

Интеграция ВЧ-компонентов.

Экономия пространства

в высокопроизводительных системах

Достигнутый к настоящему времени уровень интеграции ВЧ-компонентов в полупроводниковой отрасли сильно зависит от конкретной области применения, и в задачах, требующих повышенного уровня характеристик, такие компоненты, как правило, встречаются реже. В статье рассмотрены варианты сигнальных трактов и областей, в которых обычно применяются дискретные ВЧ ИМС с высокими показателями. Проанализировав последние достижения в области интеграции компонентов, авторы отметили те области, в которых возможно достижение сокращения габаритов схем при одновременной поддержке высокого уровня характеристик.

Ашраф Эльгамрави
Имон Нэш

Введение

При выборе подхода к проектированию беспроводного приемопередатчика необходимо на раннем этапе определить, будет ли схема строиться при помощи дискретных компонентов. При реализации радиосистем популярных стандартов, например Bluetooth, ZigBee или GPS, нет особого смысла пытаться использовать дискретные компоненты. В то же время эти узкоспециализированные чипсеты с высокой степенью интеграции малоприспособны в любых других областях, за исключением систем конкретного стандарта. В общем случае можно сделать вывод о том,

что чипсеты с высокой степенью интеграции оптимальны с точки зрения занимаемого ими пространства и обычно обладают более низким уровнем характеристик по сравнению с дискретными компонентами, а также в большей степени ограничивают свободу при проектировании. В связи с этим возникает вопрос, существует ли такой уровень интеграции, который позволяет сэкономить пространство на печатной плате, но при этом обеспечивает приемлемую для пользователя гибкость применения?

Размер имеет значение

Начнем со сравнения габаритов типичных компонентов, применяемых в сигнальных трактах современных радиосистем. Современные активные компоненты, такие как квадратурные модуляторы/демодуляторы и смесители, обычно выпускаются в корпусах типа LFCSPP (Lead Frame Chip Package), которые, как правило, имеют площадь от 16 до 36 мм². Генераторы, управляемые напряжением (ГУН), и фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) могут обладать сравнительно большими габаритами. Площадь 100 мм² — не редкость для дискретного ГУН, в то время как площадь посадочного места для фильтров на ПАВ легко может составлять 35 мм².

Интеграция ГУН

Поскольку ГУН, как уже сказано выше, занимают большую площадь на плате, а сигнал гетеродина необходим в большинстве ВЧ приемопередатчиков, рассмотрим последние технологические достижения в этой области.

Два основных компонента, входящих в состав синтезаторов с фазовой автоподстройкой

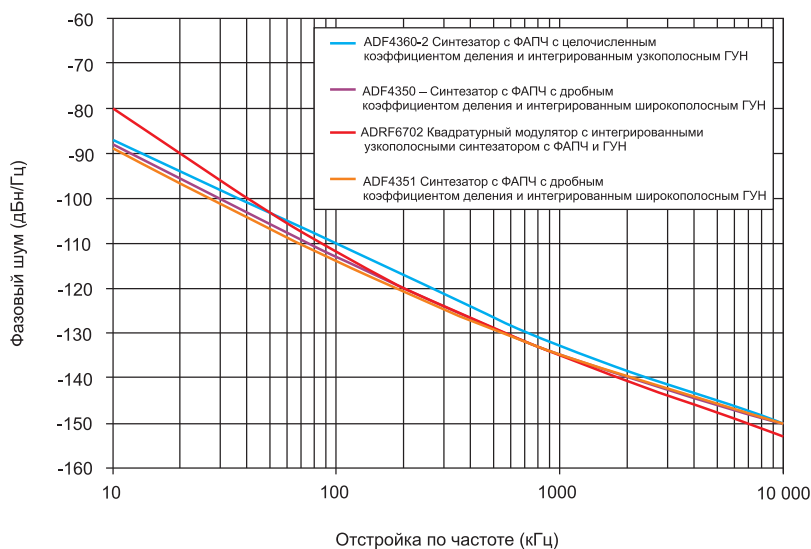


Рис. 1. Сравнение фазового шума интегрированных синтезаторов с ФАПЧ и ГУН на частоте 2,2 ГГц

частоты (ФАПЧ), — это непосредственно сама схема ФАПЧ и ГУН. Поскольку дискретные ГУН имеют сравнительно большую площадь, а иногда и высоту, разработки по интеграции ГУН и схем ФАПЧ ведутся компаниями по производству ИМС уже давно. Сама по себе интеграция ГУН в полупроводниковые ИМС не представляет особых сложностей, однако интеграция высококачественного ГУН является нетривиальной задачей. Когда мы говорим о высоком качестве, то подразумеваем фазовый шум, или чистоту спектра, сигнала. Меньший уровень фазового шума ГУН позволяет повысить чувствительность приемника и уменьшить модуль вектора ошибки (EVM) как передаваемого, так и принимаемого сигнала. На рис. 1 приведено сравнение фазового шума при разомкнутом контуре обратной связи для нескольких ГУН, которые интегрированы в ВЧ ИМС.

Две из приведенных кривых соответствуют микросхемам ADF4350 и ADF4351, которые образуют семейство синтезаторов с ФАПЧ с интегрированным ГУН. В дополнение к очень низкому фазовому шуму данные компоненты обладают широким диапазоном регулировки частоты банков ГУН, который равен целой октаве. Столь большой диапазон регулировки и банк делителей частоты позволяет этим устройствам с корпусом MFL, имеющим габариты 5×5 мм, работать в непрерывном диапазоне частот от 35 МГц до 4,4 ГГц. На рис. 2 изображено семейство кривых фазового шума ADF4351 при разомкнутом контуре обратной связи для ряда значений частот выходного сигнала. В данном случае ГУН работает на частоте 4,4 ГГц.

Фазовый шум при разомкнутом контуре обратной связи на частоте 4,4 ГГц изображен темно-синей кривой в верхней части рисунка. При подключении каждого делителя частота выходного сигнала уменьшается вдвое, а фазовый шум улучшается на 6 дБ. Благодаря интеграции ГУН и банка делителей частот на кристалле единственными внешними компонентами, которые необходимы для построения полнофункционального синтезатора, являются конденсаторы развязки по питанию и внешний петлевой фильтр.

Эволюция архитектур приемников

Рассмотрим эволюцию архитектур приемников и ее влияние на габариты схем. Если мы заглянем на несколько лет назад, то увидим, что типичный приемник с пространственно разнесенными антеннами уже имел неплохой уровень интеграции (рис. 3). В то же время компоненты, расположенные в тракте ВЧ до входа смесителя, а именно малошумящий усилитель (МШУ) и переменные аттенуаторы, являются дискретными. Кроме того, сигнал гетеродина для смесителя реализуется при помощи внешнего ГУН.

Теперь перенесемся на несколько лет вперед. На рис. 4 видно, что в большинстве задач комбинация синтезатора с ФАПЧ и дискретного ГУН может быть заменена одним интегрированным устройством. Кроме того, возрастает также степень интеграции в ВЧ-каскадах

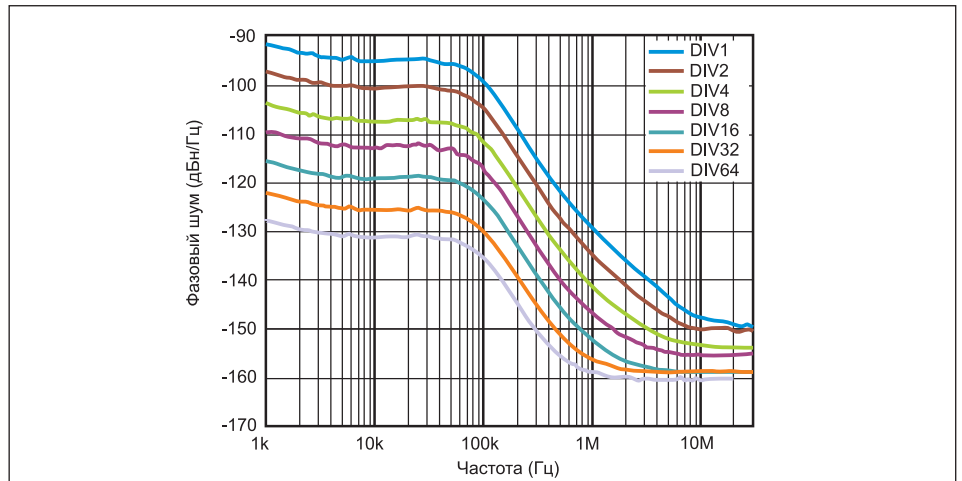


Рис. 2. Фазовый шум синтезатора с ФАПЧ ADF4351 при замкнутом контуре обратной связи (ГУН работает на частоте 4,4 ГГц)

до входа смесителя. В рассматриваемом примере усилитель, подключенный к выходу МШУ, интегрирован с переменным аттенуатором. Подобную интеграцию смежных компонентов сигнального тракта в одном корпусе мы называем «горизонтальной». В то же время входной МШУ по-прежнему реализован в виде отдельного компонента. Это вызвано, в первую очередь, несовместимостью технологий изготовления полупроводниковых схем, которые применяются при производстве МШУ (они обычно производятся по арсенид-галлиевой технологии рНЕМПТ) и при производстве типичных компонентов последующих каскадов приемника,

таких как цифровые шаговые аттенуаторы и широкополосные усилители.

При интеграции компонентов в приемнике с пространственно разнесенными антеннами возможен также «вертикальный» вариант. В приемнике, показанном на рис. 4, используются двухканальный АЦП и двухканальный драйвер АЦП, однако смесители и усилители ВЧ с переменным коэффициентом усиления по-прежнему являются одноканальными. Одним из критических факторов, которые необходимо принимать во внимание при вертикальной интеграции, является паразитная связь (взаимное проникновение сигналов)

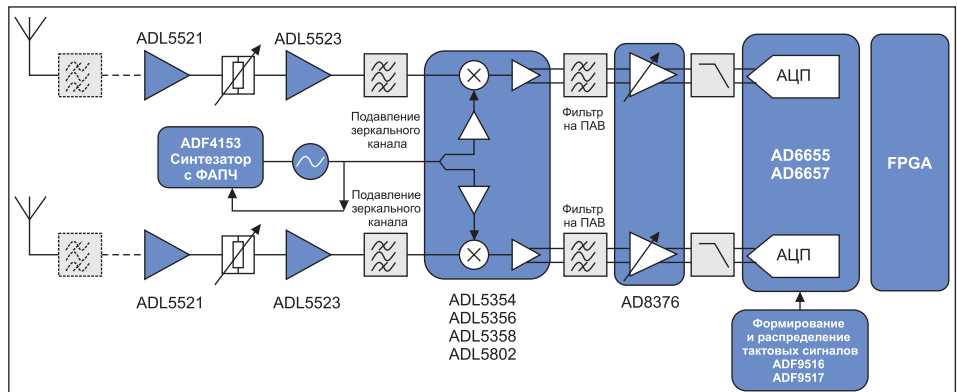


Рис. 3. Сигнальный тракт приемника с дискретизацией на ПЧ (2009 г.)

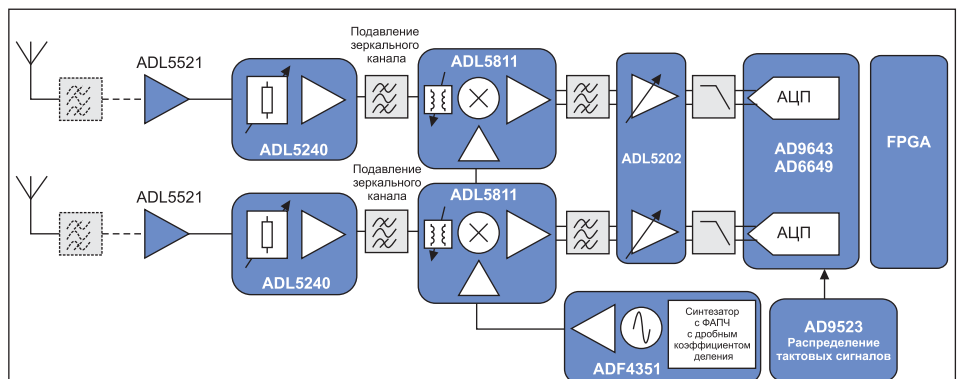
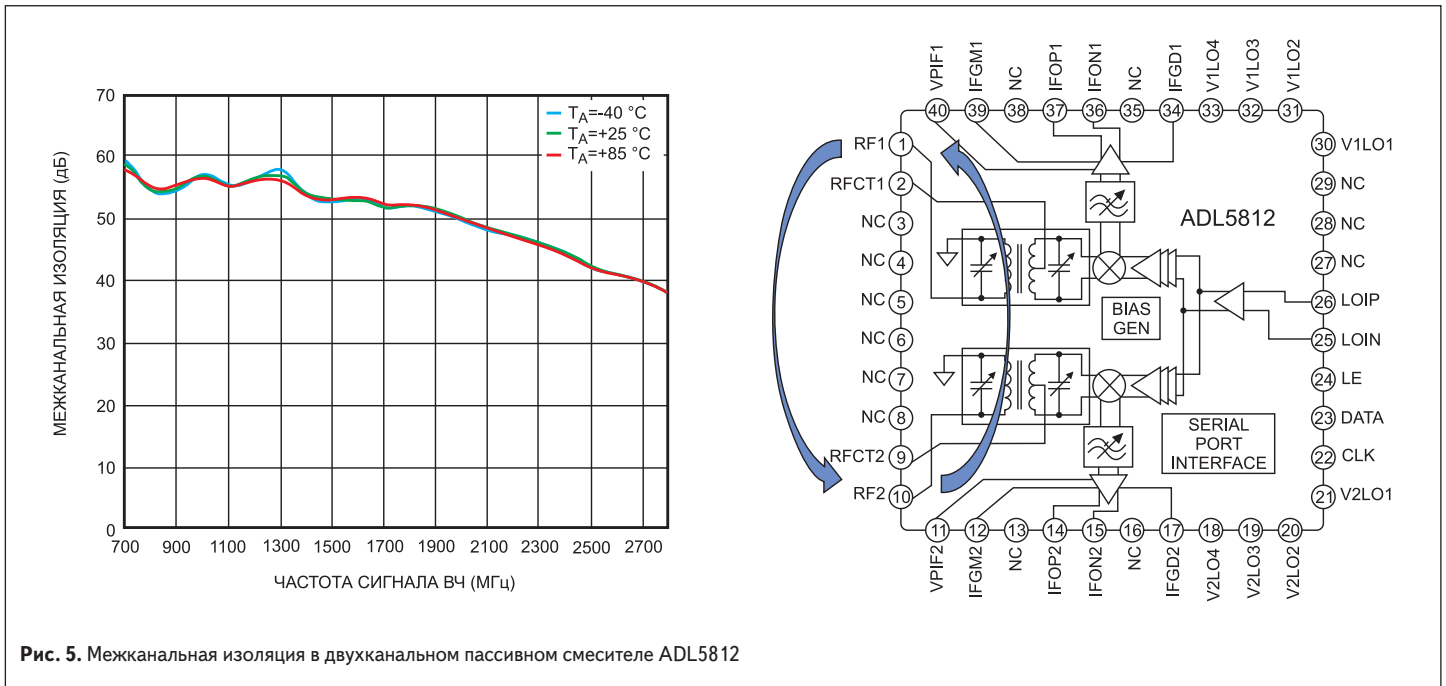


Рис. 4. Сигнальный тракт самого современного приемника с дискретизацией на ПЧ



между устройствами. На рис. 5 изображена частотная характеристика межканальной изоляции в двухканальном широкополосном пассивном смесителе с интегрированными усилителями промежуточной частоты (ПЧ) ADL5812. Обратите внимание на то, как возрастает уровень взаимного проникновения при увеличении частоты входного сигнала ВЧ.

Такое увеличение межканального проникновения сигнала очень характерно, поскольку с ростом частоты импеданс паразитных связей уменьшается. Из-за этого вертикальная интеграция в ВЧ-каскадах до входа смесителя не столь популярна. В случае смесителей обычно доступны одноканальные и двухканальные варианты устройств, и разработчик имеет возможность выбора между степенью интеграции и требуемым уровнем развязки между каналами.

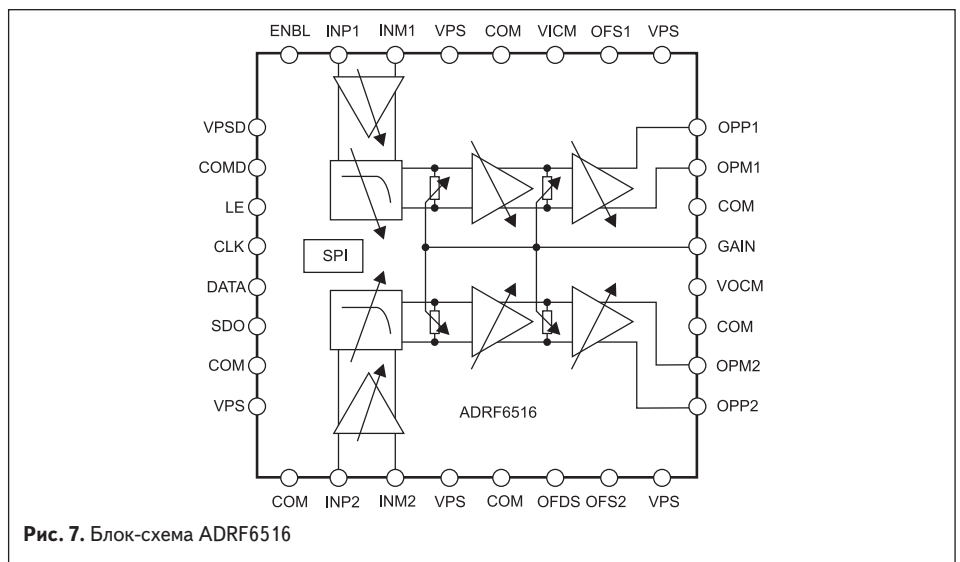
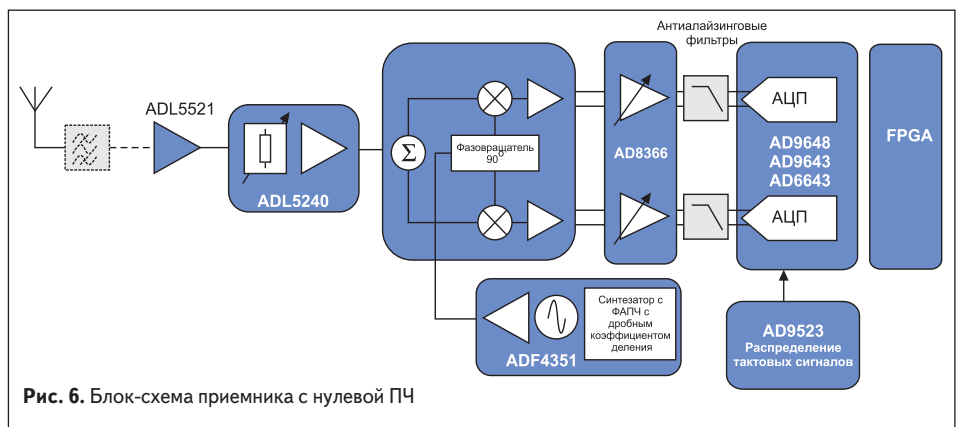
Экономит ли пространство приемник с нулевой ПЧ?

В последние годы возродился интерес к замене популярной архитектуры с дискретизацией на ПЧ так называемыми приемниками прямого преобразования (приемники с нулевой ПЧ). В них, как показано на рис. 6, сигнал ВЧ переносится в основную полосу частот (полосу частот модулирующих сигналов) за один шаг при помощи квадратурного демодулятора. Самой привлекательной особенностью этой архитектуры является исключение из схемы входного фильтра подавления зеркального канала и фильтра ПЧ на ПАВ, который имеет сравнительно большие габариты и вносимые потери. Данная архитектура дает выигрыш в габаритах, а также большую свободу при выборе частот, поскольку в ней отсутствует ПЧ и нет необходимости в частотном планировании каскадов. Диапазон рабочих частот приемника ограничен лишь рабочими диапазонами синтезатора и квадратурного демодулятора, а также входных МШУ. Благодаря доступности широкополосных квадратурных

демодуляторов и синтезаторов он приобрел довольно большую популярность, особенно в многодиапазонных переконфигурируемых радиоприемниках.

Приемники с нулевой ПЧ избавляют от необходимости применения фильтра ПЧ на ПАВ, который подавляет нежелательные внутриполос-

ные и внеполосные сигналы. Это определенно является преимуществом, однако работа по устранению этих сигналов теперь перекладывается на фильтр, применяемый для предотвращения спектральных наложений, на входе АЦП. Компонент ADRF6516, блок-схема которого приведена на рис. 7, представляет собой пример



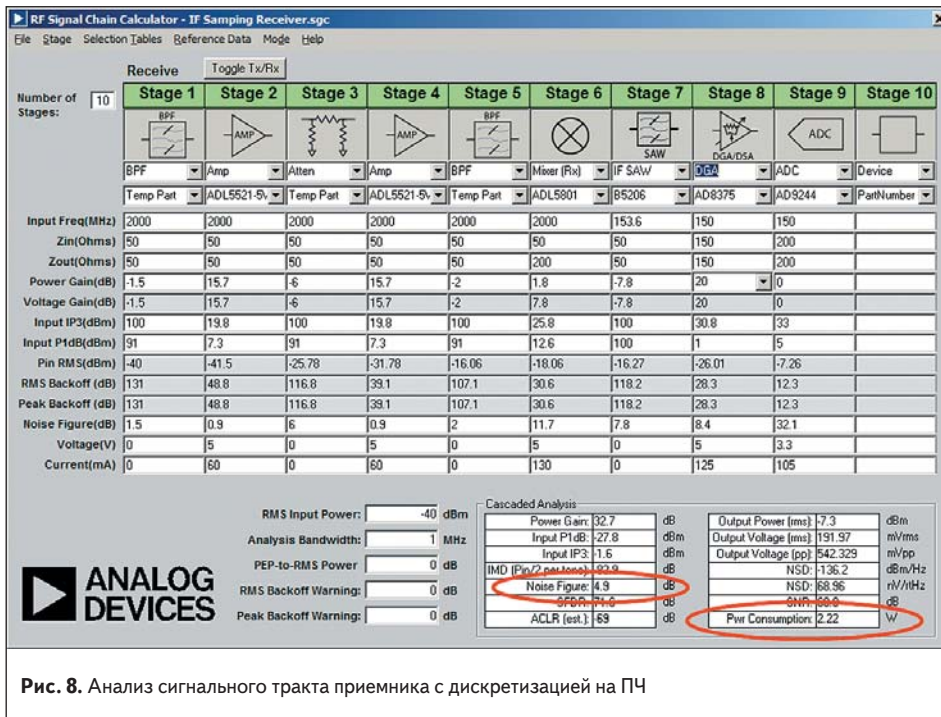


Рис. 8. Анализ сигнального тракта приемника с дискретизацией на ПЧ

потребляемая мощность возрастет до 3,17 Вт. Причина этого заключается в необходимости применения двух АЦП и двух усилителей-драйверов АЦП, в отличие от приемника с дискретизацией на ПЧ, в которых используется по одному АЦП и усилителю-драйверу. Поэтому в данном случае, даже несмотря на больший ток, потребляемый АЦП для дискретизации на ПЧ, необходимость применения двух АЦП для дискретизации в основной полосе частот и двух драйверов перечеркивает весь этот выигрыш в энергопотреблении. В то же время мы не учитываем в нашем анализе мощность, потребляемую схемой цифрового преобразования с понижением частоты, которая необходима в приемнике с дискретизацией на ПЧ. Данный фактор может привести к более сбалансированным результатам при сравнении двух подходов с точки зрения энергопотребления.

Эволюция архитектур передатчиков

Перейдем к рассмотрению развития архитектур передатчиков и проанализируем существующие возможности экономии пространства. Для передачи радиосигналов в диапазоне частот от 500 МГц до 6 ГГц довольно часто используются квадратурные модуляторы. Метод прямого преобразования получил большее распространение в передатчиках по сравнению с приемниками, в которых более популярными по-прежнему являются дискретизация на ПЧ или преобразование из ПЧ в основную полосу частот. В приведенном на рис. 10 примере сигнального тракта передатчика также присутствует дополнительный обратный канал, который используется для измерения искажений усилителя мощности и формирования обратной связи для алгоритма цифрового внесения предискажений (Digital Pre-Distortion, DPD) в сигнал в основной полосе частот. В данной конфигурации вместо настоящей архитектуры с нулевой ПЧ применяется так называемая архитектура с комплексной ПЧ, и ЦАП формирует выходной сигнал на частоте 120 МГц. Это позволяет использовать один сигнал гетеродина как для квадратурного модулятора, так и для смесителя схемы DPD, поскольку ПЧ в обратном канале также равна 120 МГц.

Архитектуры двухканальных ЦАП достигли такого уровня развития, что во многих случаях один и тот же компонент может использоваться в сигнальных трактах как с нулевой, так и с комплексной ПЧ. То есть такой компонент способен генерировать спектр в основной полосе (центрированный относительно 0 Гц) или осуществлять перенос сигнала в цифровой форме на комплексную ПЧ. С точки зрения интеграции наилучшими возможностями для обоих подходов обладают AD9122 (16 бит, 1,2 GSPS) и AD9125 (16 бит, 1 GSPS). Они имеют малые габариты корпуса (10×10 мм), низкую потребляемую мощность и дополнительные функции обработки сигнала.

Квадратурный модулятор ADRF6702, используемый в примере, является представителем семейства из четырех квадратурных модуляторов с интегрированным синтезатором с ФАПЧ/ГУН, перекрывающих диапазон частот от 400 МГц до 3 ГГц. Для удобства сигнал

устройства с высокой степенью интеграции, которое упрощает реализацию архитектуры приемника прямого преобразования. Он обеспечивает диапазон регулировки коэффициента усиления, равный 50 дБ, и программируемую в диапазоне 1–30 МГц с шагом 1 МГц полосу фильтра при компактных габаритах корпуса LFCSP (5×5 мм).

Сравнение архитектур с нулевой ПЧ и дискретизацией на ПЧ

Сравним две эти архитектуры с точки зрения показателей качества и потребляемой мощности. На рис. 8 показаны результаты анализа сигнального тракта типичного приемника

с дискретизацией на ПЧ в программном инструменте ADIsimRF. При заданном значении коэффициента усиления мы достигаем уровня пересечения с характеристикой интермодуляционных искажений третьего порядка (IP3) по входу и коэффициента шума, равных 27,8 дБм и 4,7 дБ соответственно, а потребляемая мощность составляет 2,2 Вт.

Если мы выполним в ADIsimRF моделирование для архитектуры с нулевой ПЧ при тех же параметрах сигнала (рис. 9), то обнаружим, что уровень IP3 по входу останется прежним, а коэффициент шума будет существенно ниже — 2,1 дБ. Это вызвано, в основном, отсутствием в архитектуре с нулевой ПЧ фильтра на ПАВ, вносящего высокие потери. При этом

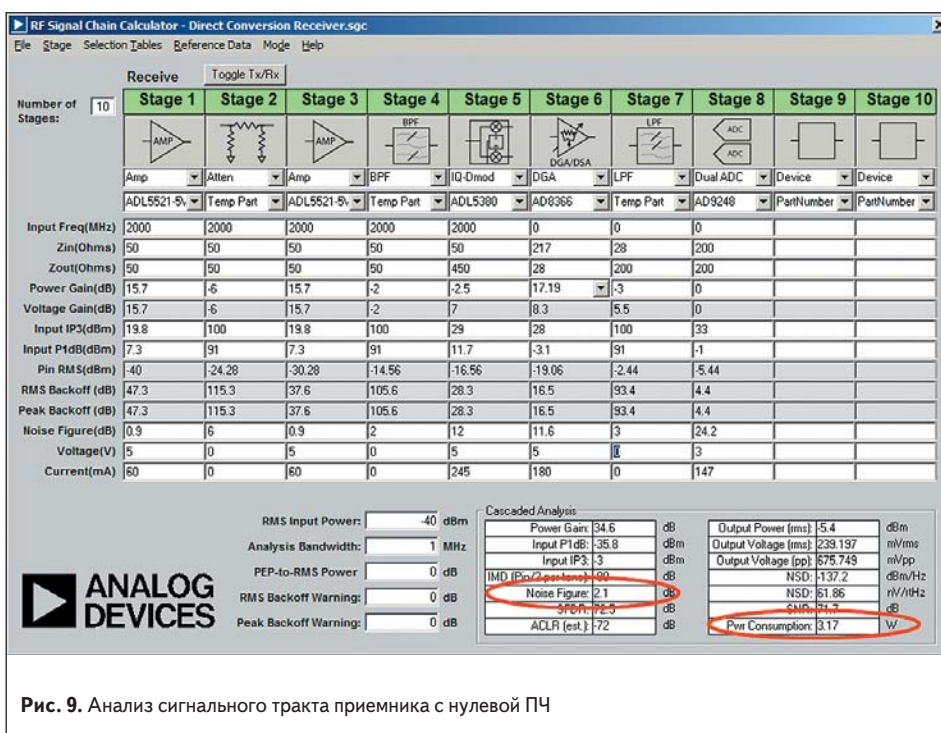
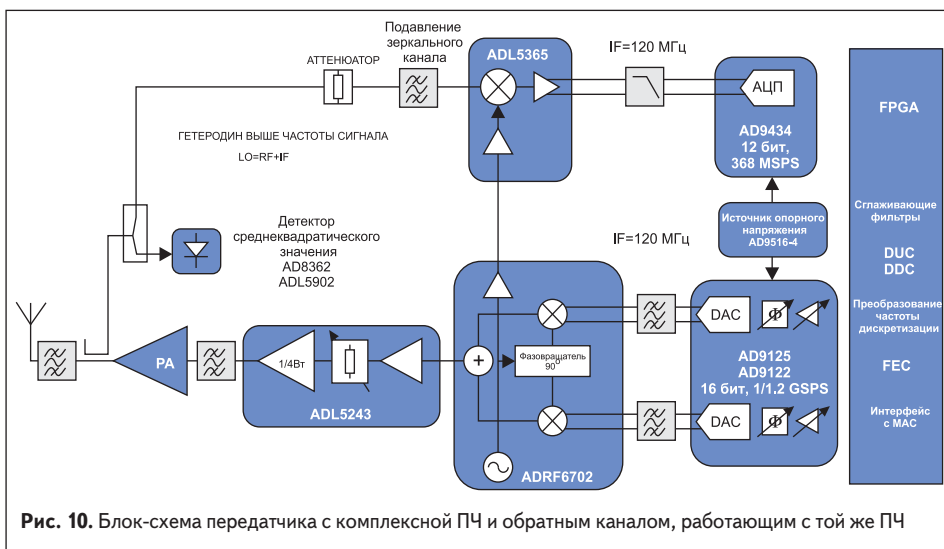


Рис. 9. Анализ сигнального тракта приемника с нулевой ПЧ



гетеродина в этих компонентах также выдается на внешний выход и может быть использован смесителем схемы DPD. Эта возможность упрощает применение общего гетеродина для передатчика и приемника обратного канала. Компания Analog Devices также предлагает семейство смесителей ADRF660X и семейство демодуляторов ADRF680X с интегрированным синтезатором с ФАПЧ и ГУН. Это является дополнительной иллюстрацией того, что одной из наиболее распространенных тенденций при создании высококачественных ВЧ-компонентов с высокой степенью интеграции является интеграция блока преобразования частоты и синтезатора с ФАПЧ/ГУН.

Этот сигнальный тракт также представляет собой хороший пример горизонтальной интеграции. В монолитной микросхеме усилителя ВЧ/ПЧ с переменным коэффициентом усиления

ADL5243, выпускающейся в миниатюрном корпусе LFCSP с габаритами 5×5 мм, интегрированы два усилителя ВЧ/ПЧ и цифровой шаговый аттенюатор. Первый усилитель — это согласованный широкополосный усилитель с фиксированным усилением, а второй усилитель представляет собой драйвер с внешним согласованием и мощностью выходного сигнала 0,25 Вт. Цифровой шаговый аттенюатор поддерживает диапазон регулировки 31,5 дБ с шагом 0,5 дБ. В родственном компоненте ADL5240 интегрированы цифровой шаговый аттенюатор и широкополосный усилитель с фиксированным усилением. В обоих случаях входы и выходы отдельных функциональных блоков выведены на внешние выводы компонента. Это обеспечивает высокую степень интеграции и одновременно позволяет поддерживать максимальную свободу проектирования.

Выводы

При реализации радиосистем для популярных стандартов беспроводной связи применение дискретных компонентов в схеме редко бывает оправданным, особенно на стороне терминала, для которой доступны специализированные чипсеты. Проектирование с использованием дискретных компонентов дает значительную свободу действий и более высокие показатели (например, уровни IP3 в диапазоне 25–45 дБм), однако платой за это является рост потребляемой мощности. Для достижения большей степени интеграции при одновременном поддержании высокого уровня показателей качества в настоящее время широко доступны ВЧ ИМС, в которых интегрированы блок преобразования частоты и синтезатор с ФАПЧ/ГУН. Эти ВЧ ИМС экономят значительную площадь печатной платы по сравнению с реализацией на дискретных компонентах.

Применение архитектур прямого преобразования в приемниках и передатчиках позволяет сэкономить площадь на печатной плате за счет исключения каскадов ПЧ и соответствующих цепей фильтрации, однако при этом может не быть существенного выигрыша в потребляемой мощности по сравнению с традиционным супергетеродинным приемопередатчиком. В то же время архитектуры прямого преобразования обладают значительной гибкостью с точки зрения рабочих частот, особенно когда синтезатор имеет частотный диапазон выходного сигнала в несколько октав.

И, наконец, чтобы гарантировать удовлетворение заявленных требований при выборе двухканального интегрированного решения, необходимо уделить пристальное внимание межканальной изоляции. ■