

Многостандартные/ многодиапазонные системы

на основе приемников
прямого преобразования

Операторы сетей сотовой связи давно хотят иметь возможность развертывания универсальной беспроводной инфраструктуры, которая бы поддерживала программирование в процессе эксплуатации и могла обслуживать несколько стандартов беспроводной связи. Естественно, что для работы подобной беспроводной инфраструктуры в регионах с интенсивным сотовым трафиком она должна обладать динамической гибкостью, которая бы позволила аппаратным средствам радиосистемы адаптироваться к изменяющимся сигнальным условиям. Эту проблему помогают разрешить многостандартные/многодиапазонные радиосистемы, аппаратные средства которых могут быть сконфигурированы с учетом потребностей конкретного стандарта.

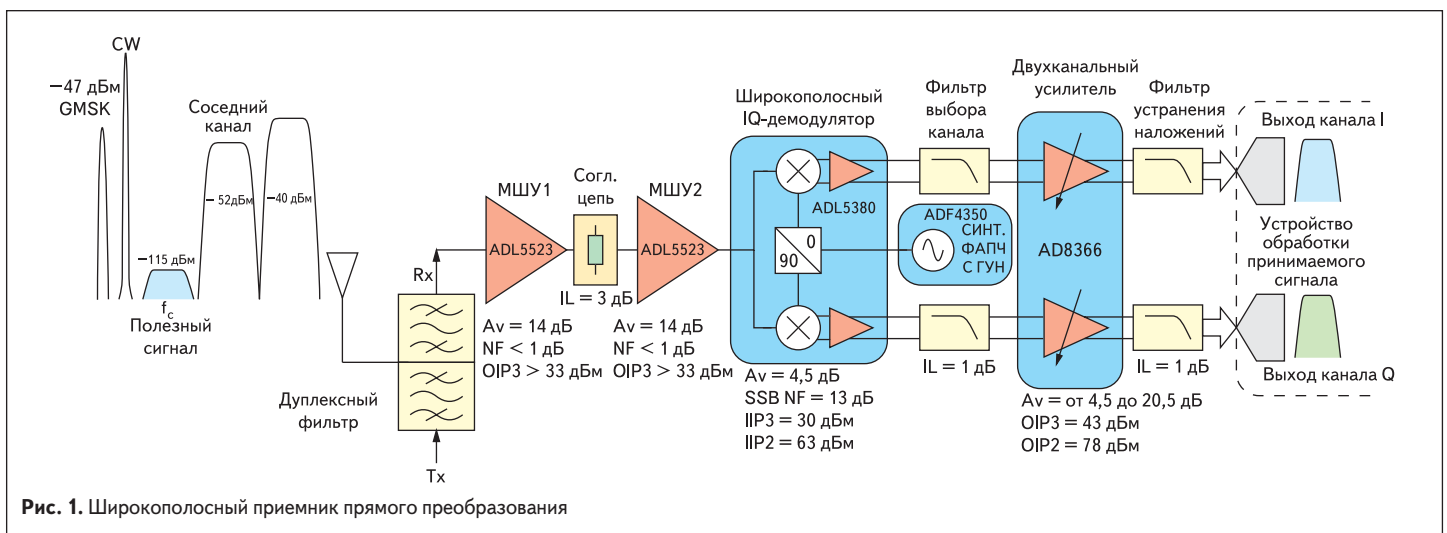
Ракеш Сони
Эрик Ньюман

Хорошим решением с точки зрения построения программируемых радиосистем являются современные средства прямого преобразования, которые обеспечивают выигрыш в стоимости и потенциальное преимущество в показателях по сравнению с традиционными схемами радиоприемников. Кроме того, архитектуры прямого преобразования дают большую свободу для создания унифицированного аппаратного обеспечения, работающего в нескольких частотных диапазонах. Стоимость приемников с прямым преобразованием обещает стать еще ниже, и уже сейчас на основе этой архитектуры можно создавать высококачественные многостандартные/многодиапазонные радиосистемы. В этой статье обсуждаются характеристики и показатели качества сигнального тракта приемника пря-

мого преобразования в контексте стандартов беспроводной сотовой связи 3G и 4G.

Сигнальный тракт высококачественного приемника прямого преобразования

Приемник прямого преобразования непосредственно демодулирует ВЧ-сигнал на частоте несущей в основную полосу (полосу модулирующих сигналов), где сигнал можно детектировать и восстановить содержащуюся в нем информацию. Архитектура прямого преобразования была впервые предложена в 1932 году в качестве альтернативы супергетеродинным приемникам. Привлекательность этого решения — в сокращении числа компонентов в схеме за счет исключения из нее каскадов промежуточной частоты (ПЧ).



Также при исключении из схемы каскадов промежуточной частоты и прямом преобразовании сигнала на нулевую ПЧ можно избежать проблем зеркального канала приема, присущих супергетеродинным архитектурам. С другой стороны, ряд проблем, связанных с прямым преобразованием, среди которых утка сигнала гетеродина, сдвиги постоянной составляющей и высокий уровень искажений, усложняют его реализацию на практике. Однако последние достижения в технологиях производства интегрированных ВЧ-схем сделали возможным использование традиционной архитектуры прямого преобразования (гомодинной архитектуры) при создании высококачественных широкополосных приемников.

На рис. 1 показан широкополосный приемник прямого преобразования и особо выделены некоторые из наиболее критичных параметров компонентов сигнального тракта. Сигнальный тракт приемника начинается с соединения антенного входа и дуплексера. Дуплексеры часто используются в системах с частотным разделением (Frequency Domain Duplex, FDD), таких как W-CDMA и некоторых версиях WiMax. Дуплексный фильтр предотвращает генерацию передатчиком чрезмерных помех вне лицензированного частотного диапазона и, в то же время, помогает подавить любые нежелательные внеполосные сигналы, которые могут привести к перегрузке приемника.

Как правило, за дуплексным фильтром следует несколько каскадов маломощных усилителей (МШУ) с дополнительными цепями частотно-избирательной фильтрации и согласования, которые позволяют оптимизировать показатели в рабочем диапазоне частот. Показанные в качестве примера на рисунке МШУ обладают очень хорошими характеристиками в широком диапазоне частот и улучшенными показателями в узкой полосе частот при использовании внешних избирательных цепей. В задачах, где приемник должен работать с очень широким спектром частотных диапазонов, может потребоваться применение коммутационной матрицы, которая позволяла бы коммутировать между собой антенные тракты и каскады МШУ, оптимизированные для работы в конкретном диапазоне частот.

После прохождения входного каскада из маломощных усилителей сигнал требуемой частоты несущей переносится в полосу модулирующих частот при помощи I/Q-демодулятора. Для этого на смесители I и Q подается сигнал гетеродина, частота которого равна частоте несущей полезного сигнала. При этом на выходных портах I/Q формируется суммарная и разностная частоты. Сигнал суммарной частоты существенно ослабляется фильтрами нижних частот, которые пропускают на выход только сигнал разностной частоты. При работе на нулевой ПЧ сигнал разностной частоты представляет собой комплексную огибающую полезного сигнала. Зачастую дополнительным преимуществом является возможность масштабирования уровня отфильтрованного I/Q сигнала с переменным коэффициентом усиления. Усилитель с переменным коэффициентом усиления (VGA) позволяет оптимальным образом отрегулировать уровни I/Q сигнала

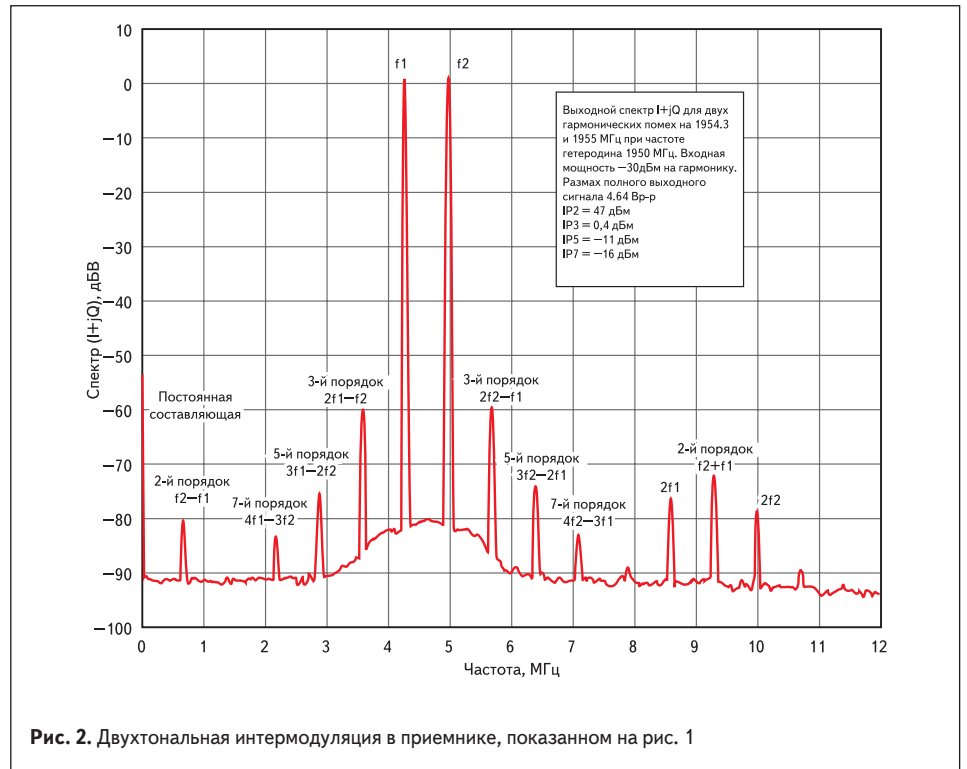


Рис. 2. Двухтональная интермодуляция в приемнике, показанном на рис. 1

перед выполнением аналого-цифрового преобразования. В общем случае, чтобы избежать проникновения высокочастотного шума, а также интерференционных и иных побочных гармонических составляющих в полосу анализируемого сигнала в результате эффекта наложения, перед подачей сигнала на аналого-цифровые преобразователи (АЦП) может выполняться дополнительная фильтрация.

Динамический диапазон приемника

В рассматриваемом приемнике применяются высококачественные интегрированные ВЧ-схемы, которые обладают как широкой рабочей полосой, так и большим динамическим диапазоном. Динамический диапазон — это критический параметр любого приемника, предназначенного для работы в многоканальной системе, где помимо полезного сигнала могут присутствовать мешающие сигналы соседних каналов со значительно большими уровнями мощности. Более точное представление о нелинейном поведении устройства дает параметр, который называется свободным от искажений динамическим диапазоном (SFDR), в двухтональном режиме. Устойчивость приемника в условиях сильных блокирующих сигналов тестируется обычно при помощи однотонального или двухтонального помехового сигнала. Исследовав нелинейное поведение приемника при его возбуждении двухтональным сигналом, можно найти ряд точек пересечения по интермодуляционным характеристикам (interception points), которые позволяют количественно описать и промоделировать характеристики искажений и определить полный динамический диапазон приемника.

На рис. 2 изображен спектр выходного комплексного сигнала приемника ($I + jQ$) при подаче на вход двух сильных синусоидальных

сигналов помехи, находящихся вблизи от частоты полезного сигнала. В данной тестовой конфигурации уровни входных тестовых сигналов взяты равными -30 дБм. Это значение весьма пессимистично, то есть уровни входных сигналов значительно превышают условия тестирования по блокирующим сигналам, предъявляемые в стандартах сотовых систем 3G и 4G. При дискретизации сигнала на нулевой или низкой ПЧ гармонические искажения 2-го, 3-го, 4-го и даже 5-го и 7-го порядков могут ограничивать качественные показатели приемника в присутствии мощных входных сигналов. В частности, нелинейное поведение I/Q-демодулятора должно быть достаточно адекватным, чтобы интермодуляционные составляющие, порождаемые как полезным, так и мешающими сигналами, не искажали полезных сигналов.

Помимо точки пересечения по интермодуляционным искажениям третьего порядка (IP3), которая является общепринятой метрикой искажения в большинстве узкополосных приемников с дискретизацией на ПЧ, в нашем случае также важно обратить внимание на составляющие искажений, обусловленных нелинейностями четного порядка и других нечетных порядков. Для их количественного описания часто используются параметры IP2, IP4 и IP5. В общем случае, чтобы гарантировать устойчивое функционирование, следует изучить все побочные составляющие, попадающие в полосу анализа приемника, при наихудших входных воздействиях. В условиях воздействия сильных блокирующих излучений интермодуляционные составляющие, вызванные нелинейностями высокого порядка, могут попадать в полосу приема и ухудшать чувствительность приемника. Наиболее критичные нелинейные составляющие отмечены на рис. 2. Обратите внимание на то, что составляющие

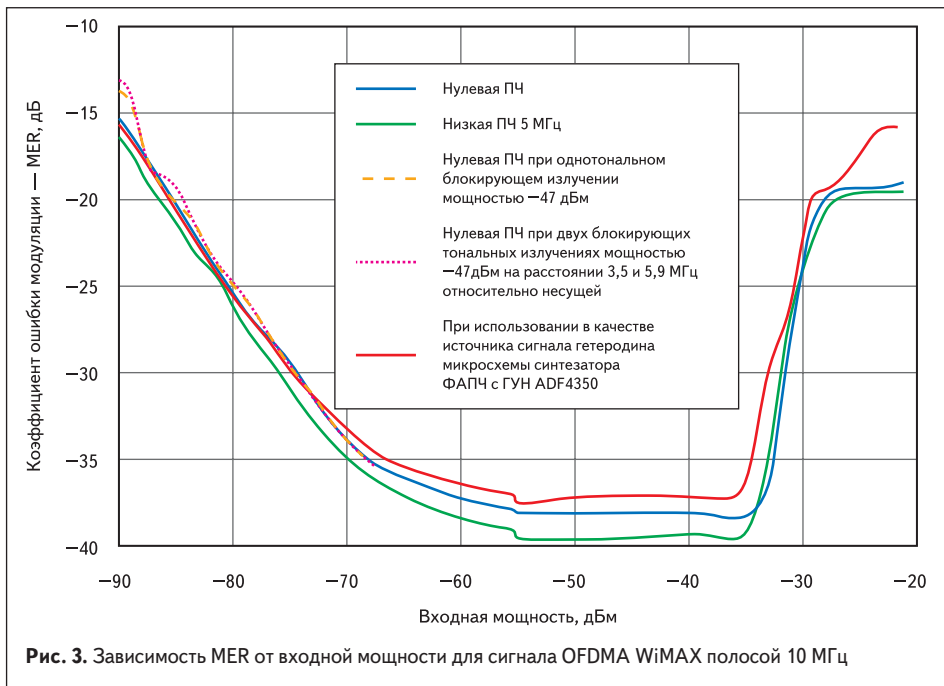


Рис. 3. Зависимость MER от входной мощности для сигнала OFDMA WiMAX полосой 10 МГц

нечетного порядка появляются вблизи от основных гармоник входных сигналов. Этот рисунок наглядно показывает, каким образом близко расположенные мешающие сигналы могут порождать интермодуляционные составляющие, которые попадают в полосу полезного сигнала. В архитектуре с прямым преобразованием в полосу полезного сигнала также может попадать и разностная частота мешающих сигналов ($f_2 - f_1$), которая является следствием конечных нелинейностей второго порядка в приемнике.

Для моделирования динамических характеристик шумов и искажений приемника при различных тестовых условиях использовалась программа ADIsimRF — бесплатный онлайн-калькулятор для сигнального тракта, разработанный компанией Analog Devices. При помощи этой программы были промоделированы и измерены показатели интермодуляции для различных составляющих вплоть до седьмого порядка. Исследуя нелинейное поведение отдельных компонентов и сопоставляя результаты с аналогичными показателями при их общем каскадном соединении, можно оптимизировать состав системы так, чтобы мгновенный динамический диапазон был максимален. При использовании этого подхода был построен высокочувствительный приемник с коэффициентом шума менее 2 дБ и ухудшением чувствительности в присутствии однотональных и двухтональных мешающих сигналов менее чем на 1 дБ, в соответствии со спецификациями W-CDMA (ETSI EN 302 217-2-2 V1.2.3 (200709)).

Утечка сигнала гетеродина и ухудшение чувствительности из-за сдвига постоянной составляющей

Если какая-то часть сигнала гетеродина за счет утечки попадает во входной ВЧ-порт, она может отражаться в приемный тракт и смешиваться с исходным сигналом гетеродина. Подобное «самосмешение» эквивалентно возведению

сигнала гетеродина в квадрат и порождает вторую гармонику, которая обычно имеет очень высокую частоту и сильно ослабляется фильтром полосы модулирующих частот, а также смещение постоянной составляющей, которое попадет в полосу анализа приемника прямого преобразования (постоянная составляющая на рис. 2).

В системах с дискретизацией в полосе модулирующих частот зачастую требуется применение методов калибровки и коррекции сдвига постоянной составляющей. Остаточный сдвиг постоянной составляющей эквивалентен мешающему сигналу, попадающему в полосу анализа полезного сигнала. Для уменьшения этого эффекта могут быть применены несколько методов, среди которых: отслеживание и ком-

пенсация постоянной составляющей, связь по переменному сигналу в полосе модулирующих частот или просто выбор компонентов с хорошими статическими характеристиками и показателями искажений четного порядка.

Неидеальности квадратурных сигналов и ослабление зеркального канала

Рассогласование амплитуды и фазы I и Q составляющих могут вызывать ухудшение отношения сигнал/шум (ОСШ). Комплексный I/Q сигнал в идеальном I/Q демодуляторе сохраняет идеальную разность фаз (90°) между векторами I и Q. При выполнении этого условия распознавание цифровых символов можно легко выполнить по мгновенной траектории векторов I и Q. Если же в системе имеется рассогласование между каналами I и Q, то разность в амплитудах и фазах соответствующих векторов приведет к ухудшению ОСШ для полезного сигнала. Статическое рассогласование составляющих I и Q может быть скорректировано цифровыми методами. При разработке приемника прямого преобразования важно исследовать зависимость эффективного ослабления зеркального канала от уровня сигнала и смещения относительно частоты несущей. Представление о рассогласовании I/Q сигналов в однотональном режиме помогает упростить процесс интерпретации измеренной зависимости при приеме модулированного сигнала.

Коэффициент ошибки модуляции

Коэффициент ошибки модуляции (Modulation Error Rate, MER) — это показатель, который применяется для количественного описания погрешности модуляции цифрового радиопередатчика или радиоприемника. В идеально линейной, свободной от шума системе все символьные траектории I/Q сигнала, принимаемого приемни-

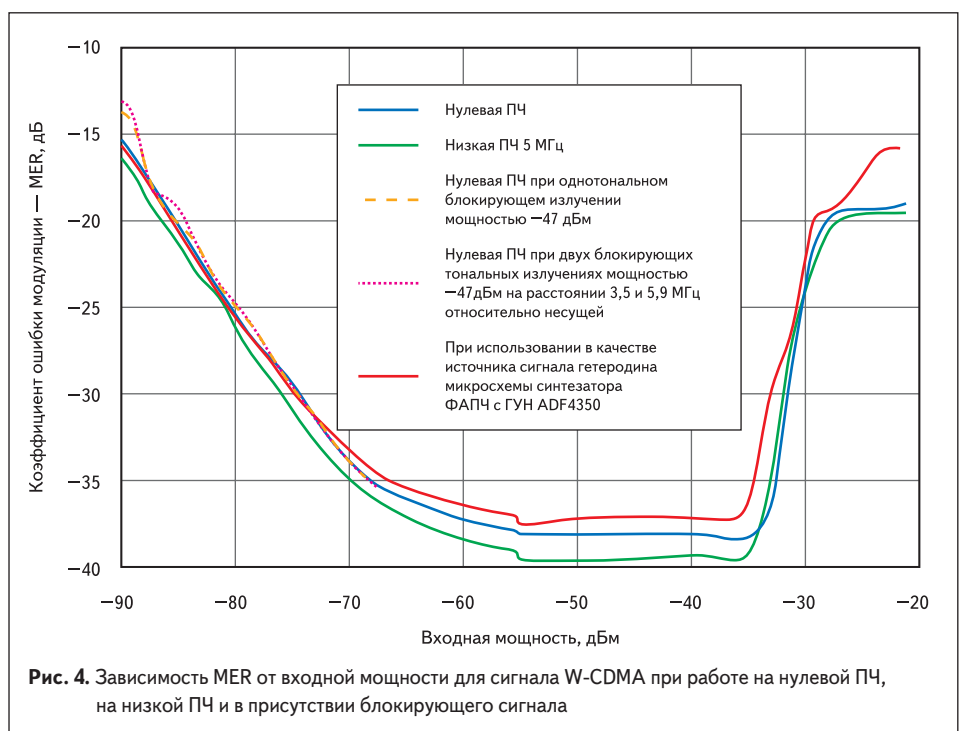
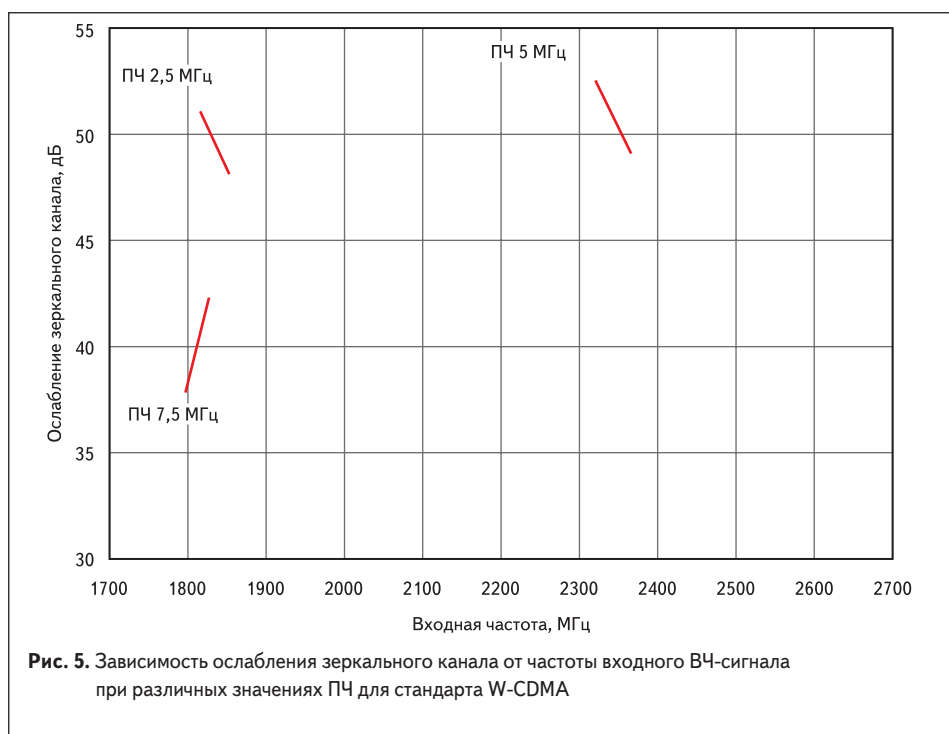


Рис. 4. Зависимость MER от входной мощности для сигнала W-CDMA при работе на нулевой ПЧ, на низкой ПЧ и в присутствии блокирующего сигнала



ком, отображались бы в соответствующие точки идеального созвездия сигнального пространства. Однако различные неидеальности реализации (например, дисбаланс амплитуд, шумовой порог и дисбаланс фаз) вызывают отклонение реальных измеренных символьных векторов от идеальных положений. Рассматриваемый приемник прямого преобразования демонстрирует исключительные показатели MER для различных методов модуляции. На рис. 3 и 4 показана зависимость MER от мощности входного сигнала для сигналов OFDMA WiMAX с полосой 10 МГц и W-CDMA соответственно.

В общем случае, в зависимости от мощности входного сигнала доминирующее влияние на величину MER в приемнике оказывает один из трех возможных факторов. При высоких уровнях сигнала сильное ухудшение MER вызывают составляющие искажений, попадающие в полосу приема вследствие нелинейностей приемника. При среднем уровне сигнала, когда приемник работает в линейном режиме и сигнал находится высоко над уровнем

шума, MER достигает оптимального значения. Доминирующий вклад в MER в данном случае вносит точность формирования квадратурных сигналов в демодуляторе, фильтре и усилителе с переменным коэффициентом усиления, а также погрешность измерительного оборудования. При уменьшении сигнала до уровня, когда основной вклад начинает вносить шум, зависимость MER от мощности сигнала принимает линейный характер, и на каждый децибел уменьшения уровня сигнала MER также ухудшается на 1 дБ.

Детальный анализ рис. 4 позволяет оценить устойчивость приемника при различных рабочих условиях. Как справедливо было бы ожидать, при работе с низкой ПЧ (5 МГц) достигаются наилучшие характеристики, поскольку при этом система свободна от сдвигов постоянной составляющей и фликер-шума, характерных для работы на нулевой ПЧ. При низких уровнях мощности шумовые характеристики приема практически не зависят от рабочих условий. Даже в присутствии однотонального или двухтонального блокирующего сигнала (стандартный

тестовый режим в требованиях, предъявляемых к базовым станциям W-CDMA) девиация коэффициента шума не превышает 1 дБ.

Коэффициентом ослабления зеркального канала называется отношение уровня сигнала ПЧ, порождаемого полезным входным сигналом, к уровню сигнала ПЧ, порождаемого зеркальным каналом. Этот параметр измеряется в децибелах. Хорошее ослабление зеркального канала крайне важно, поскольку мощность зеркального канала может намного превышать мощность полезного сигнала. Недостаточное ослабление зеркального канала может исказить процесс переноса частоты. На рис. 5 показана зависимость ослабления зеркального канала от различных значений ПЧ для стандарта W-CDMA. Рассматриваемый приемник обладает превосходными показателями ослабления зеркального канала без какой-либо дополнительной калибровки. При помощи дополнительной цифровой коррекции можно достичь уровня ослабления зеркального канала, превышающего 75 дБ, что позволит приемникам прямого преобразования одновременно принимать несколько близких по частоте сигналов, сильно отличающихся по мощности (ключевая характеристика, которой должен обладать приемник для систем с несколькими несущими).

Заключение

Современные приемники прямого преобразования способны обеспечивать очень широкий мгновенный динамический диапазон и работать в очень широкой полосе радиочастот. С появлением новых интегрированных ВЧ-схем с улучшенными характеристиками стало возможным создание высококачественных приемников для базовых станций систем сотовой связи, программируемых в условиях эксплуатации. Подобное свойство аппаратуры позволяет использовать ее для обслуживания сразу нескольких стандартов сотовой связи. Чтобы гарантировать работоспособность приемника, разработчики должны уделять особое внимание нелинейностям высоких порядков. Изучив поведение в однональном и многональном режимах, можно лучше понять проблемы прямого преобразования, а также избежать распространенных недостатков, присущих системам с прямым преобразованием. ■