

КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ НА БАЗЕ РАДИОТРАНСИВЕРОВ ANALOG DEVICES

Интеграция архитектуры прямого преобразования в монолитное приемопередающее устройство обеспечивает решение многих свойственных этой технологии проблем и открывает ей путь для использования в системах следующего поколения. В статье на примере двух радиотрансиверов AD9361 и AD9371 от компании Analog Devices, выполненных на КМОП-кристаллах, рассматриваются новые возможности, которые отвечают насущным потребностям авиакосмической и оборонной промышленности.

Платформам авиакосмического и военного назначения нового поколения необходимы решения, выходящие за рамки тех, которые обеспечиваются только путем оптимизации отдельных компонентов. Интеграция программного управления и когнитивного радио в системы таких платформ требует не только использования более высоких частот, но и большей ширины полосы пропускания. С этой целью необходимо применять перестраиваемые фильтры, вместо статических. Кроме того, использование общей платформы позволит сократить сроки разработки и производственные издержки, упростит и улучшит взаимодействие между разными системами. Такая общая платформа требует, чтобы ее радиочастотная составляющая обеспечивала максимальную производительность всех приложений с очень разными архитектурами. Наконец, габариты и энергопотребление будущих платформ также должны отвечать новым требованиям.

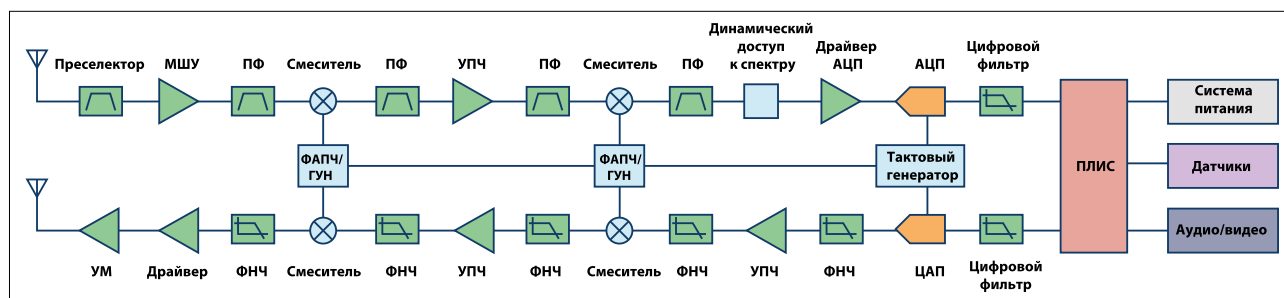
Портативные радиостанции военного назначения становятся более функциональными и сложными. В то же время, требуется повысить эффективность использования их аккумуляторных батарей. Поскольку небольшим беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) не хватает тех возможностей генерации электропитания, которые имеются у самолетов, каждый милливатт мощности, потребляемой РЧ-системой, непосредственно отражается на весе аккумуля-

торной батареи БПЛА. Следовательно, сокращается и время его автономного полета. Чтобы решить указанные проблемы и создать новое поколение авиакосмических и оборонительных платформ нового поколения, необходимы новые архитектурные решения.

СНИЖЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУПЕРТЕТЕРОДИННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

С момента своего создания супергетеродинная архитектура была основой большинства радиосистем для авиакосмических и оборонительных комплексов. Эта архитектура используется и в военных радиостанциях, и в оборудовании канала связи БПЛА, и в приемниках сигналов радиотехнической разведки (SIGINT). Преимущества этой архитектуры очевидны: правильно построенная схема распределения частот позволяет существенно уменьшить паразитные излучения, обеспечивает достаточную полосу пропускания канала и высокую избирательность, которые задаются фильтрами промежуточной частоты. Кроме того, благодаря покаскадному распределению усиления достигается приемлемый компромисс между оптимизацией шума и линейностью. Базовая архитектура современного высокопроизводительного супергетеродинного трансивера специального назначения приведена на рис. 1.

На протяжении более 100 лет использования супергетеродинной архитектуры были достигнуты значительные успехи



▲ Рис. 1. Базовая архитектура современного высокопроизводительного супергетеродинного радиотрансивера

AD9361 — ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА:

- радиотрансивер 2×2 с интегрированными 12-разрядными ЦАП и АЦП;
- рабочий диапазон: 70 МГц...6,0 ГГц;
- поддержка работы в режимах TDD и FDD;
- настраиваемая полоса канала: от менее 200 кГц до 56 МГц;
- дуальные приемники: 6 дифференциальных или 12 несимметричных входов;
- превосходная чувствительность приемника, коэффициент шума не более 2,5 дБ;
- управление усилением РЧ-тракта;
- контроль в режиме реального времени и сигналы управления для ручной регулировки;
- независимая автоматическая регулировка усиления.

AD9371 — ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА:

- сдвоенные дифференциальные передатчики (Tx);
- сдвоенные дифференциальные приемники (Rx);
- приемник наблюдения (ORx) с двумя входами;
- приемник прослушивания (SnRx) с тремя входами;
- перестраиваемый диапазон: 300–6000 МГц;
- полоса передатчика: до 250 МГц;
- полоса приемника: 8–100 МГц;
- поддержка дуплексной связи с частотным и временным разделением каналов (FDD и TDD);
- полностью интегрированные синтезаторы радиочастот с дробным коэффициентом деления для Tx, Rx, ORx и генератора тактовых сигналов;
- цифровой интерфейс JESD204B.

в совершенствовании всего тракта прохождения и обработки сигнала. Были улучшены характеристики микроволновых радиочастотных устройств, а их энергопотребление снизилось. Увеличилась частота дискретизации, линейность и эффективная разрядность преобразования (ENOB) АЦП и ЦАП, используемых в современных приемопередающих устройствах. Были усовершенствованы и функции обработки сигналов с помощью ПЛИС и цифровых сигнальных процессоров (DSP). В результате стало возможным использовать более эффективные алгоритмы обработки сигналов, цифровую коррекцию и интеграцию еще большего уровня. Новые технологии корпусирования позволяют увеличить плотность размещения выводов устройства, улучшив при этом его теплоотводящие способности.

Однако все эти усовершенствования неуклонно достигают точки снижения своей эффективности. В то время, когда массогабаритные показатели и энергопотребление (Size, Weight and Power, SWaP) радиочастотных компонентов таких систем уменьшались, размеры высокоэффективных фильтров, применяемых в супергетеродинной архитектуре, остались по-прежнему большими. Эти фильтры часто являются уникальными заказными компонентами, что увеличивает общую стоимость конечной системы. Кроме того, поскольку полосу пропускания аналогового канала задают фильтры ПЧ, усложняется создание общей платформы, которую можно было бы использовать повторно в системах разного назначения. Существует и проблема, связанная с технологией корпусирования: большинство производственных линий

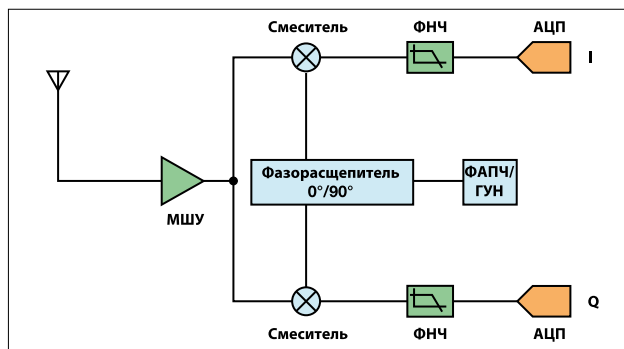
не может работать с микросхемами, у которых шаг между шариковыми выводами меньше 0,65 и даже 0,8 мм. Таким образом, ограничена возможность уменьшить размеры сложного устройства с большим числом портов ввода-вывода.

АРХИТЕКТУРА ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

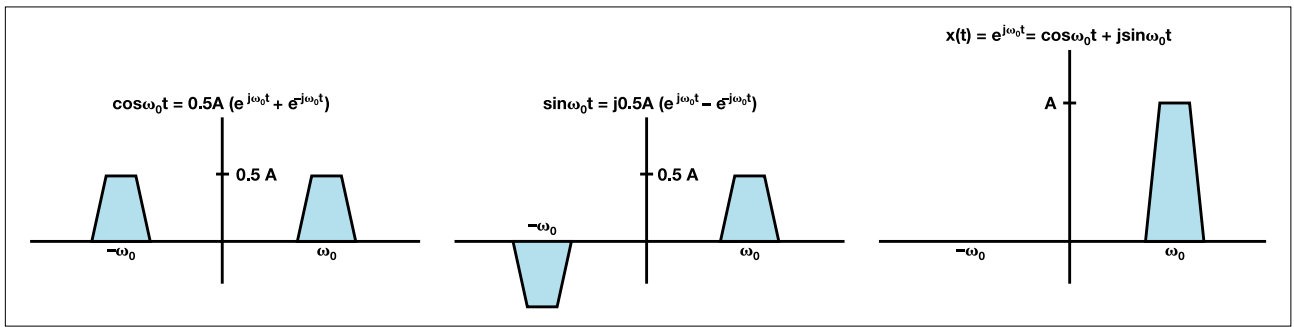
В последние годы в качестве альтернативы супергетеродинной архитектуре стала применяться хорошо известная архитектура прямого преобразования, или архитектура с нулевой промежуточной частотой (ZIF). В приемнике прямого преобразования используется один аналоговый смеситель с гетеродином, работающим в частотном диапазоне радиотрансивера. Суть преобразования заключается в переносе спектра входного сигнала с рабочей несущей частоты, используемой для передачи, в полосу модулирующих частот. В результате такого прямого преобразования восстанавливаются исходные низкочастотные синфазно-квадратурные сигналы I и Q, переданные с помощью несущей (рис. 2).

Архитектура прямого преобразования смягчает жесткие требования к фильтрации, предъявляемые к супергетеродину, поскольку вся аналоговая фильтрация выполняется в полосе модулирующих частот. Изготавливать такие фильтры намного проще и дешевле, чем специализированные высокочастотные фильтры и фильтры промежуточной частоты для супергетеродинной архитектуры. Кроме того, поскольку АЦП и ЦАП радиотрансивера в архитектуре с нулевой ПЧ работают с синфазно-квадратурными I/Q-сигналами в полосе модулирующих частот, частоту дискретизации сигнала можно уменьшить в полосе частот, полученной после преобразования, сократив потребляемую приемником мощность. В результате значительного упрощения аналоговой входной части приемника и использования меньшего числа компонентов приемопередатчика с архитектурой прямого преобразования позволяют существенно уменьшить показатель SWaP.

Однако у системной архитектуры прямого преобразования имеется ряд недостатков. Главный из них заключается в том, что прямое преобразование несущей частоты в полосу модулирующих частот приводит к проникновению несущей на выход приемника (этот эффект называется утечкой гетеродина) и к появлению в выходном сигнале спектра зеркального канала. С математической точки зрения, мнимые составляющие I- и Q-сигналов компенсируются за счет их ортогональности (рис. 3). Однако в реальности этого не происходит. Причина неидеальности прямого преобразования кроется не только в неидеальности устройств из-за наличия неизбежных технологических отклонений при их изготовлении, но и во влиянии температурной разницы на все каскады в цепи передачи сигналов. Таким образом, идеальное смещение фазы на 90° между квадратурными сигналами I и Q не обеспечивается, что ухудшает подавление зеркального канала. Кроме того, из-за нарушения изоляции частоты гетеродина ее утечка приводит к появлению компоненты несущей на выходе. Если не принять



▲ Рис. 2. Архитектура приемника прямого преобразования



▲ Рис. 3. Теоретическое обоснование подавления зеркального канала в приемниках прямого преобразования

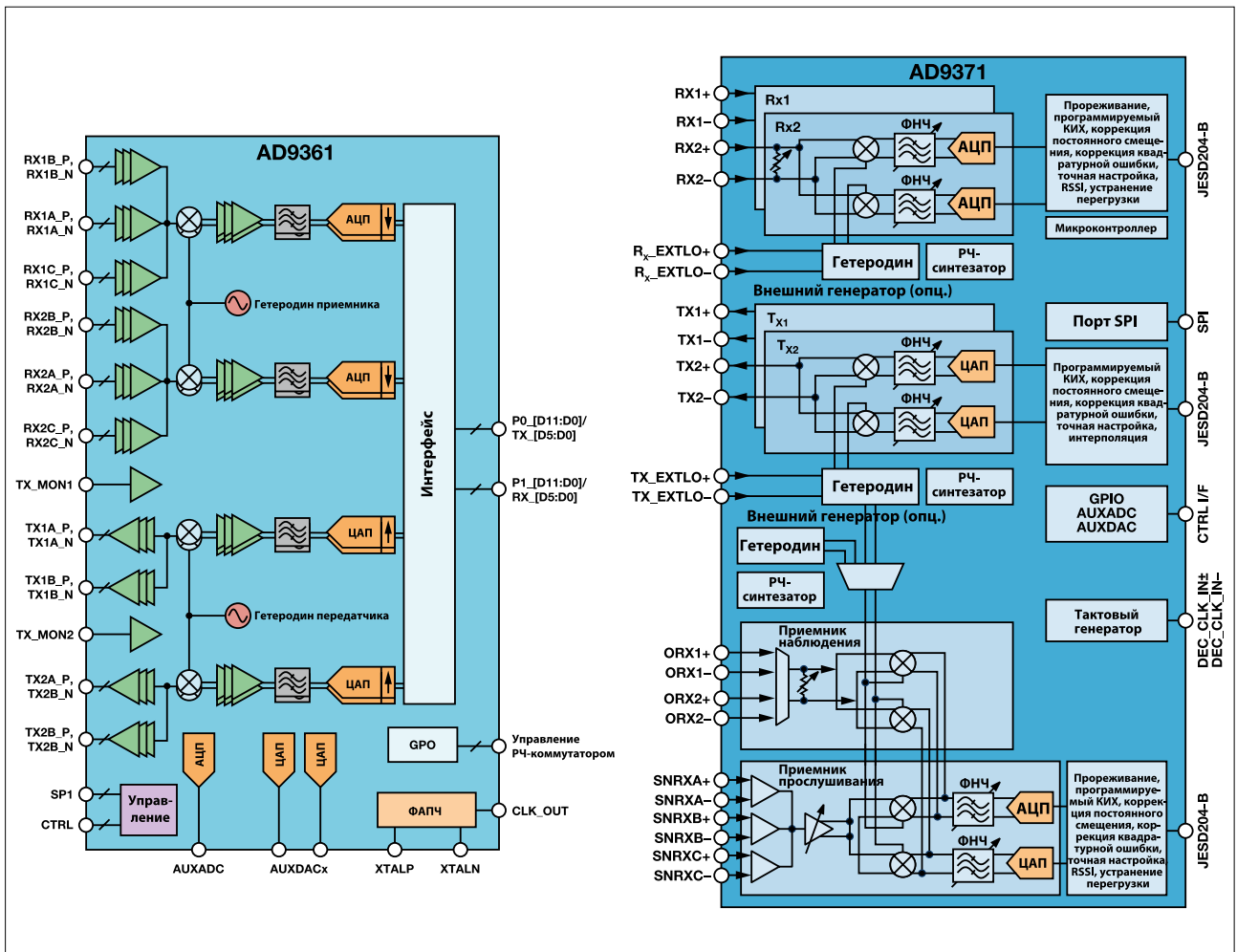
соответствующие меры для подавления зеркального канала и паразитных составляющих несущей, чувствительность приемника ухудшится, и появятся нежелательные электромагнитные помехи.

Исторически сложилось так, что дисбаланс квадратурных каналов I/Q приемного тракта ограничил диапазон приложений, подходящих для использования архитектуры прямого преобразования. Этот дисбаланс объясняется следующими причинами. Во-первых, дискретная реализация архитектуры прямого преобразования страдает от несоответствия характеристикам полупроводниковых микросхем и несоответствий, обусловленных особенностями конкретной печатной платы. Кроме того, в собранном устройстве могут использоваться микросхемы из разных партий, что намного затрудняет реализацию точного совпадения необходимых параметров. Во-вторых, при использовании дискретной реализации архитектуры в системе

общий управляющий процессор физически отделен от радиочастотных компонентов, что очень затрудняет квадратурную коррекцию рабочей частоты, температуры и ширины полосы пропускания.

ЭФФЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТРАНСИВЕРОВ

Интеграция архитектуры прямого преобразования в монолитное приемопередающее устройство обеспечивает решение многих свойственных этой технологии проблем и открывает ей путь для использования в системах следующего поколения. Расположение аналоговой и радиочастотной схем на одном кремниевом кристалле позволяет свести к минимуму все погрешности, связанные с технологическими и производственными отклонениями. Кроме того, в интегральный радиотрансивер можно установить блоки DSP,



▲ Рис. 4. Структурная схема ИС радиотрансиверов прямого преобразования AD9361 и AD9371

которые устраняют несоответствие между квадратурным алгоритмом калибровки и сигнальной цепочкой. Этот подход позволяет значительно улучшить показатель SWaP и обеспечить соответствие рабочих параметров радиотрансивера архитектуре супергетеродина.

Компания Analog Devices Inc. (ADI) предлагает своим заказчикам два радиотрансивера — AD9361 [1] и AD9371 [2] (рис. 4), которые отвечают потребностям рынка авиакосмической и оборонной промышленности. Эти устройства, выполненные на КМОП-кристаллах, объединяют в себе всю радиочастотную часть, аналоговые и цифровые каскады обработки сигналов, а также цифровую обработку для коррекции квадратурной составляющей и устранения утечки гетеродина. Все коррекции выполняются в реальном времени и предназначены для устранения возможных погрешностей изготовления, а также погрешности установки рабочей частоты и влияния изменения рабочей температуры в широком диапазоне $-40\dots 85$ °C при максимальной рабочей температуре кристалла 110 °C.

Микросхема AD9361 — конфигурируемый радиотрансивер (RF Agile Transceiver), который предназначен для использования в устройствах среднего уровня производительности с очень малой потребляемой мощностью. К этим устройствам относится, например, аппаратура каналов передачи данных БПЛА, карманные и переносные комплексы связи, носимые радиостанции и интеллектуальные приемники сигналов системы радиотехнической разведки с малым форм-фактором. Дополнительную информацию по AD9361 см. в [3].

Микросхема AD9371 — интегрированный двухканальный широкополосный радиотрансивер с трактом наблюдения для высокопроизводительных систем со средним уровнем энергопотребления. Это устройство оснащено встроенным ARM-микропроцессором для прецизионной калибровки. Кроме того, в состав микросхемы радиотрансивера AD9371 входит приемник наблюдения для линеаризации усилителя мощности и приемник прослушивания, предназначенный для обнаружения неиспользуемых областей частотного спектра. Использование этих устройств открывает новые широкие возможности проектирования каналов связи для самых разных приложений. Коммуникационные платформы, которые используют широкополосные сигналы или частотный спектр из несмежных участков, теперь можно реализовать в гораздо меньшем форм-факторе. Широкий динамический диапазон и регулируемая в широких пределах полоса пропускания позволяют использовать эту микросхему в приемниках сигналов радиотехнической разведки. Эти радиотрансиверы также предназначены для эксплуатации в радиолокаторах с фазированными антенными решетками (ФАР) в условиях с очень перегруженным радиочастотным спектром.

СЛЕДУЮЩЕЕ ПОКОЛЕНИЕ АППАРАТУРЫ РАДИОСВЯЗИ

Оптимизация супергетеродинных приемников на протяжении 100 последних лет обеспечила не только высокую

производительность, но и позволила намного уменьшить габариты этих устройств при достаточно малой потребляемой мощности. Дальнейшее совершенствование супергетеродинной архитектуры в этом направлении наталкивается уже на физические ограничения. Однако развитие платформ для авиакосмической и оборонной промышленности не стоит на месте. Платформы нового поколения требуют иных подходов к разработке приемопередающих устройств, направленных на то, чтобы на площади всего лишь в несколько квадратных сантиметров можно было реализовать полностью законченное устройство с единым интегрированным аппаратно-программным комплексом. Кроме того, при создании устройств нового поколения необходимо соблюсти основное требование — уменьшение показателя SWaP не должно означать сокращение производительности.

Два рассмотренных радиотрансивера прямого преобразования AD9361 и AD9371 от компании ADI предоставляют разработчикам авиакосмической и оборонной промышленности возможность создавать такие системы, которые всего несколько лет тому назад было невозможно построить. У этих радиотрансиверов есть много общего — перестраиваемые по частоте среза фильтры, гетеродины с большим диапазоном перестройки по частоте, широкие функциональные возможности и алгоритмы калибровки. Однако у AD9361 и AD9371 имеется и целый ряд существенных различий, что позволяет выбрать оптимальный вариант для конкретных сфер применения. Так, радиотрансивер AD9361 предназначен для построения платформ с одной несущей и для тех решений, где основными являются требования по оптимизации массогабаритных показателей и низкое энергопотребление. В отличие от AD9361, радиотрансивер AD9371 предназначен для создания широкополосных платформ с поддержкой дуплексной связи с частотным и временным разделением каналов, где иным способом трудно достичь высокой производительности. Благодаря своей универсальности, широким функциональным возможностям и высокой производительности радиотрансиверы прямого преобразования AD9361 и AD9371, несомненно, станут ключевыми элементами оборудования связи следующего поколения для авиакосмической и военной техники. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. AD9361 RF Agile Transceiver, Data Sheet, Rev. F 2013–2016 Analog Devices, Inc. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9361.pdf>
2. AD9371 Integrated, Dual RF Transceiver with Observation Path, Data Sheet, Rev. B, 2016–2017 Analog Devices, Inc. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9371.pdf>
3. Сотников А., Русов И. Интегрированный конфигурируемый приемопередатчик диапазона 70 МГц — 6 ГГц // Компоненты и технологии. № 2, 2014.