

Проблема синхронизации базовых станций N×N MIMO

с внешним опорным синхросигналом

Патрик Виерс

В настоящее время системотехники тратят значительные силы и время на разработку высококачественных схем генераторов тактовых импульсов и синусоидальных сигналов для базовых станций систем связи. В однокристалльном трансивере многие из этих генераторов интегрированы на кристалле, однако для его работы все равно необходим опорный тактовый сигнал. Поскольку базовые станции, принадлежащие одной сети, обычно синхронизируются друг с другом, этот опорный тактовый сигнал должен быть выровнен во времени с опорным синхросигналом всей сети.

В статье показано, что применение высококачественного генератора тактового сигнала совместно с одним или несколькими интегрированными трансиверами позволяет упростить систему и уменьшить ее стоимость, добившись при этом превосходных характеристик приема и передачи. Обсуждаемый подход позволяет всем базовым станциям в сети оставаться синхронизированными друг с другом даже при потере опорного синхросигнала в течение длительного периода.

Архитектура системы формирования тактовых сигналов базовой станции

Одним из основных параметров базовой станции является частота несущей (сигнала локального генератора, или гетеродина), на которой она работает. Однако в одном только трансивере помимо сигнала частоты несущей, подаваемого на каскады смесителей, необходимы также сигналы синхронизации выборки (сэмплирования) для преобразователей данных, тактовые сигналы для цифровых фильтров и шины ввода/вывода.

Можно значительно сократить время проектирования и уменьшить стоимость системы, применив интегрированный трансивер наподобие того, который выделен на рис. 1 пунктирным прямоугольником. Наряду со схемами приемника и передатчика однокристалльные трансиверы включают в себя схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), формирующие опорные тактовые импульсы и синусоидальные сигналы, необходимые для работы различных блоков обработки сигнала. Однако даже для трансиверов, имеющих высокую степень

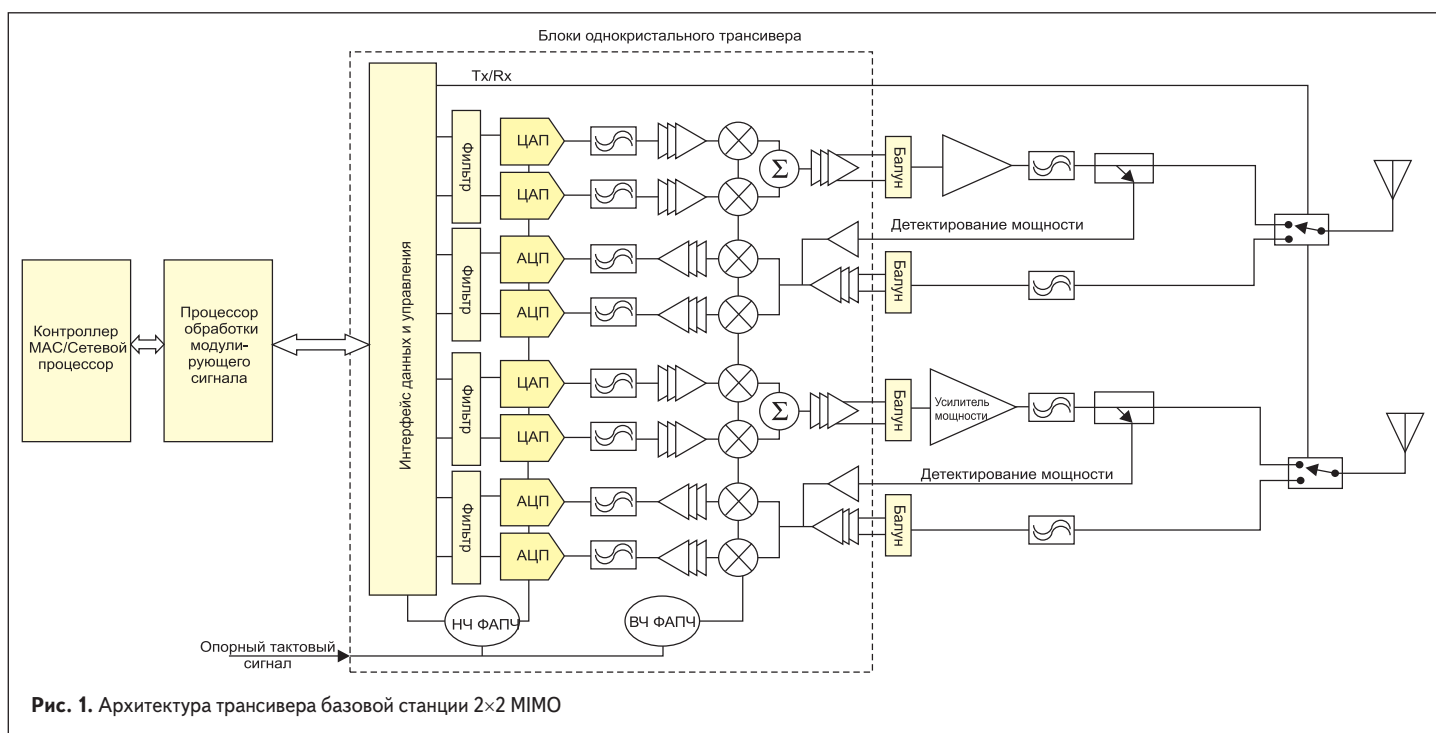


Рис. 1. Архитектура трансивера базовой станции 2×2 MIMO

интеграции, необходим входной опорный тактовый сигнал.

Однокристалльные трансиверы с двумя входами и двумя выходами типа MIMO (multiple input multiple output), такие как ИС AD9356 и AD9357 компании Analog Devices, могут работать с двумя возможными вариантами опорного тактового сигнала. Первый вариант — работа от внешнего кварцевого резонатора с использованием интегрированной схемы подстройки частоты с цифровым управлением (DCXO). Второй вариант заключается в использовании внешнего генератора тактовых импульсов. Частота опорного тактового сигнала AD9356/7 может изменяться в диапазоне 32–48 МГц.

Абонентские станции, такие как, например, телекоммуникационное оборудование, устанавливаемое в помещении абонента (customer premises equipment, CPE), используют для синхронизации с сетью беспроводной связи информацию, передаваемую базовой станцией. CPE осуществляет точную подстройку частоты собственного гетеродина, синхронизируясь во времени с задающим тактовые импульсы генератором базовой станции. По этой причине с точки зрения стоимости и потенциального качества в рассматриваемой задаче целесообразно использовать вариант работы трансивера от внешнего резонатора с DXCO.

К базовым станциям предъявляются также дополнительные требования. Так, например, операторы обычно хотят, чтобы границы символов и кадров для всех станций отдельно взятой сети были выровнены во времени. Поскольку информация для синхронизации абонентских станций обеспечивается базовыми станциями, все они должны быть синхронизированы с внешним опорным синхросигналом.

Для синхронизации базовых станций существует два способа. В первом случае используется выходной сигнал приемника GPS с частотой один импульс в секунду (pps, pulse per second) [1], а второй основан на протоколе сетевой синхронизации, описанном в спецификации IEEE 1588 [2]. В обоих случаях входной тактовый сигнал трансивера, показанный на рис. 1, синхронизируется с опорным синхросигналом (например, от GPS-приемника).

Вопросы, связанные с формированием опорных тактовых импульсов для базовой станции

Как показано на рис. 1, опорный тактовый сигнал, поступающий на вход интегрированных трансиверов, подается на внутренние схемы ФАПЧ. В высокочастотной ФАПЧ (RFPLL) базовой станции производится умножение его частоты с коэффициентом, необходимым для получения частоты гетеродина. Этот коэффициент может достигать восьмидесяти и более, поэтому для поддержания высокого качества приема/передачи фазовый шум опорного тактового сигнала должен быть очень мал. Опорный тактовый сигнал также должен быть синхронизирован с внешним опорным синхросигналом, частота которого при синхронизации от приемника GPS равна 1 pps.

С проблемой синхронизации тесно связана задача «удержания частоты» (holdover). Если

опорный синхросигнал пропадает (например, сигнал спутника GPS каждый день в течение некоторого периода времени блокируется зданием), то опорный тактовый сигнал не должен отклоняться от теоретического значения частоты опорного синхросигнала. В спецификациях типа ANSI/T1.101-1987 [3] требования к удержанию частоты подразделяются на различные уровни (strata), каждому из которых соответствует свое допустимое максимальное отклонение в течение отдельно взятого периода времени. Уровень Stratum 3E (дополнительный уровень, определенный в Bellcore GR-1244-CORE) требует, чтобы источник тактового сигнала имел отклонение за 24 ч не более чем на 10^{-9} . Как обсуждается ниже в разделе «Системы N×N MIMO», если в базовой станции используется два или более трансивера в конфигурации multiple-in-multiple-out, то все они должны быть синхронизированы с одним и тем же опорным синхросигналом. Для сокращения количества и стоимости компонентов следует использовать источник опорного тактового сигнала, имеющий несколько идентичных выходов, сигналы с которых будут подаваться на разные блоки трансиверов.

Формирование внешнего тактового сигнала

В рассматриваемом ниже практическом примере в качестве подсистемы базовой станции используется интегрированный 2×2 MIMO-трансивер AD9356/7. Как отмечалось ранее, для его работы необходим опорный тактовый сигнал с частотой 32–48 МГц. Для синхронизации этого тактового сигнала с опорным синхросигналом требуется гибкая схема ФАПЧ с превосходными показателями фазового шума. Для данной задачи идеально подходит четырех/восьмиканальная схема формирования/синхронизации сетевых тактовых сигналов AD9548 компании Analog Devices. Выход источника опорного синхросигнала подключается к одному из входов опорной частоты AD9548, а тактовый сигнал с малым фазовым шумом подается на вход системного тактового сигнала микросхемы. Значение частоты выходного тактового сигнала программно выбирается из диапазона 32–48 МГц, требуемого для работы AD9356/7. Блок-схема системы с синхронизацией от приемника GPS показана на рис. 2.

Некоторые генераторы сетевых тактовых сигналов могут работать с весьма широким диапазоном входных частот, что позволяет использовать различные варианты опорных синхросигналов и тактовых сигналов с низким

фазовым шумом. Грамотный выбор входных частот дает возможность упростить структуру системы, уменьшить ее стоимость, обеспечить наилучшие показатели приема/передачи и достичь соответствия требуемым спецификациям удержания частоты.

Для обеспечения синхронизма между выходным тактовым сигналом и опорным синхросигналом в AD9548 используется не аналоговая, а цифровая схема фазовой автоподстройки частоты (DPLL, digital phase-locked loop). За счет этого в системе достигаются превосходные показатели удержания частоты, которые ограничены лишь дрейфом источника системного тактового сигнала. Более того, показатели фазового шума выходных тактовых сигналов AD9548 определяются фазовым шумом системного тактового сигнала, а не синхросигнала. Это позволяет устройству работать от синхросигнала со значительным шумом, не передавая его на выход.

Обеспечение максимального качества опорного тактового сигнала

Широкий диапазон входных и выходных частот, с которыми могут работать генераторы сетевых тактовых сигналов, дает разработчику системы большую свободу в оптимизации качества выходного тактового сигнала. Так, например, высокостабильные источники тактового сигнала с частотой 25 МГц и ниже более доступны и, как правило, менее дороги по сравнению с источниками тактового сигнала большей частоты. Если частота входного системного тактового сигнала (sysclk), показанного на рис. 2, меньше 50 МГц, то для ее удвоения может быть использована интегрированная в AD9548 схема умножения на два, которая вносит минимальный дополнительный фазовый шум. Полученный сигнал подвергается дальнейшему умножению частоты в схеме ФАПЧ системного тактового сигнала для получения частоты, равной примерно 1 ГГц.

Разработчик также должен выбрать выходную частоту DPLL и подходящий коэффициент постделителя. Увеличение скорости нарастания в результате выбора большего значения выходной частоты DPLL, в общем случае, помогает уменьшить фазовый шум, однако может вызывать появление побочных составляющих. При формировании опорного тактового сигнала для AD9356/7 эффективный компромиссный вариант заключается в выборе выходной частоты DPLL, равной 240 МГц, и значения коэффициента постделителя, равного шести; при этом

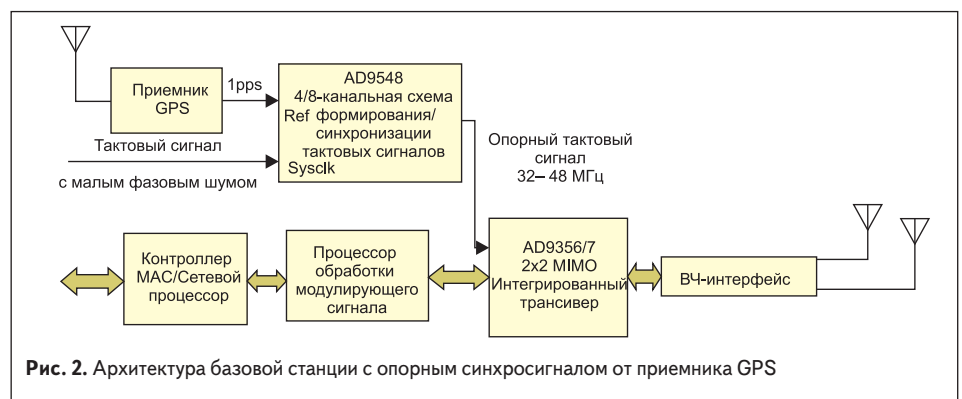


Рис. 2. Архитектура базовой станции с опорным синхросигналом от приемника GPS

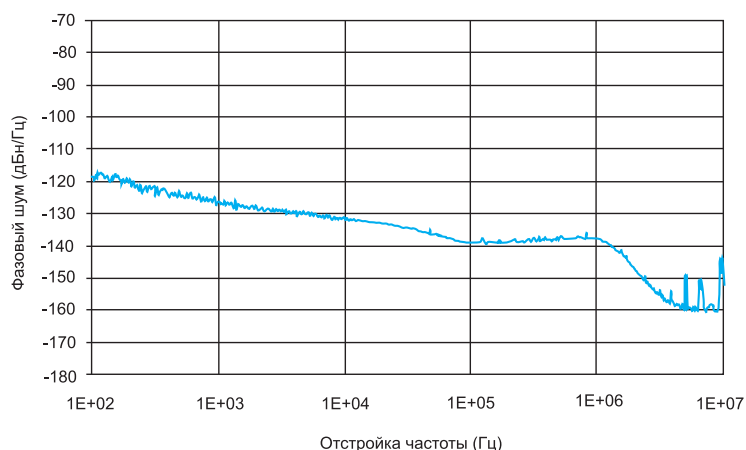


Рис. 3. Зависимость фазового шума микросхемы AD9548 компании Analog Devices от частоты

окончательное значение частоты выходного сигнала будет равно 40 МГц. На рис. 3 показано распределение фазового шума AD9548, полученное при использовании таких настроек.

На рис. 4 показана характеристика результирующего интегрированного фазового шума на выходе AD9356 при передаче на частоте 2500 МГц, полученная при использовании для формирования опорного тактового сигнала микросхемы AD9548. На оценочной плате AD9548 может использоваться системный тактовый сигнал от кварцевого генератора (стандартная конфигурация) или внешний тактовый сигнал. Графики на рис. 3 и 4 соответствуют случаю, когда в качестве источника системного тактового сигнала AD9548 используется термостабилизированный кварцевый генератор (oven-controlled crystal oscillator, OXCO) с частотой 12,8 МГц. При проведении тестов микросхема AD9548 не была синхронизирована с опорным синхросигналом.

При использовании такой конфигурации типичное значение EVM (модуля вектора ошибки) на выходе AD9354, получаемое при передаче сигнала 64-QAM стандарта WiMAX 802.16e, не хуже -38 дБ.

Как уже отмечалось, чтобы гарантировать минимально возможное значение EVM пере-

датчика, источник системного тактового сигнала для генератора сетевых тактовых сигналов должен обладать низким фазовым шумом. Кроме того, он должен иметь очень хорошую кратковременную стабильность, особенно в случае использования в качестве опорного синхросигнала сигнала с частотой 1 pps. Для синхронизации с сигналом от приемника GPS в генераторе сетевых тактовых сигналов необходимо использовать очень узкую полосу петли ФАПЧ. Это, в свою очередь, означает, что источник системного тактового сигнала должен иметь очень малое дрожание фазы (jitter) для поддержания схемы ФАПЧ генератора в состоянии синхронизма. Таким требованиям удовлетворяют высококачественные источники типа OXCO, которые обычно и используются в базовых станциях.

Системы N×N MIMO

В системах N×N MIMO используется несколько трансиверов, на каждый из которых должна подаваться идентичная копия внешнего опорного синхросигнала. Генераторы сетевых тактовых сигналов, имеющие несколько идентичных выходов, избавляют от необходимости применения буферов и устройств распределения тактовых сигналов. ИС AD9548 может обе-

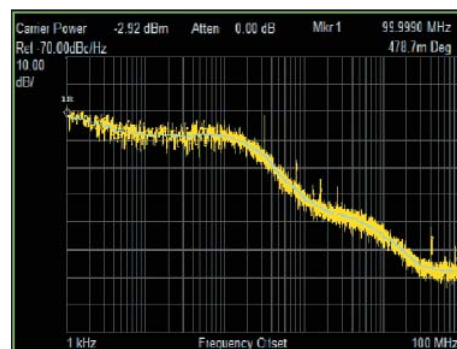


Рис. 4. Интегрированный фазовый шум микросхемы AD9356 компании Analog Devices, частота несущей 2500 МГц

спечивать до четырех дифференциальных LVDS/LVPECL или восьми несимметричных КМОП выходных сигналов. Прямоугольники и сигналы на рис. 5, которые начерчены сплошными линиями, образуют систему 4×4 MIMO с общими синхронными опорными тактовыми сигналами, а прямоугольники и линии, начерченные пунктиром, иллюстрируют расширение системы в архитектуру 6×6 MIMO.

Пересылка отсчетов данных между AD9356/7 и процессором обработки модулирующего сигнала (baseband processor, BBP) осуществляется через интерфейс параллельного порта, совместимый со стандартом JESD-207, тактовый сигнал данных для которого генерирует AD9356/7. В системах 4×4 и большего порядка BBP может осуществлять принудительную синхронизацию тактовых сигналов данных во всех трансиверах AD9356/7, одновременно посылая импульсы на каждый из них. За счет этого гарантируется выравнивание отсчетов данных, посылаемых или принимаемых от каждого трансивера во времени.

Заключение

Применение высококачественного генератора тактовых сигналов, синхронизированного с внешним опорным синхросигналом, совместно с одним или несколькими интегрированными трансиверами упрощает структуру и уменьшает сложность и стоимость базовой станции системы связи. Архитектура системы допускает простое расширение для построения N×N MIMO базовых станций. Подобные устройства включают в себя большинство необходимых генераторов тактовых импульсов и синусоидальных сигналов и при этом обеспечивают превосходные показатели качества приема и передачи в системе. Базовые станции в сети остаются синхронизированными друг с другом, даже если опорный синхросигнал временно пропадает.

Литература

1. IEEE 802.16-2004 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. 2004.
2. IEEE 1588-2008 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. 2008.
3. ANSI/T1.101-1987 Synchronization Interface Standards for Digital Networks.

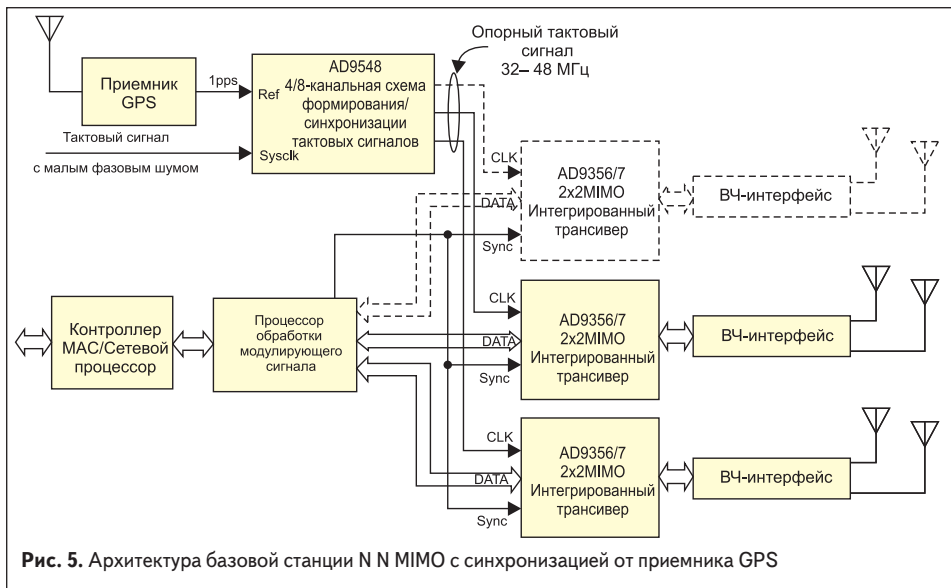


Рис. 5. Архитектура базовой станции N N MIMO с синхронизацией от приемника GPS