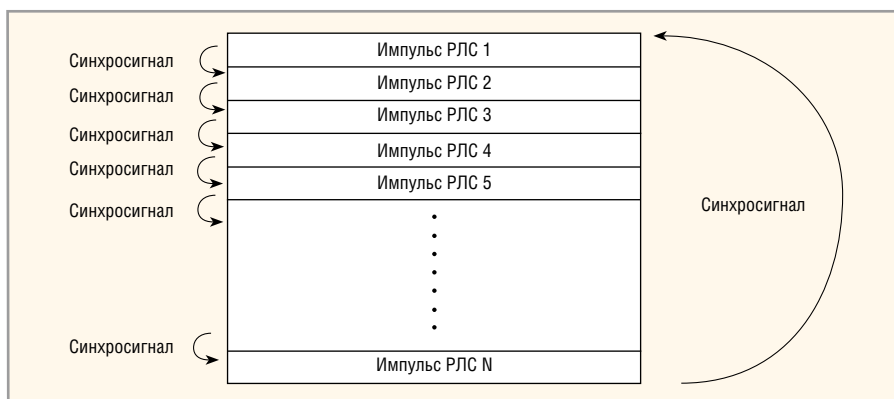


Рис. 2. Механизм синхронизируемой потоковой передачи

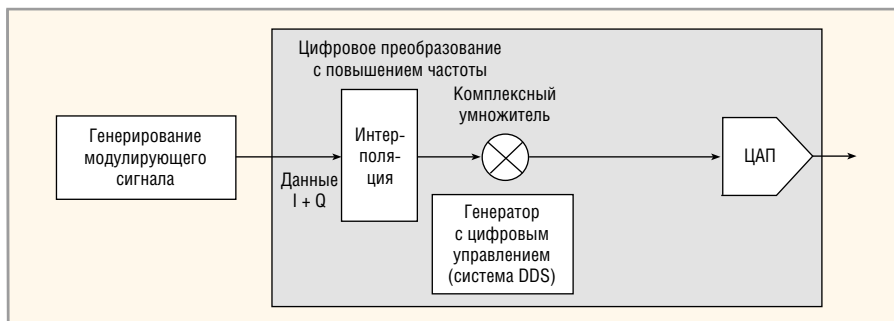


Рис. 3. Цифровое преобразование с повышением частоты и интерполяция

вой буфер импульсами. По первому синхросигналу генерируется импульс РЛС 1. В промежутке между импульсами  $n$  и  $n+1$  генератор передаёт заранее заданное значение. При поступлении следующего синхроимпульса генерируется импульс РЛС  $n+1$ .

Эффективность этого механизма демонстрирует следующий пример:

- для генерирования сигнала с полосой 2 ГГц генератор должен работать с частотой дискретизации 4,8 Гвыб/с. Если его ЦАП имеет разрешение 14 разрядов, то скорость передачи несжатого потока импульсов РЛС должна составлять 67,2 Гбит/с;
- скважность импульсов в этом примере составляет 1:20. При использовании механизма синхронизируемой потоковой передачи для восстановления данных внутри генератора, скорость потока сжатых данных снижается в 20 раз и становится равной 3,36 Гбит/с. И если скорость 67 Гбит/с значительно превосходит пропускную способность шины PCIe, то 3,4 Гбит/с может быть передана по этой шине.

### ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ С ПОВЫШЕНИЕМ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРПОЛЯЦИЯ

Как показано на рисунке 3, генератор предлагает интерполяцию в сочетании с фильтрами цифровой реконструкции (коэффициент от 3 до 48). Для преобра-

зования с повышением частоты используется генератор с цифровым управлением (NCO). Этот механизм имеет два основных преимущества:

1. Интерполяция, фильтрация и IQ-модуляция на основе сигнального процессора могут быть выполнены с требуемой точностью, позволяя избежать возникновения паразитных сигналов.
2. Интерполяция может использоваться для сжатия и восстановления данных, уменьшая полосу потока.

Для повышающего преобразования сигнала в желаемый частотный диапазон могут применяться различные методы:

- аналоговое преобразование;
- программное преобразование;
- цифровое преобразование.

### Аналоговое преобразование

Традиционный метод. Программа генерирует модулирующий сигнал IQ и загружает его в генератор сигналов произвольной формы. Эти IQ-данные подаются на векторный генератор сигналов, имеющий широкополосные входы I и Q. Обычно на такой генератор можно подавать сигналы IQ частотой до 2 ГГц. Взглянув на результирующий радиосигнал (см. рис. 4), можно увидеть, что аналоговый модулятор вносит искажения.

Тональные сигналы расположены асимметрично по отношению

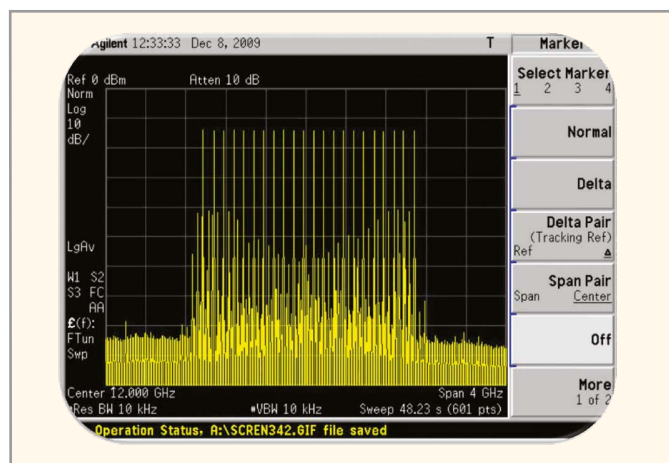


Рис. 4. Многотональный сигнал с 20 тонами в полосе 2 ГГц, полученный путём аналогового преобразования с повышением частоты

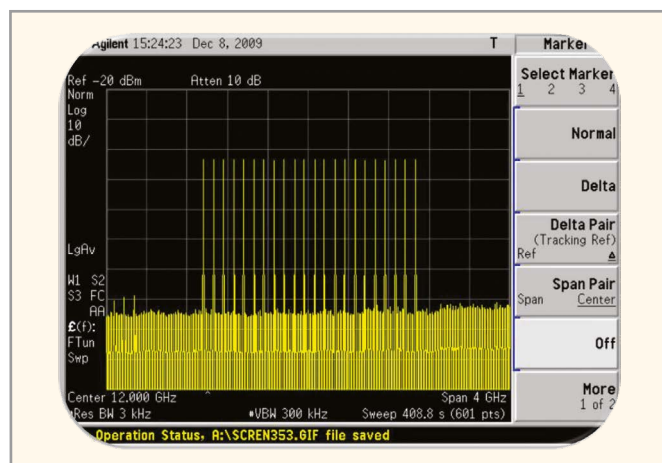


Рис. 5. Многотональный сигнал с 20 тонами в полосе 2 ГГц, полученный путём аппаратного цифрового преобразования с повышением частоты

к несущей, и можно заметить зеркальные частоты и остаточную несущую. Настройка дифференциального смещения сигналов I и Q ослабляет проникновение несущей частоты на выход. С помощью амплитудной коррекции можно добиться равномерности АЧХ в пределах 0,5 дБ. Регулируя фазовый сдвиг и относительную амплитуду сигналов I и Q, можно уменьшить зеркальные частоты примерно на 30 дБн.

Аналоговое преобразование часто требует длительных ручных подстроек для уменьшения разбалансов в тракте повышающего преобразования. Но, несмотря на подстройки, показанный сигнал не является идеальным. Кроме того, аналоговое преобразование не позволяет сжимать данные.

### Программное преобразование

Программные средства, такие как MATLAB, позволяют генерировать данные промежуточной частоты (ПЧ). В этом случае программа рассчитывает данные полосы частот IQ и математически преобразует их в ПЧ. Такой подход обеспечивает достаточно хорошее качество сигнала, поскольку требуемый сигнал можно рассчитать с любой необходимой точностью. Но за точность приходится платить временем воспроизведения. Например, если необходимо создать сигнал с полосой 100 МГц в диапазоне от 1,9 до 2,0 ГГц, то частота дискретизации генератора определяется промежуточной частотой, а не полосой сигнала. В этом случае потребуется частота, в 2,4 раза превышающая 2 ГГц, что равно 4,8 Гвыб/с. Для полосы частот сигнала IQ потребуется всего 2,4 раза по 100 МГц, что равно 240 Мвыб/с. Это значит, что время воспроизведения в данном примере

будет в 20 раз меньше при том же объёме памяти сигнала.

### Аппаратное цифровое преобразование

Аппаратное цифровое преобразование в сочетании с интерполяцией, цифровой фильтрацией и цифровой IQ-модуляцией позволяет генерировать неискажённый ПЧ-сигнал (см. рис. 5) и эффективно использовать имеющуюся память.

Возьмём пример из программного преобразования: для создания сигнала с полосой 100 МГц необходимо генерировать пары выборок IQ со скоростью 120 Мвыб/с. Генератор может работать с 48-кратной передискретизацией. Это значит, что ЦАП будет работать на частоте, в 48 раз превышающей 120 Мвыб/с, т.е. 5,76 Гвыб/с. Генератор с цифровым управлением можно настроить на генерирование центральной частоты 1,95 ГГц.

По сравнению с программным преобразованием, аппаратное цифровое преобразование потребовало бы в 20 раз меньшую пропускную способность потокового интерфейса.

### Модификация импульсов РЛС с помощью цифрового процессора обработки сигналов, встроенного в генератор

Чтобы создать импульсы РЛС с очень малыми изменениями частоты, которые возникают при отражении от движущихся объектов (эффект Доплера), показанный на рисунке 3 цифровой синтезатор частоты (DDS) должен изменять параметры во время генерирования сигнала. Цифровой 72-разрядный управляемый генератор позволяет

достичь разрешения по частоте порядка нескольких пикогерц. В результате не требуется передавать одинаковые импульсы, отличающиеся лишь незначительным изменением в частоте несущей. Альтернативный подход заключается в однократной передаче импульса из ПК в генератор с последующим изменением с помощью сигнального процессора и многократной передачей на слегка отличающихся частотах.

Подобно частоте, можно менять и амплитуду, используя для этого внутренний умножитель сигнального процессора. Если же последовательности импульсов ничем не отличаются, кроме амплитуды, импульсы можно передать один раз, а амплитуду изменять с помощью сигнального процессора внутри генератора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсы РЛС идеально поддаются сжатию, что позволяет снизить скорость передачи данных между управляющим ПК и генератором. Если генератор поддерживает методы восстановления сжатых данных, то коэффициент сжатия может достигать десяти и более раз. Используя методы, описанные в этой статье, можно получить полосу модуляции до 2 ГГц при потоковой передаче импульсных сигналов РЛС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беата Хёне. Сравнение цифрового преобразования частоты с IQ-модуляцией при использовании широкополосного генератора сигналов произвольной формы. (Beate Höhne, Digital Up Conversion VS IQ modulation using a wideband Arbitrary Waveform Generator. IEEE Xplore 06334570. September, 2011).

