

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРИЕМНИКАМ С ВЧ-ВЫБОРКОЙ

ВЛАДИМИР ДЕРЕВЯТНИКОВ, инженер

Современные КМОП-преобразователи данных с непосредственной выборкой ВЧ-сигнала востребованы в телекоммуникационных приложениях, программно-определяемых радиосистемах, радарах, в испытательном и измерительном оборудовании. Недавно появившиеся преобразователи данных работают в широком динамическом диапазоне, сравнимом с высокопроизводительными преобразователями, осуществляющими выборку сигналов промежуточной частоты.

В состав новых преобразователей входит цифровой блок фильтрации. Из-за него скорость обработки данных уменьшается с 3–4 Гвыб/с примерно до той, на которой работают стандартные преобразователи, осуществляющие выборку сигналов промежуточной частоты (ПЧ).

Два основных фактора определяют быстрое внедрение этих преобразователей данных с очень высокой скоростью. Для удовлетворения постоянно растущего спроса на увеличение полосы пропускания требу-

ется более высокая скорость выборки; при этом повышение плотности и степени интеграции достигается, например, за счет удаления из приемника одного понижающего каскада. Современные программно-определяемые радиосистемы (SDR) или базовые станции сотовой связи должны одновременно работать с множеством частотных полос для агрегации несущих в нескольких лицензируемых LTE-полосах, чтобы обеспечить более высокую скорость передачи данных. С этой целью целесообразнее умень-

шить форм-фактор изделий и создать многополосную радиосистему, чем расширять возможности однополосной системы. Преобразователь данных с РЧ-выборкой позволяет исключить ПЧ-каскад (см. рис. 1), уменьшить занимаемое на печатной плате место и энергопотребление; при этом благодаря широкой зоне Найквиста обеспечивается одновременная выборка в нескольких частотных полосах.

Разработчики, которые намереваются использовать вместо оборудования с ПЧ-выборкой выборку в радиочастотном диапазоне, должны учесть четыре основных требования к: 1) чувствительности приемника; 2) возможности эффективной работы в присутствии внутриполосного источника помех; 3) фильтру для внешнеполосного блокатора; 4) производительности источника синхроимпульсов, используемых для выборки.

Некоторые из этих требований могут оказаться более строгими, чем остальные, в зависимости от нужд конкретного приложения. Давайте, например, рассмотрим проблемы использования АЦП двух разных типов и сравним результаты. С этой целью выберем 14-бит АЦП ADS4249 с частотой выборки 250 Мвыб/с, который используется в системе с ПЧ-выборкой, и 14-бит АЦП с частотой 3 Гвыб/с для систем с РЧ-выборкой.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКА

Одним из показателей работоспособности приемника является его чувствительность, или наименьший уровень мощности сигнала, который это устройство в состоянии восстановить и обработать (см. рис. 2). Слабые входные сигналы нельзя демодулировать, если шум приемника в демодулируемой полосе превышает уровень самого сигнала. Уровень собственного шума приемника, как правило, определяется коэффициентом шума (КШ) или

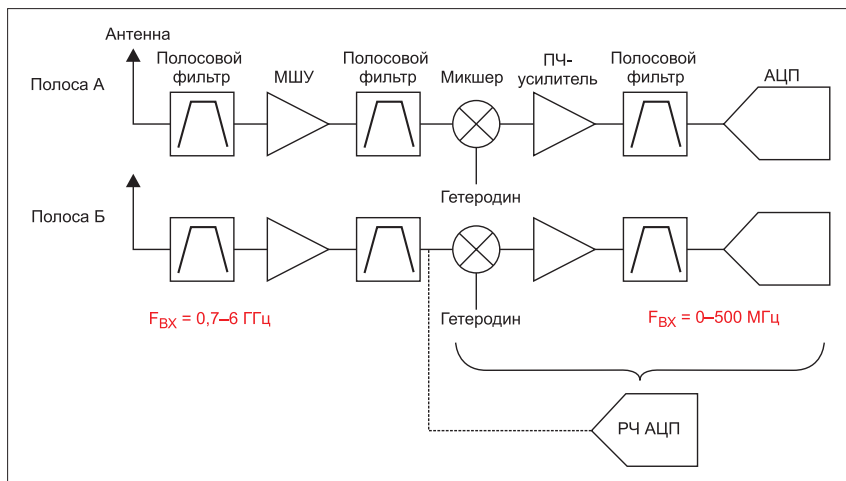


Рис. 1. Один АЦП с РЧ-выборкой заменяет собой несколько сигнальных цепей с ПЧ-выборкой

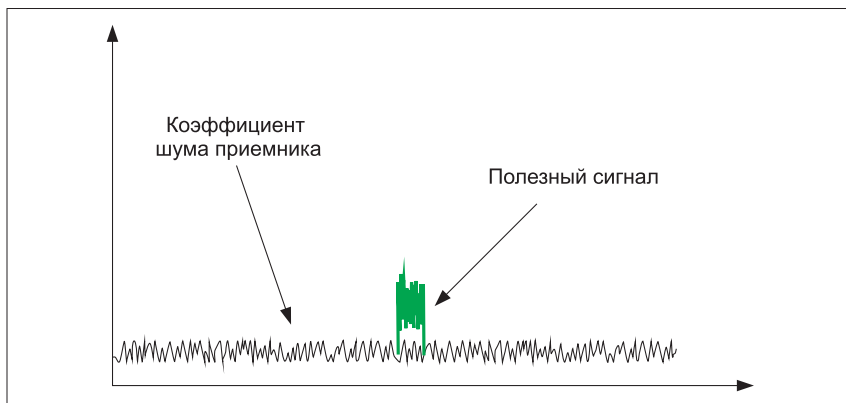


Рис. 2. Уровень полезного сигнала относительно собственного шума приемника

разностью с абсолютным тепловым шумом, приведенной к ширине полосы 1 Гц. Наиболее простой способ повысить КШ состоит в установке усилителя перед этим АЦП.

Значения коэффициента шума преобразователей с ПЧ- и РЧ-выборкой представлены в таблице 1.

Хотя значения КШ обоих преобразователей близки друг к другу, у преобразователя данных с ПЧ-выборкой – значительно выше коэффициент усиления благодаря микшеру и цифровому усилителю с переменным коэффициентом усиления ПЧ, что существенно уменьшает влияние КШ АЦП на чувствительность приемника. Таким образом, аналого-цифровому преобразователю с РЧ-выборкой требуется дополнительное усиление во входном каскаде (МШУ), чтобы использовать полностью шкалу АЦП и тем самым увеличить чувствительность приемника.

БЛОКИРОВКА ВНУТРИПОЛОСНОГО ШУМА

Иногда сигналы от источников помех проникают во входную полосу пропускания фильтра. Способность приемника блокировать внутриполосный шум является мерой того, насколько хорошо приемник демодулирует слабые сигналы в присутствии источников помех. Автоматическая регулировка усиления (АРУ) приемника позволяет удерживать уровни мощности источников шума ниже полного размаха входного напряжения АЦП во избежание насыщения. Однако гармоники блокатора, сгенерированные в АЦП при выборке, могут сравняться по величине со слабыми полезными сигналами, ухудшив способность приемника выполнять демодуляцию.

Поскольку частота входного напряжения намного ниже, у преобразователя данных с ПЧ-выборкой, как видно из таблицы 2, намного лучше значения SFDR относительно гармоник низких порядков (HD2, 3).

Однако разработчики все же используют преобразователи с РЧ-выборкой, у которых очень высокая производительность. Во избежание попадания гармоник малых порядков в полосу пропускания разработчики пользуются методом распределения частот: выбирают либо соответствующий частотный диапазон входного сигнала (например, L-полосу в случае SDR-систем военного назначения), либо подходящую частоту выборки (например, фиксированные РЧ-полосы в инфраструктуре связи). Высококачественные искажения современных преобразователей с РЧ-выборкой сравнимы с ВЧ-искажениями преобразователей с ПЧ-выборкой.

Таблица 1. Сравнение значений КШ преобразователей данных с ПЧ- и РЧ-выборкой

| Параметр | АЦП с РЧ-выборкой | АЦП с ПЧ-выборкой |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Частота выборки | 250 Мвыб/с | 3 Гвыб/с |
| Напряжение (пик–пик) | 2 В | 1,35 |
| Тепловой шум | 72,8 дБ | 62 дБ |
| Входной импеданс | 200 Ом (внешн.) | 50 Ом (внутр.) |
| Расчетное значение КШ | 24,2 дБ | 26,8 дБ |

Таблица 2. Динамический диапазон без паразитных составляющих у преобразователей данных с ПЧ- и РЧ-выборкой

| Параметр | АЦП с ПЧ-выборкой, $F_{вх} = 170$ МГц | АЦП с РЧ-выборкой, $F_{вх} = 1,8$ ГГц |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| HD2 (тип.) | 80 дБн | 63 дБн |
| HD3 (тип.) | 80 дБн | 67 дБн |
| другие гармоники (тип.) | 80 дБн | 80–85 дБн |

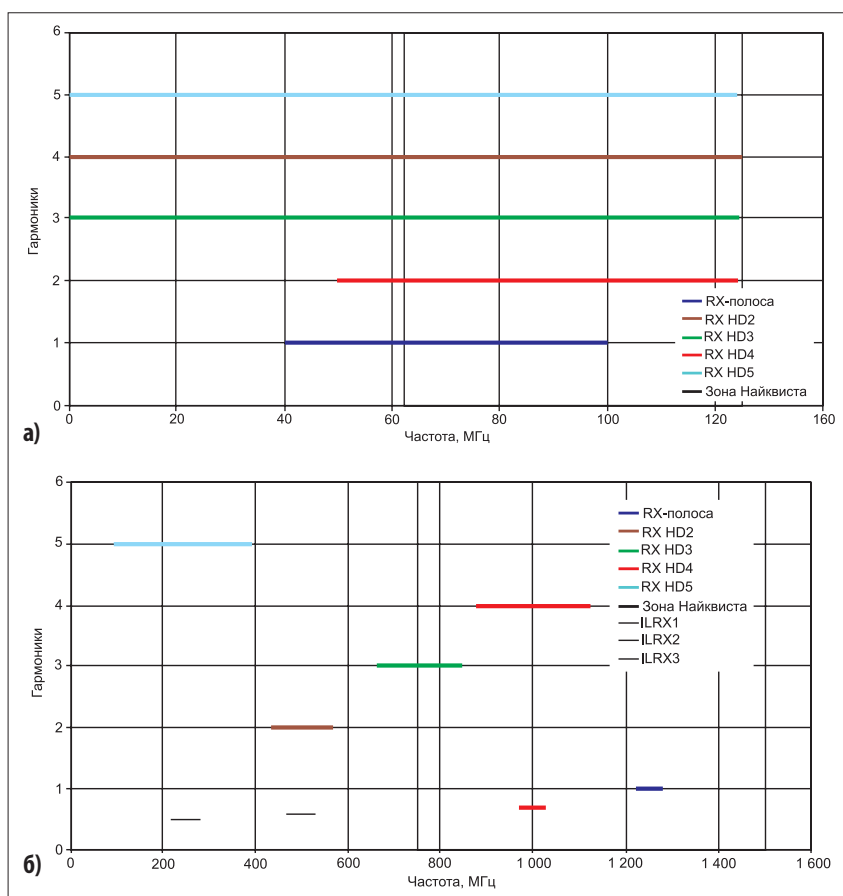


Рис. 3. а) частотный спектр полосы пропускания шириной 60 МГц с ПЧ-выборкой ($F_{выб} = 250$ Мвыб/с при центральной частоте 180 МГц); б) спектр в случае использования преобразователя с РЧ-выборкой ($F_{выб} = 3$ Гвыб/с при центральной частоте 1,750 ГГц)

Метод распределения частот иллюстрируется на рисунке 3, где представлен спектр шириной 60 МГц с центральной ПЧ равной 180 МГц и частотой выборки 250 Мвыб/с. В рассматриваемом случае невозможно избежать гармоник источника внутриполосных помех. Напротив, при той же ширине полосы пропускания с центральной частотой 1,75 ГГц и частоте выборки 3 Гвыб/с в динамическом диапазоне отсутствуют паразитные составляющие малого порядка и перемежающиеся всплески (см. рис. 4).

ТРЕБОВАНИЯ К ВНЕШНЕМУ БЛОКИРУЮЩЕМУ ФИЛЬТРУ

Независимо от архитектуры вход АЦП должен быть защищен от больших внеполосных помех, которые могут либо наложиться на внутриполосный сигнал, что приводит к превышению полного размаха входного напряжения и насыщению приемника, либо сгенерировать гармоники, которые перекроют внутриполосный полезный сигнал небольшой амплитуды.

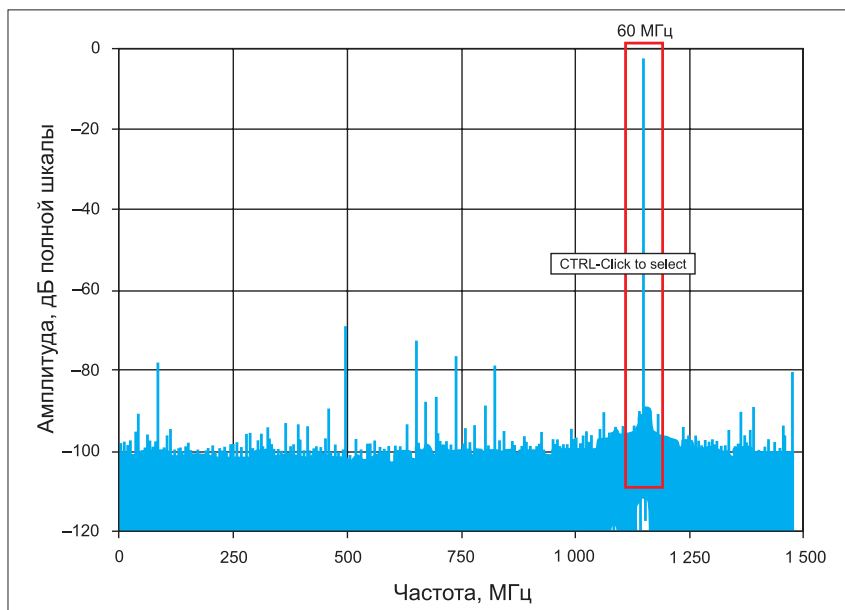


Рис. 4. График БПФ аналого-цифрового преобразователя ($F_{\text{выб}} = 3 \text{ Гвыб/с}$, $F_{\text{вх}} = 1,75 \text{ ГГц}$)

Поскольку у систем с дискретизацией промежуточной частоты зона Найквиста относительно невелика, помехи дискретизации и гармоники микшера находятся к ней достаточно близко. Из-за трудностей проектирования РЧ-фильтра с крутым спадом функция подавления помех, как правило, распределяется между РЧ- и ПЧ-фильтрами.

Разработка фильтрующего блока для систем с РЧ-выборкой в некоторой мере упрощается при использовании метода планирования частот. Он позволяет избавиться от гармоник микшера или гетеродина; при этом необходимо обеспечить подавление гармоник малых порядков или перемежающихся помех от внешнеполосных источников сигналов.

ТРЕБОВАНИЯ К СИГНАЛУ ТАКТИРОВАНИЯ

Тактовый сигнал для РЧ АЦП эквивалентен сигналу гетеродина в гетеродинном приемнике. Требования к фазовому шуму тактового сигнала в очень большой степени зависят от приложения. Как правило, чтобы получить репрезентативное значение тактового джиттера, целесообразно определить фазовый шум на типовых частотах смещения конкретного приложения в зависимости от тактового шума во всей (достаточно большой) зоне Найквиста.

Кроме того, поскольку в таких случаях используются РЧ-синхросигналы, появляются дополнительные трудности, к которым относится ослабление амплитуды сигнала при повышении его частоты.

Требуется, чтобы амплитуда тактового сигнала АЦП была достаточно высокой, чтобы минимизировать уровень собственных шумов. Кроме того, в многоканальных системах необходимо обеспечить минимальный фазовый сдвиг.

Как и в случаях с соответствующими АЦП с РЧ- и ПЧ-выборкой, имеется относительно небольшое количество высокоэффективных решений по тактированию с малым фазовым шумом при частоте синхронизации выше 1 Гвыб/с. Вполне возможно, что в качестве источника тактовых импульсов для РЧ АЦП разработчикам придется задействовать гетеродины с малым фазовым шумом, например LMX2582.

ВЫВОДЫ

Наличие преобразователей с РЧ-выборкой и широким динамическим диапазоном, к которым можно, например, отнести ADC32RF45, позволяет реализовать приемник с прямой РЧ-выборкой для большого ряда приложений. Переход с традиционной схемы гетеродина на прямое РЧ-преобразование не должен происходить за счет ухудшения качества радиосистемы. Однако следует придерживаться четырех основных требований к проектированию, которые мы обсудили в этой статье. ☞

ЛИТЕРАТУРА

1. Datasheets ADC12J4000, ADC32RF45, LMX2582.
2. Tommy Neu. *Direct RF conversion: From vision to reality*. Texas Instruments White Paper. May 2015.
3. Robert Keller. *Signal chain basics #45: Is high-speed ADC clock jitter being over-specified for communication systems?* Planet Analog. Sept. 2. 2010.