

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАННЫХ ДЛЯ СВЯЗИ 5G

МИХАИЛ СОКОЛОВ, инженер

Высокоскоростные преобразователи данных позволяют оцифровывать или генерировать сигналы непосредственно на радиочастотах. Эти устройства можно использовать вместо традиционных РЧ-компонентов, к которым относятся смесители и гетеродины с цифровой обработкой данных. Кроме того, благодаря использованию преобразователей с РЧ-выборкой, работающих на скоростях в несколько Гвыб/с в нескольких полосах в приложениях сотовой связи, сокращаются размеры и энергопотребление оборудования. В результате уменьшается количество выносных радиоблоков (RRH) на каждой базовой станции.

АЦП с РЧ-ВЫБОРКОЙ ДЛЯ МНОГОПОЛОСНЫХ ПРИЕМНИКОВ

В традиционных радиоархитектурах используется либо схема с сигналом промежуточной частоты (ПЧ) (см. рис. 1а), либо с нулевой ПЧ (см. рис. 1б). В первой из них сигнал с антенны усиливается и преобразуется с понижением частоты с помощью смесителя до ПЧ,

которая, как правило, составляет около 10% от исходной РЧ. Усилитель с регулируемым усилением усиливает сигнал ПЧ, который проходит через полосовой фильтр до оцифровки в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Схемы ПЧ обычно состоят из дискретных компонентов, поскольку в них трудно интегрировать фильтр ПЧ.

В схеме с нулевой ПЧ аналоговый квадратурный демодулятор усиливает РЧ-сигнал и понижает его частоту до основной полосы. После фильтрации сдвоенный АЦП преобразует комплексный аналоговый сигнал в цифровой. Приемник со схемой с нулевой ПЧ допускает интегрирование сигнала, учитывая АЦП

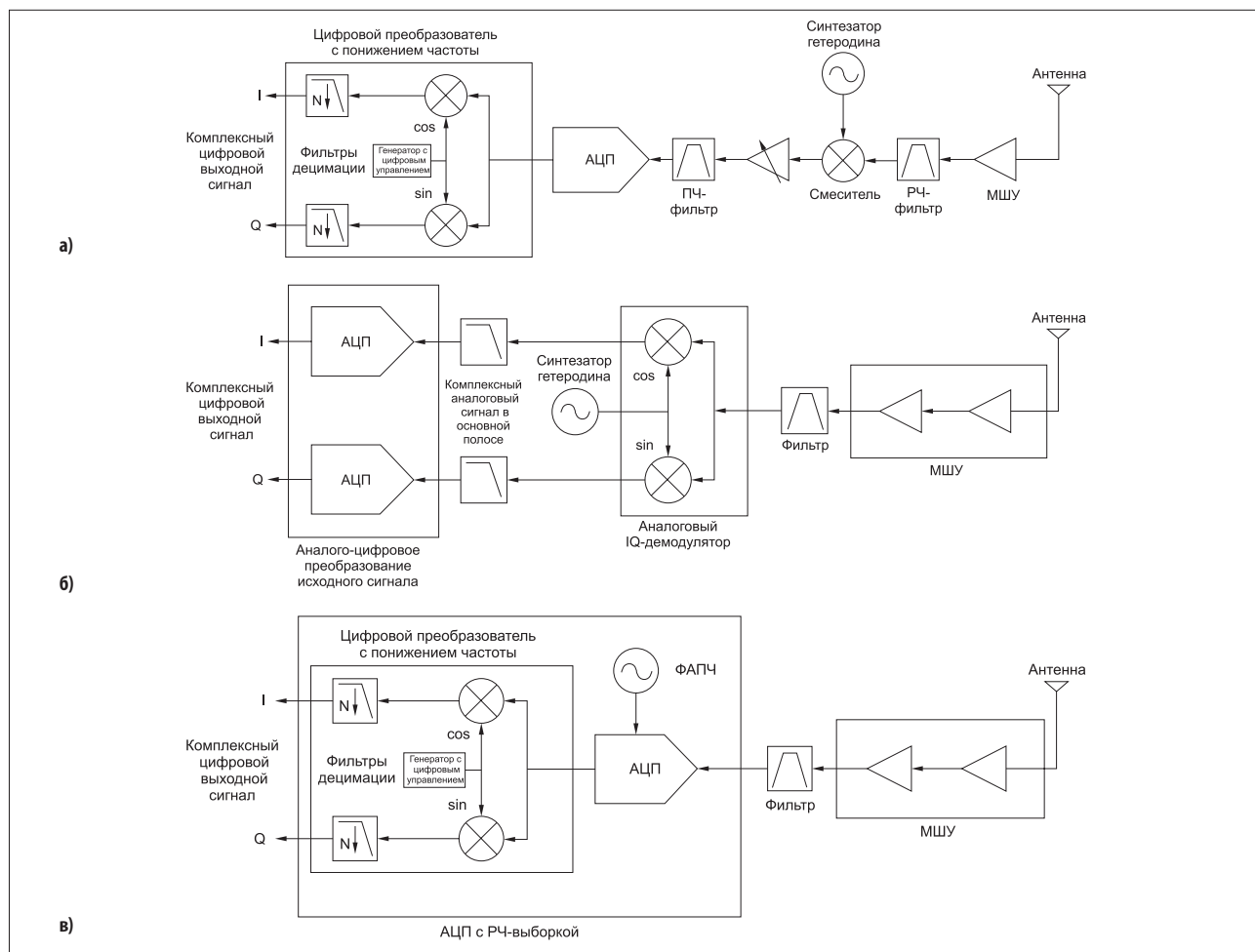


Рис. 1. Схема а) сигналом промежуточной частоты; б) нулевой ПЧ; в) РЧ-выборкой

и НЧ-фильтры, работающие в основной полосе частот.

На рисунке 1в показана схема с РЧ-выборкой. У этой схемы – тот же функционал, но каскады смесителя и основной полосы частот являются цифровыми. Они осуществляют прямое цифровое преобразование РЧ-сигнала с антенны после усиления и фильтрации.

Добавление второй полосы в схему с ПЧ или нулевой ПЧ, как правило, требует второй сигнальной цепи с дополнительными компонентами, что обусловлено ограничениями на ширину полосы частот. Для сравнения: производительность одного АЦП с РЧ-выборкой, работающего на скорости в несколько Гвыб/с, позволяет оцифровывать сигналы в нескольких радиочастотных полосах. В таких случаях добавление двух и более полос требует только дополнительных преобразователей с понижением частоты для преобразования добавленных полос в сигналы основной полосы.

Разумеется, схемы с РЧ-выборкой не стали бы привлекательными, если бы их производительность и рассеиваемая мощность были хуже, чем у архитектур с ПЧ или нулевой ПЧ. Поскольку применение КМОП-технологии позволило повысить скорость обработки данных и уменьшить мощность цифровых цепей, у АЦП с РЧ-выборкой – схожая производительность при меньшей мощности, чем у традиционных архитектур.

В таблице 1 сравниваются три рассматриваемые архитектуры для системы из четырех приемников с шириной полос по 100 МГц. В традиционной архитектуре применяются компоненты TRF37B32, LMH6521, ADC16DX370 и LMX2581 от компании Texas Instruments. Значения параметров оценочного модуля TSW16DX370EVM взяты из руководства пользователя.

Для архитектуры с нулевой ПЧ данные были взяты из спецификации стандартного двухканального интегрального приемопередатчика в режиме приема, а в случае схемы с РЧ-выборкой – данные для приемной стороны четырехканального трансивера с 9-Гвыб/с ЦАП и 3-Гвыб/с АЦП. Несколько ключевых рабочих параметров из таблицы 1 использовались в качестве отправных на частоте 2,6 ГГц.

Из таблицы 1 видно, что в однополосных приложениях размеры трансивера с аналоговым входным блоком с РЧ-выборкой и двух двухканальных трансиверов с нулевой ПЧ приблизительно одинаковы, а у трансивера с дискретной архитектурой ПЧ – в 10 раз больше. Потребляемая мощность у трансивера с нулевой ПЧ на 28% ниже,

Таблица 1. Сравнение архитектур счетверенного приемника на частоте 2,6 ГГц

Параметр	С ПЧ	С нулевой ПЧ	РЧ-выборка
Однополосная система			
Кол-во активных компонентов	7	2	1
Размер	2×60×40 мм	2×12×12 мм	17×17 мм
Рассеиваемая мощность	8,5 Вт	5,4 Вт	7,5 Вт
Двухполосная система			
Кол-во активных компонентов	14	4	1
Размер	4×60×40 мм	4×12×12 мм	17×17 мм
Рассеиваемая мощность (четыре канала приемника)	17 Вт	10,8 Вт	7,5 Вт
Данные из спецификаций (макс. усиление)			
Коэффициент шума	11 дБ	13 дБ	19 дБ
IP3	7 дБм	22 дБм	23 дБм
IP2	неприменимо ¹	45 дБм	неприменимо ¹
Внутриполосный SFDR	83 дБн	73 дБн	80 дБн
Искажения в боковой полосе (скорректированные)	отсутствует	75 дБн	отсутствует
Проникновение паразитного сигнала гетеродина	отсутствует ²	-85 дБ полной шкалы	нет гетеродина
Фазовый шум ФАПЧ (смещение – 1 МГц)	-135 дБн/Гц	-123 дБн/Гц	-126,7 дБн/Гц
Двухполосное управление усилением	да	да	единый доступ к динамическому спектру для обеих полос

¹ В полосе отсутствует искажение 2-го порядка.

² Паразитный сигнал гетеродина в полосу не проникает.

но его показатели хуже в присутствии помех.

В двухполосной системе можно использовать тот же аналоговый входной блок с РЧ-выборкой, что лишь минимально увеличит рассеиваемую мощность. У архитектур с ПЧ и нулевой ПЧ, применяемых в одно- и двухполосной системах, количество компонентов, размеры решений и рассеиваемая мощность в два раза больше. Преимущества однополосной схемы становятся еще более ощутимыми при добавлении третьей или четвертой полосы.

У архитектуры с РЧ-выборкой несколько более высокой коэффициент шума, чем в случае схем с ПЧ или нулевой ПЧ. Следовательно, у малошумящего усилителя (МШУ), установленного перед аналоговым входным блоком с РЧ-выборкой, коэффициент усиления должен быть больше, чтобы уменьшился коэффициент шума всей системы. Поскольку аналоговый входной блок с РЧ-выборкой принимает полезные сигналы малого уровня в присутствии большой помехи, его динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR) внутри полосы лучше, чем у схемы с нулевой ПЧ, и ниже уровень искажений в боковой полосе.

Однако у дискретной схемы с ПЧ имеется несколько преимуществ, к числу которых относятся SFDR и фазовый шум. Еще одним преимуществом

является возможность использования узкополосного фильтра ПЧ, например ПАВ-фильтра, который существенно подавляет внеполосные помехи.

В приложениях с многополосной РЧ-выборкой встроенный цифровой шаговый аттенюатор на входе одновременно управляет уровнем входного сигнала во всех полосах, хотя имеется возможность использовать отдельные внешние усилители с регулируемым КУ для каждой полосы. Наличие большой помехи в одной полосе, которую следует подавить в большей степени, влияет на шум в другой полосе, что уменьшает уровень чувствительности системы. Применение двух отдельных однополосных приемников позволяет независимо регулировать КУ в каждой полосе так, чтобы источник помех в одной полосе не влиял на чувствительность в другой полосе.

ЦАП С РЧ-ВЫБОРКОЙ В МНОГОПОЛОСНЫХ ПЕРЕДАТЧИКАХ

Далее мы рассмотрим использование в передатчике (нисходящем канале) ЦАП с РЧ-выборкой.

На рисунке 2а показана сигнальная цепь на базе архитектуры с нулевой ПЧ. Сдвоенные ЦАП генерируют комплексный аналоговый сигнал, который преобразуется с повышением частоты с помощью аналогового квадратурного модулятора и гетеродина

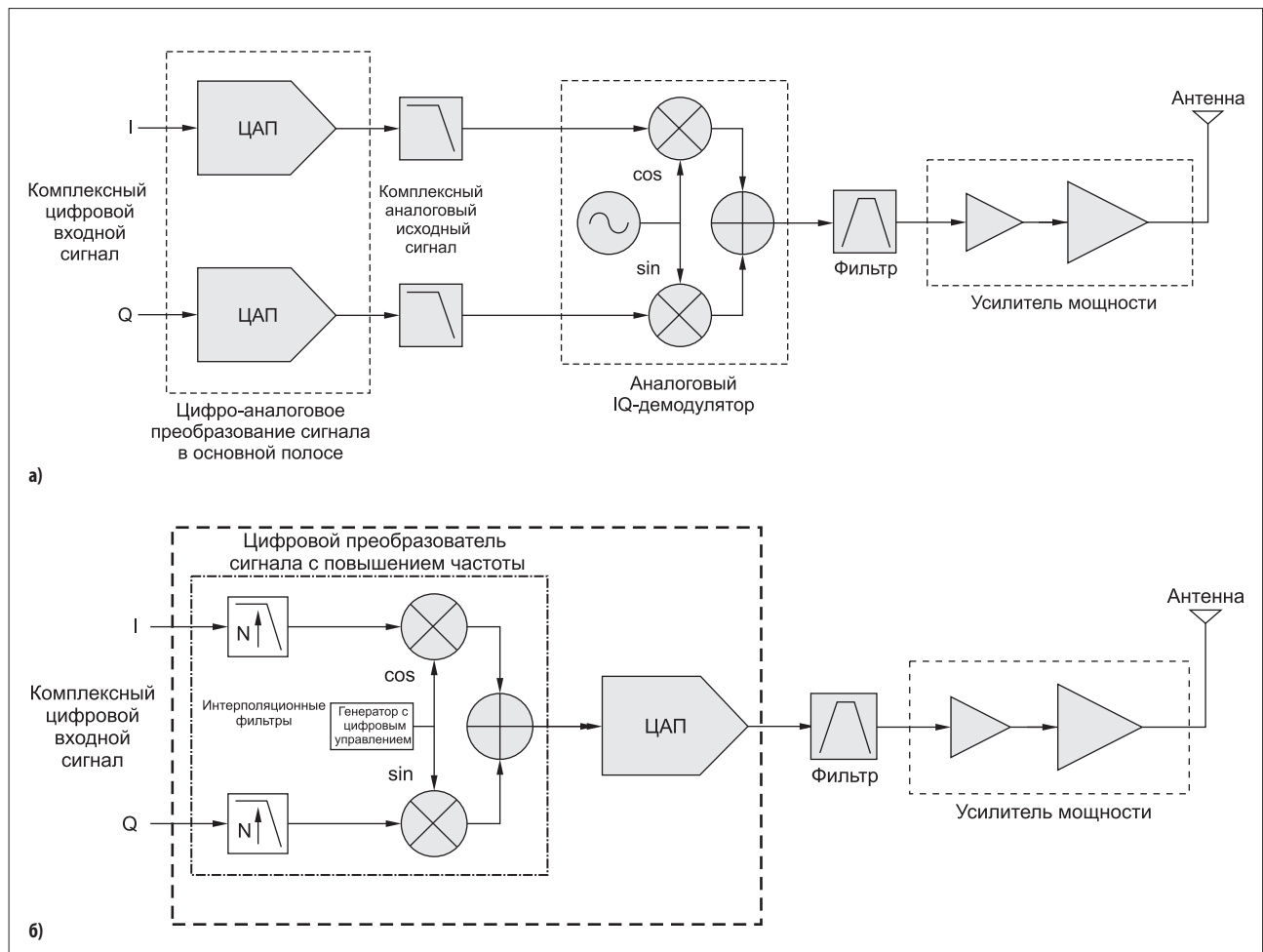


Рис. 2. Схемы с: а) нулевой ПЧ; б) РЧ-выборкой

в РЧ-сигнал. На рисунке 26 показана схема с РЧ-выборкой: при той же функциональности квадратурная модуляция осуществляется в цифровом виде путем смещения комплексного сигнала с сигналом генератора с цифровым управлением (NCO).

Чтобы добавить вторую полосу в схему с нулевой ПЧ, можно использовать либо цифровую комбинацию двух полос, для чего потребуются исходный сигнал с очень широкой полосой пропускания (что нецелесообразно для полос с разделением более 300 МГц из-за несоответствия между компонентами квадратурной модуляции I/Q), либо задействовать вторую сигнальную цепь.

Приложениям с РЧ-выборкой требуется только второй цифровой преобразователь сигналов с повышением частоты (относительно небольшая цепь, реализованная по КМОП-процессу) для генерации сигнала перед блоком ЦАП. Для реализации дополнительных полос количество цифровых преобразователей сигналов с повышением частоты легко наращивается.

Разумеется, схема с РЧ-выборкой не используется в тех случаях, если ее производительность и величина рассеиваемой мощности ниже, чем у схемы

с нулевой ПЧ. Благодаря тому, что КМОП-технология увеличила скорость и уменьшила рассеиваемую мощность цифровых цепей, эффективность ЦАП с РЧ-выборкой и меньшей мощностью сравнялась с показателями традиционных архитектур.

В таблице 2 сравниваются параметры системы с двумя передатчиками, построенной на схеме с нулевой ПЧ и на схеме с РЧ-выборкой. В состав традиционной

схемы входят компоненты DAC38J84, TRF3722 и TRF3705 от компании TI (данные взяты из руководства пользователя исходного проекта TSW38J84), а в системе с РЧ-выборкой применяются двухканальные ЦАП со скоростью 9 Гвыб/с. В качестве эталонного значения для динамического диапазона в этой архитектуре используются коэффициенты утечки в соседний (ACLR) и альтернативный (alt-ACLR) каналы для сигнала WCDMA (широкополосный

Таблица 2. Параметры системы на схемах с нулевой ПЧ и с РЧ-выборкой

Параметр	Схема с нулевой ПЧ	РЧ-выборка
Однополосная система		
Кол-во активных компонентов	3	1
Размер	45×70 мм	10×10 мм
Рассеиваемая мощность	3,37 Вт	3,01 Вт
Двухполосная система		
Кол-во активных компонентов	6	1
Размер	45×140 мм	10×10 мм
Рассеиваемая мощность	6,74 Вт	3,4 Вт
Рабочие параметры		
Выходная мощность	-8 дБм	-6 дБм
WCDMA ACLR	73 дБн	75 дБн
WCDMA alt-ACLR	81 дБн	78 дБн
Подавление в боковой полосе (нескорректированное)	40 дБн	нет боковой полосы

множественный доступ с кодовым разделением каналов). Чем эти коэффициенты выше, тем лучше.

СРАВНЕНИЕ СХЕМ С НУЛЕВОЙ ПЧ И РЧ-ВЫБОРКОЙ НА ЧАСТОТЕ 1,8 ГГц

Даже по сравнению с оптимизированным размером системы на основе архитектуры с нулевой ПЧ у схемы с РЧ-выборкой – большие преимущества по габаритам, рассеиваемой мощности и другим параметрам (см. табл. 2). При использовании трех–четырех полос преимущества становятся еще заметнее.

На рисунке 3 показан выходной спектр ЦАП DAC38RF83, передающего LTE-сигналы в полосе шириной 20 МГц в 3GPP-диапазонах 1, 3 и 7. Интервалы между сигналами составляют 830 МГц.

У ЦАП с РЧ-выборкой, которые генерируют многополосные сигналы в диапазоне в несколько ГГц, имеются некоторые ограничения. Главное из них заключается в ширине полосы и КПД усилителей мощности (УМ), которые обычно используются в системах с выносными радиомодулями. Недавние успехи, достигнутые в области совершенствования нитридо-галлиевой технологии, позволяют усилителям мощности работать в полосах частот, разделенных на 300–400 МГц. Ожидается, что в дальнейшем разделение между полосами станет исчисляться гигагерцами.

Далее мы сравним передатчик с прямой РЧ-выборкой и схему с аналоговым РЧ-сигналом. Кроме того, мы рассмотрим преимущества передатчика на основе ЦАП с прямой выборкой.

ПЕРЕДАТЧИКИ АНАЛОГОВОГО КОМПЛЕКСНОГО СИГНАЛА ПЧ

В традиционных архитектурах передатчиков используется местный гетеродин и смеситель для генерации сигнала с ПЧ. На рисунке 4 представлена базовая структурная схема передатчика аналогового комплексного сигнала ПЧ.

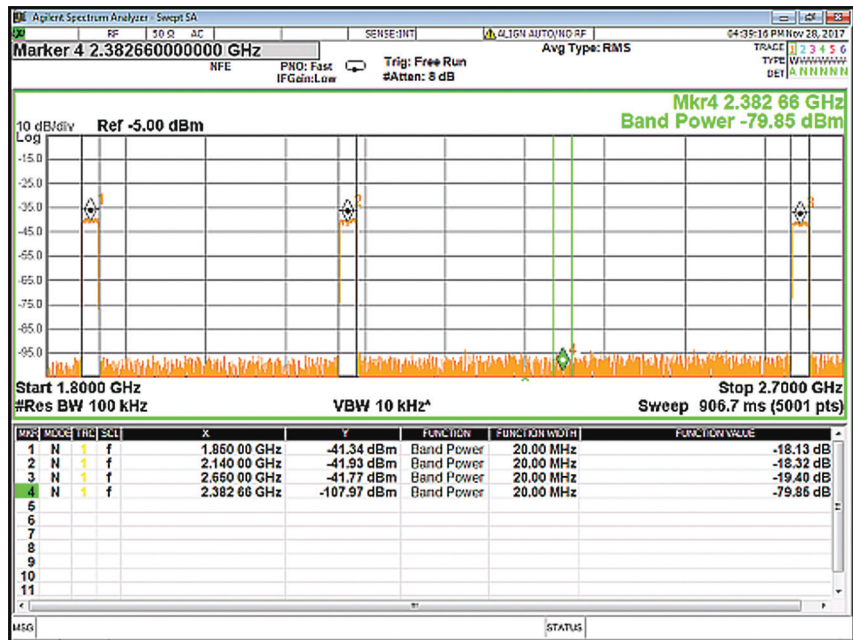


Рис. 3. Выходной спектр ЦАП DAC38RF83 с тремя 3GPP-полосами

Для работы с комплексным цифровым входным сигналом обычно используется LVDS-интерфейс для двух каналов данных – синфазного (I) и квадратурного (Q). В некоторых приложениях применяется интерполяция комплексных I- и Q-сигналов с помощью коэффициента R. Интерполяция смягчает требования к аналоговому фильтру и позволяет уменьшить внутрисполосный шум. Цифровой модулятор комплексного сигнала и генератор с цифровым управлением осуществляют микширование сигналов. Сдвоенные ЦАП преобразуют цифровые ПЧ-несущие I и Q в аналоговые сигналы.

В аналоговой области два параллельных сигнала проходят через НЧ-фильтры и поступают в соответствующие I- и Q-смесители. В эти смесители поступают сигналы с I- и Q-каналов гетеродина. В результате объединения двух сигналов в суммирующем модуле образуется комплексный модулированный сигнал на требуемой частоте.

При использовании этой стандартной архитектуры передатчика появляются искажения в гетеродине. Перед каскадом, усиливающим напряжение, установлен полосовой или ПАВ-фильтр, который уменьшает амплитуду нежелательного искажения. Спад амплитудно-частотной характеристики фильтра после частоты среза должен быть достаточно крутым, а частота гетеродина – стабильной, чтобы уменьшить нежелательные искажения в боковой полосе частот (на частоте $f_{\text{ГЕТ}} - f_{\text{ПЧ}}$), не ухудшив полезный сигнал (см. рис. 5а).

Как видно из рисунка 5а, любое фазовое несоответствие или отклонение коэффициента усиления от идеального значения между I- и Q-трактами аналогового сигнала становится причиной появления искажений в боковой полосе. Кроме того, сигнал гетеродина может просочиться сквозь каскад смесителя и появиться в выходном РЧ-сигнале

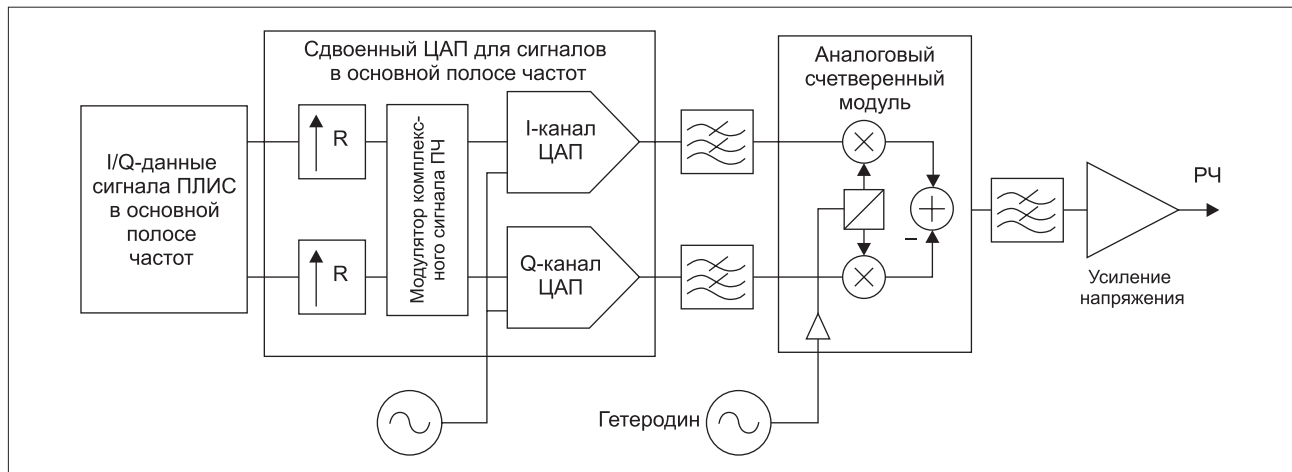


Рис. 4. Структурная схема РЧ-передатчика аналогового комплексного сигнала ПЧ

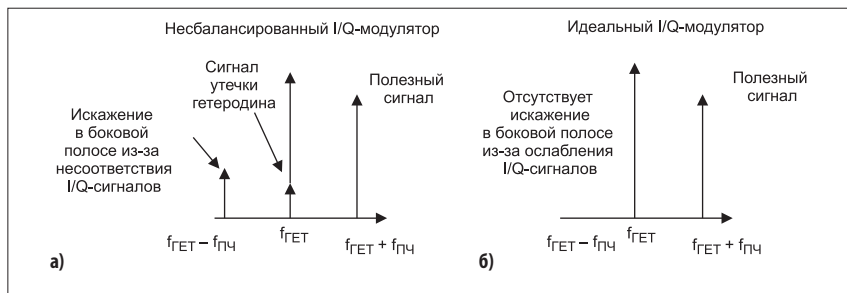


Рис. 5. а) неидеальные искажения от аналогового РЧ-передатчика (а) и от идеальных искажений от РЧ ЦАП с прямой выборкой (б)

в виде утечки. Эти неидеальные искажения ухудшают эффективность аналоговой системы, поскольку для их подавления требуются дополнительные фильтры и схемы калибровки, что, в свою очередь, повышает сложность и стоимость решения.

У такой архитектуры – ограниченная полоса пропускания выходного сигнала, поскольку частота выборки на входе сдвоенного ЦАП с интерполяцией в основной полосе частот ограничена объемом данных, передаваемых по относительно медленным интерфейсам LVDS или КМОП. Часто из-за этого ограничения возникает потребность в использовании аналоговых квадратурных модуляторов или блоков оборудо-

вания, работающих с разными частотами гетеродина, чтобы обеспечить поддержку разных РЧ-полос.

РЕШЕНИЯ НА БАЗЕ РЧ ЦАП

Сгенерированный на входе исходный сигнал оцифровывается с повышением частоты с помощью I/Q-интерполяторов, цифрового квадратурного модулятора и генератора с цифровым управлением. Тракты I/Q-данных в модуляторе идеально согласованы (благодаря цифровой реализации), что предотвращает появление искажений в боковой полосе (см. рис. 5б). Их отсутствие и несущая частота гетеродина исключают необходимость в использовании дорогостоящих и сложных ПАВ-фильтров. Далее

сигнал поступает в РЧ ЦАП для создания радиочастотного сигнала.

На входе интерфейса JESD204В передатчика РЧ ЦАП, показанного на рисунке 6, интерполяторы повышают частоту выборки относительно частоты оцифровки данных.

Передатчик с РЧ ЦАП заменяет собой аналоговый гетеродин с НСО-генератором, устраняя возможность просачивания сигнала гетеродина на аналоговый РЧ-выход. Ширина полосы выходного сигнала РЧ ЦАП и ширина зоны Найквиста ($f_{ЦАП}/2$) определяют максимальную радиочастоту.

На вход передатчика с РЧ ЦАП с последовательным интерфейсом JESD204В поступают высокоскоростные 5G-сигналы, благодаря чему обеспечивается более широкая полоса пропускания сигналов, чем у аналогового РЧ-передатчика аналогового комплексного сигнала ПЧ. По сравнению с этим передатчиком схема передатчика РЧ ЦАП позволяет упростить и уменьшить стоимость решения; при этом увеличивается ширина полосы пропускания и сокращается размер печатной платы.

СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР

Использование РЧ ЦАП позволяет сократить суммарную стоимость системы за счет меньших размеров печатной платы, количества компонентов и более простой схемы (см. табл. 3).

Таким образом, на следующем этапе развития связи востребованы передатчики с прямым преобразованием данных в РЧ-сигналы. Используемые в них интерполирующие и модулирующие 16-бит ЦАП характеризуются малым паразитным шумом и более простой реализацией. Благодаря высокой скорости передачи данных в диапазоне нескольких Гвыб/с обеспечивается большая ширина полосы при меньшей стоимости решений, применяемых в технологии связи 5-го поколения. \square

Таблица 3. Сравнение преимуществ и недостатков РЧ ЦАП и РЧ-передатчика аналогового комплексного сигнала ПЧ

РЧ ЦАП	РЧ-передатчик аналогового комплексного сигнала ПЧ
меньше занимаемая площадь на печатной плате	оптимальная обработка каждого компонента сигнала
меньше компонентов	хорошо освоенная технология
выход годных изделий больше	требуется индивидуальная плата для работы с каждой полосой
более простая РЧ-схема	необходима калибровочная схема, позволяющая уменьшить искажения сигналов I/Q и просачивание сигнала гетеродина
отсутствует проникновение сигнала гетеродина	
отсутствует рассогласование между каналами I и Q	
ширина полосы достигает нескольких ГГц	
стандартное оборудование для многополосной связи	

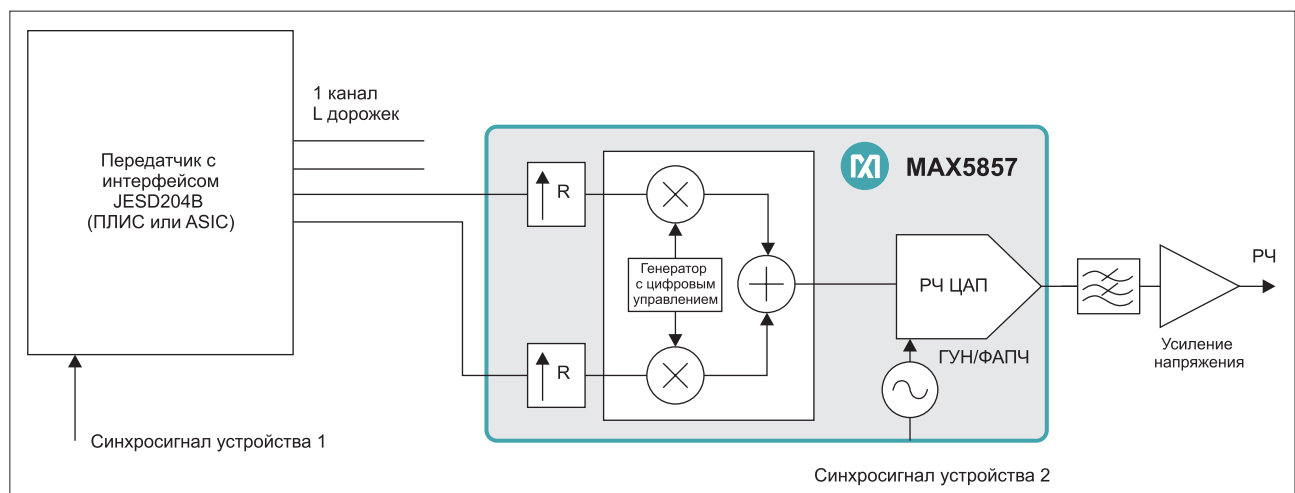


Рис. 6. Высокоскоростной последовательный интерфейс JESD204В на входе передатчика с РЧ ЦАП позволяет повысить частоту выборки входных данных