

# РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПРЕДЫСКАЖЕНИЯ

**ЗАХАР ХЛЫСТОВ**, инженер

*В статье рассматривается проектирование цифровых систем предискажения. Особое внимание уделяется анализу распространенных заблуждений. Приводится практический пример.*

До настоящего времени системы цифрового предискажения использовались, в основном, в сотовой связи для линейаризации усилителей. Соответственно, модернизация и повышение эффективности этих систем обусловлены, главным образом, стремлением повысить эффективность расхода мощности, использования спектра и пропускной способности в стандартах каждого нового поколения.

Сложные схемы модуляции, применяемые стандартами 3G, 4G и 5G, требуют

высокого уровня линейности передачи, значительно превышающий тот, который обеспечивает усилитель мощности. Следовательно, возникает необходимость в разработке методов линейаризации, удовлетворяющих требованиям стандарта к уровню искажений внутри и вне полосы.

Особого внимания требуют системы цифрового предискажения для 5G, поскольку в них используется модуляция более высокого порядка, а нелинейности в выходном сигнале усилителя

мощности (УМ) имеют более сложную природу. Необходимо, чтобы усилители мощности поддерживали увеличение нелинейностей в пределах возможностей блока линейаризации.

Кроме того, в силу высокой скорости данных, обеспечиваемой в 5G, потребляется значительно больше мощности, чем в предыдущих стандартах, несмотря на спектральную эффективность модуляции. В то же время возможности электропитания не всегда обеспечивают требуемый уровень.

Таким образом, возрастает важность систем цифрового предискажения как способа повышения эффективности потребления и, соответственно, сокращения затрат.

Системы цифрового предискажения последнего поколения вышли за рамки сотовых сетей и получили широкое распространение в схемах широкого вещания, спутниковых и персональных мобильных радиопередатчиках, – то есть области, в которых применяется сложная линейная модуляция для повышения эффективности использования спектра.

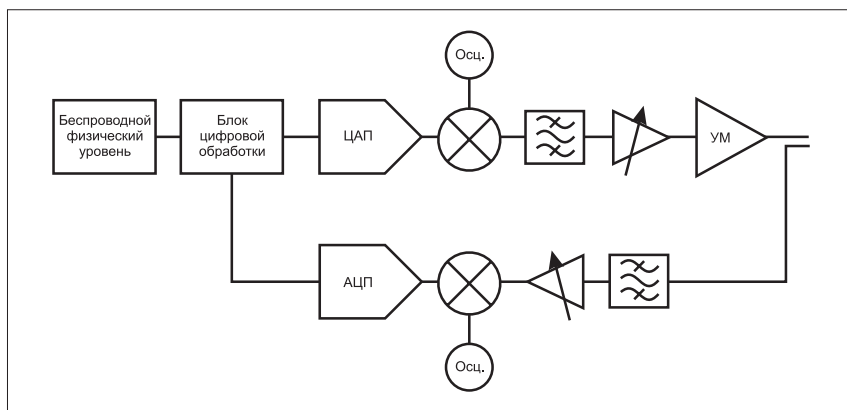


Рис. 1. Функциональная схема усилителя мощности и с блоком цифрового предискажения

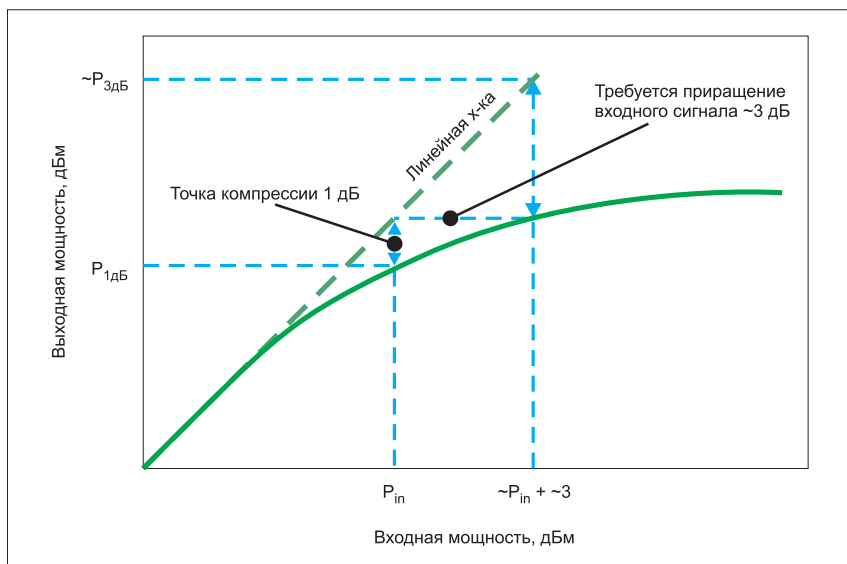


Рис. 2. Выходная характеристика УМ

## ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО ПРЕДИСКАЖЕНИЯ

Упрощенная схема цифрового предискажения показана на рисунке 1. Прямой тракт образован блоком цифрового предискажения, на вход которого поступает беспроводной цифровой сигнал, ЦАП, повышающим преобразователем и УМ. Контур обратной связи содержит понижающий преобразователь и АЦП. Обратная связь необходима для компенсации эффектов памяти УМ.

Блок цифрового предискажения компенсирует насыщение УМ за счет увеличения мощности входного сигнала. На рисунке 2 показана 1-дБ точка компрессии ( $P_{IN} = P_{1дБ}$ ) на исходной (без компенсации) амплитудной характеристике усилителя. Для компенсации насыщения требуется увеличить мощность входного сигнала на 3 дБ. При этом реальная выходная мощность равна

мощности, обеспечиваемой линейной характеристикой в точке  $P_{IN}$  (т.е. в точке компрессии).

При увеличении мощности входного сигнала на 0,5 дБ по отношению к точке компрессии расхождение между линейной и реальной характеристиками значительно возрастает (см. рис. 3). В этой новой рабочей точке требуется дополнительно увеличить мощность входного сигнала на 3,5 дБ. Таким образом, входной сигнал в сумме увеличивается на 6,5 дБ, благодаря чему в режиме насыщения обеспечивается та же выходная мощность, что и на линейной характеристике.

После точки компрессии дальнейшее увеличение входного сигнала не приводит к заметному увеличению выходной мощности, т.е. усилитель полностью насыщается. Можно сказать, что для получения более высокой выходной мощности требуемое приращение входного сигнала увеличивается экспоненциально. Работа вблизи точки насыщения нежелательна, поскольку приходится применять адаптивный алгоритм внесения предискажений, существенно расширяется требуемый динамический диапазон, а также повышается порог шума.

Вероятно, одним из наиболее распространенных вопросов, которые возникают при разработке блока предискажения, является определение корректирующей полосы пропускания в прямой цепи.

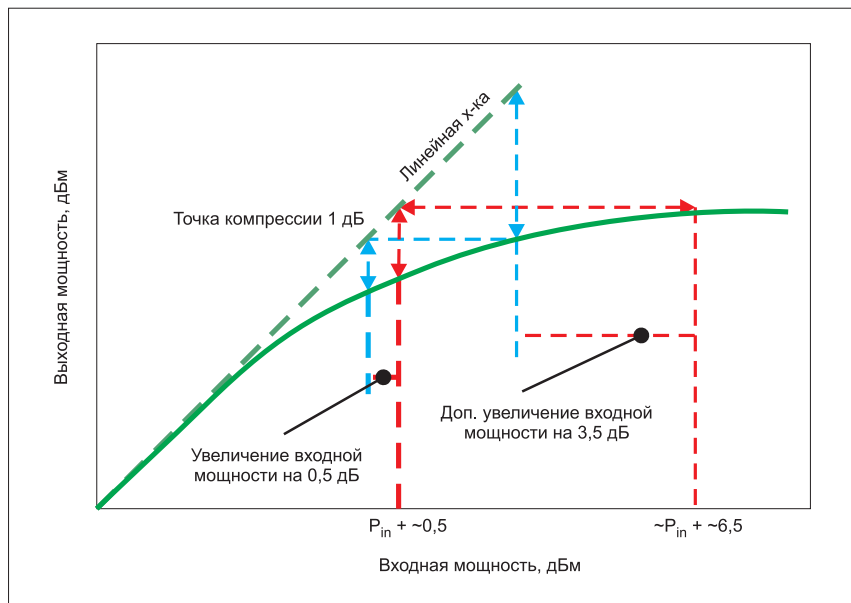


Рис. 3. Выходная характеристика УМ. Приращение выходного сигнала при увеличении мощности входного сигнала на 0,5 дБ

На рисунке 4а показан спектр двухтонного выходного нелинеаризованного сигнала УМ, содержащий только интермодуляционные составляющие 3-го и 5-го порядков (IMD3 и IMD5). Согласно нелинейной теории предискажений, для полной коррекции интермодуляционных составляющих требуется коррекционный сигнал с бесконечным количеством нечетных составляющих (см. рис. 4б). Поскольку бесконечная полоса коррекции не обеспечивается ни в одной реальной системе, прихо-

дится искать оптимальное соотношение. На практике коррекционные составляющие, начиная с определенного порядка, позволяют незначительно улучшить работу системы.

На рисунке 5а показан широкополосный выходной сигнал УМ без линейаризации. При отбрасывании части коррекционных составляющих внутри полосы входного сигнала в выходном спектре присутствуют остаточные искажения (см. рис. 5б). При оптимальном подборе полосы коррекции они

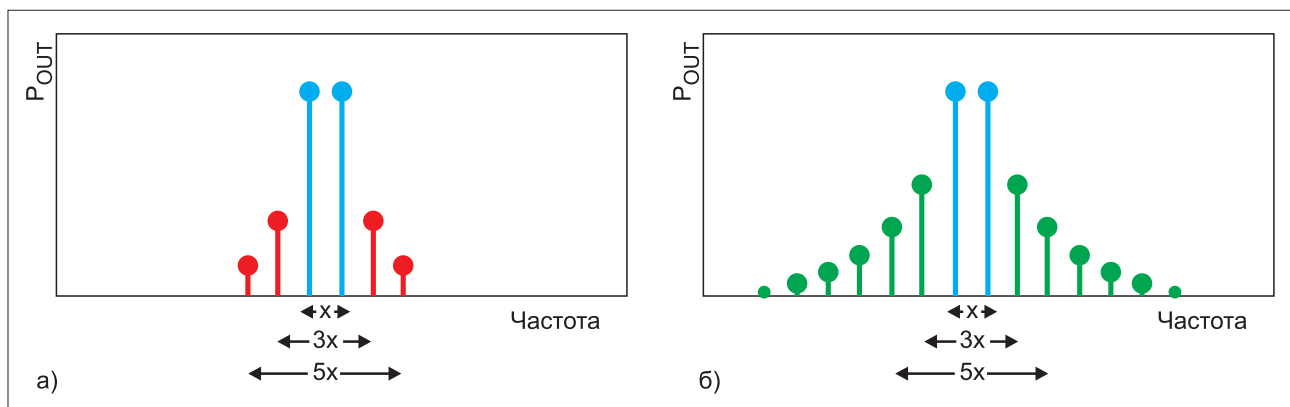


Рис. 4. а) двухтонный выходной спектр УМ без линейаризации; б) соответствующий входной коррекционный сигнал

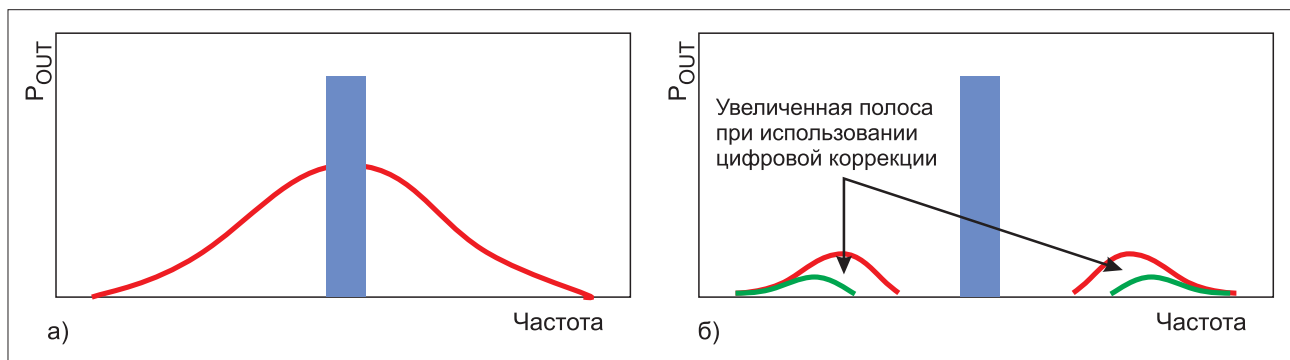


Рис. 5. а) выходной спектр УМ без линейаризации; б) линейаризованный выходной сигнал

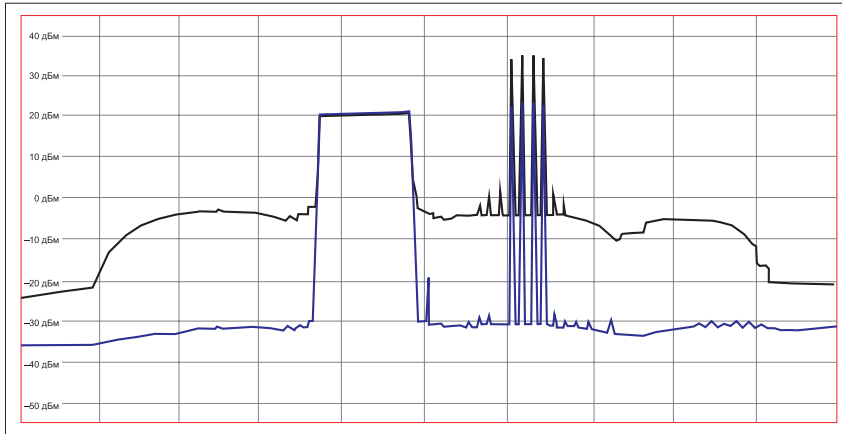


Рис. 6. Выходной сигнал усилителя Догерти с сигналами 4G и 2G и несколькими несущими с линейризацией и без нее. Частотный диапазон: 841,6–1001,6 МГц; средняя выходная мощность: 46 дБм

уменьшаются до приемлемого уровня с учетом допуска.

Рекомендуется, чтобы полоса сигнала коррекции основного тона была в 4–5 раз больше общей полосы модуляции (т. е. при умножении ее на пять покрываются все результаты предвыскажения 5-го порядка). Это приблизительная оценка, которая может меняться в зависимости от требований. Прямой цифровой и аналоговый тракты передатчика должны поддерживать работу в этой полосе, чтобы корректирующий сигнал был представлен полностью на входе УМ.

Таким образом, при ширине полосы модуляции 100 МГц система поддерживает полосу коррекции шириной 400–500 МГц от устройства предвыскажения до входа УМ в соответствии с упомянутой рекомендацией.

Моделирование позволяет определить требуемую полосу коррекции. Поскольку, однако, нелинейности обусловлены и программно, и схемотехнически, для определения полосы пропускания необходима эмпирическая оценка. В этом случае можно найти точ-

ную ширину полосы, обеспечивающей требуемую спектральную мощность излучения и допустимую величину ошибки модуляции. Во избежание увеличения стоимости прототипа следует использовать оценочные карты, представленные на рынке.

На рисунке 6 показаны характеристики, обеспечиваемые новейшими блоками предвыскажения. Общая мгновенная полоса смешанного сигнала (4G и многочастотный 2G) равна 40 МГц. С одной стороны, совместное использование устройств передачи позволяет сократить затраты, однако сигнал имеет сложную форму.

Характеристики на рисунке 6 представлены до и после линейризации. Средняя выходная мощность усилителя Догерти составляет 46 дБм. В рассматриваемом случае исходный сигнал имеет выраженную нелинейность. После линейризации уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка улучшается почти на 30 дБ. Следует отметить выравнивание наклона коэффициента усиления внутри полосы, которое осуществляется блоком предвыскажения.

Это дополнительное преимущество блока цифрового предвыскажения.

На рисунке 6 отражены результаты работы блока предвыскажения вне полосы пропускания. На рисунке 7 показана компенсация искажений внутри полосы, которая достигается за счет линейризации. Представлено исходное передаваемое созвездие для несущей 64 QAM и его вид после линейризации. Блок предвыскажения удаляет искажения AM-AM и AM-PM, вносимые усилителем мощности. Из-за этих искажений могут увеличиваться ошибки модуляции (см. рис. 7а). В этом примере коэффициент ошибки модуляции улучшается примерно на 6 дБ.

Хотя блок предвыскажения повышает КПД, блок линейризации потребляет мощность для питания схемы коррекции, адаптивную обработку сигнала и расширения полосы пропускания в прямой и обратной цепях. Мощность потребления блоком предвыскажения значительно зависит от стандарта передачи, целевой технологии и требуемых характеристик. Для широкополосных систем 4G/5G весьма приблизительная оценка дает величину 3 Вт. Для устройств с меньшей мощностью передачи, к которым относятся малые ячейки и устройства с множественными антеннами (МИМО), эта величина должна быть на уровне, на котором предвыскажения позволяют в достаточной мере увеличить КПД и выполнить остальные требования, например по спектральному излучению.

#### ОБРАТНЫЙ КОНТУР

Если линейность обратного контура недостаточна, характеристики могут ухудшиться. Поскольку обратная цепь относится к контуру управления, блок предвыскажения вносит сигнал, коррек-

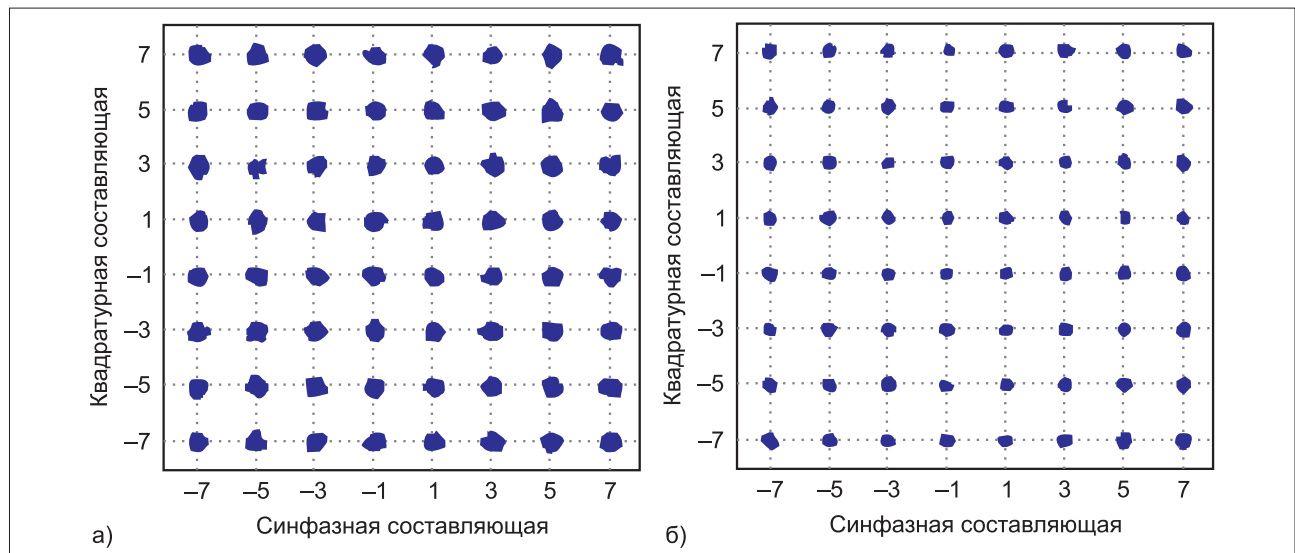


Рис. 7. Созвездие 64QAM: а) до линейризации, MER = 33,1 дБ; б) после нее, MER = 39 дБ

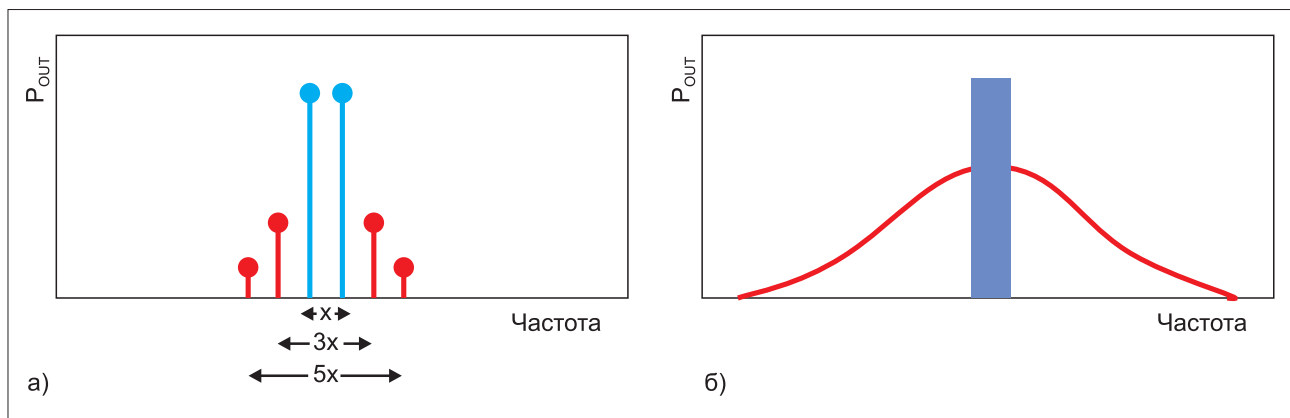


Рис. 8. Спектр искажений: а) двухтонового; б) широкополосного выходного сигнала

тирующий нелинейность обратного контура. В свою очередь, этот сигнал появляется в выходном сигнале. В процессе разработки схемотехнической части следует внимательно отнестись к линейности обратного контура, в частности преобразователя данных.

В отличие от классической схемы, в приемниках с обратной связью линейность контуров имеет большее значение, чем отношение сигнал/шум.

Похожие рассуждения применимы к искажениям любого типа в обратном контуре, например к нестабильности коэффициента усиления или фазы сигнала. Если не принять соответствующие меры, искажения могут перейти в передающий контур. Для устранения этого эффекта осуществляется линейная коррекция контура обратной связи, хотя оценка выходного сигнала только лишь приемника в отдельности не является простой задачей.

Одним из распространенных заблуждений является то, что полоса пропускания обратного контура должна быть такой же, что и у сигнала коррекции в прямой цепи. На практике контур ОС должен содержать достаточное количество искажений разных порядков, чтобы упростить структуру сигнала коррекции в прямом контуре, у которого ширина полосы может быть меньше полосы прямого контура.

На рисунке 8 показаны два сигнала с одинаковой мгновенной полосой. На рисунке 8а в сигнале, состоящем из двух несущих с узкой полосой, присутствуют искажения 3-го и 5-го порядков. Чтобы захватить информацию IMD5, полоса обратного канала должна в пять раз превышать ширину мгновенной полосы пропускания. В этом случае необходимо, чтобы полоса обратного канала была равна полосе прямого. На рисунке 8б показан широкополосный шумоподобный несущий сигнал с продуктами искажения, которые либо попадают в полосу пропускания, либо находятся вне ее.

Если полоса обратного контура уже пятикратного значения ширины модуляционной полосы, она по-прежнему будет захватывать часть составляющих 5-го и более высокого порядков. В этом случае лучше, чтобы полоса пропускания обратного канала была меньше, чем прямого. На практике полоса в обратном канале подбирается эмпирически, поскольку из-за ограниченных полос время алгоритмической сходимости может сократиться, что не всегда желательно.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ

Для получения оптимальных характеристик блока цифрового предсказания следует учитывать негативные эффекты в реальных схемах, а также неидеальности (в дополнение к неидеальностям УМ), которые могут ухудшить достигнутый уровень коррекции. Неравномерность фазы и коэффициента усиления в аналоговом прямом и обратном контурах, фазовый шум гетеродина, коэффициент прямого преобразования, рассогласование фаз, утечка несущей, нестабильность коэффициента усиления УМ и тактового сигнала в управляющем контуре приводят к ухудшению характеристик. В состав более сложных блоков цифрового предсказания входят подсистемы для коррекции основным, если не всех этих неидеальных характеристик.

В самом деле, одной из наиболее важных задач при разработке блока цифрового предсказания является наладка этих корректирующих подсистем, чтобы предотвратить нежелательное взаимодействие между ними и устранить нелинейности УМ.

Отдельного упоминания заслуживает эффект памяти усилителя, из-за которого выходной сигнал УМ является функцией не только текущего входного сигнала, но и его прошлых значений.

Этот эффект обусловлен множеством причин, среди которых наиболее ответственными являются следующие.

- Частотная вариация коэффициента усиления в полосе модуляции.
- Изменение напряжения питания транзисторов (например, вызванное неидеальностью стока на частоте модуляции)
- Тепловые эффекты при изменении температуры переходов вызывают изменение нелинейной характеристики на частоте огибающей модуляции.
- Эффекты захвата заряда. Все полупроводниковые материалы, в т. ч. на границе раздела слоев, стремятся захватить заряды (электроны и дырки) внутри канала транзистора, что приводит к изменению тока, которое зависит не только от мгновенного напряжения устройства, но и от истории изменения сигнала напряжения. В системах 5G для широкополосной передачи используются транзисторы на нитриде галлия. Смешанные полупроводники, к которым относятся арсенид и нитрид галлия, в большей мере подвержены эффекту захвата заряда, чем традиционный кремниевый МОП-транзистор.

Линейность работы значительно ухудшается, если эффект памяти усилителя нельзя скорректировать блоком цифрового предсказания. В этом случае применяют цифровую коррекцию на основе ПЛИС, которая выполняет более сложный алгоритм коррекции, соответствующий глубине памяти УМ. Поскольку при этом потребляются дополнительные ресурсы для обработки сигнала, следует по возможности, прежде всего, пересмотреть разработку УМ, чтобы снизить эффект памяти.

На рисунке 9 показана работа подсистемы коррекции, в которую входит блок предсказания с автоматическим подавлением отражений несущей, вызванных несоответствием фаз и коэффициента усиления аналогового квадратурного модулятора (AQM) в передатчике прямого преобразования. Алгоритм коррек-

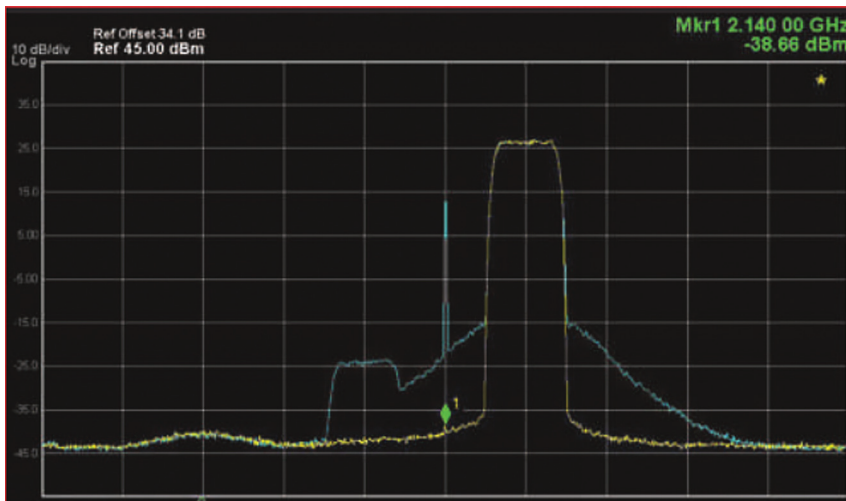


Рис. 9. Подавление отражений несущей и сигнала гетеродина с помощью цифрового предискажения

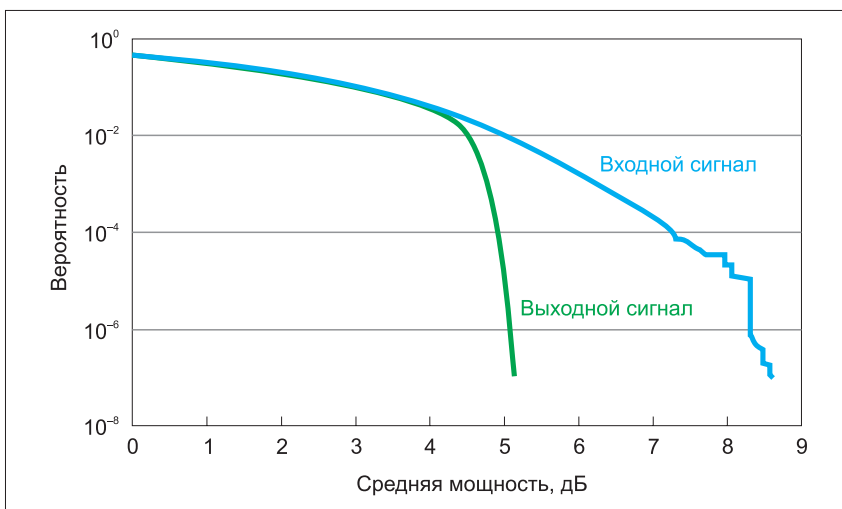


Рис. 10. Результаты моделирования функции распределения для спутникового (входного) сигнала 64 QAM. Коэффициент амплитуды (выходной сигнал) уменьшен так, чтобы отношение PAPR = 5 дБ при вероятности  $10^{-5}$

ции в большей мере подавляет утечку с гетеродина AQM. Более совершенные блоки цифрового предискажения могут независимо корректировать отражение несущей и утечку с гетеродина как в прямом, так и в обратном трактах, не позволяя сигналу коррекции в канале наблюдения попасть в выходной передаваемый сигнал.

Следует осторожно располагать второстепенные блоки цифровой коррекции внутри прямого канала, поскольку из-за нелинейного характера системы не всегда обеспечивается суперпозиция. Например, описанный выше блок компенсации недостатков AQM следует расположить за блоком предискажения, а не перед ним, чтобы компенсированный сигнал коррекции не содержал нелинейности.

Современные сложные блоки цифрового предискажения обеспечивают линеаризацию не только за счет контура управления. Помимо линейной коррекции, подавления отражений несущей и сигнала гетеродина, блок

цифрового предискажения также обеспечивает компенсацию температурной нестабильности коэффициента усиления.

Более того, в приложениях с несколькими передатчиками, к которым относятся устройства формирования луча или системы с несколькими антеннами, можно реализовать общий обратный контур между блоками предискажения в каждой цепи передачи и тем самым выровнять коэффициент усиления и фазы между каналами.

#### УМЕНЬШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДЫ

Уменьшение коэффициента амплитуды (crest factor reduction, CFR), как и цифровое предискажение, является методом, который применяется для повышения КПД усилителя мощности. Рассмотрим его подробнее.

При уменьшении этого показателя изменяется входной сигнал, а именно, уменьшается отношение пикового уровня мощности к среднему (peak-

to-average power ratio, PAPR). При этом увеличивается ошибка модуляции внутри полосы (в разрешенных пределах). Усилитель мощности с большей максимальной (пиковой) допустимой мощностью может работать при более высокой средней мощности и КПД. При уменьшении коэффициента амплитуды необходимо знать требования стандарта передачи и конфигурацию несущей.

На рисунке 10 представлены результаты симуляции кумулятивной функции распределения для спутникового сигнала 64 QAM. Коэффициент амплитуды уменьшен так, чтобы обеспечивалось отношение PAPR = 5 дБ при вероятности  $10^{-5}$ .

Современные шумоподобные схемы линейной модуляции обеспечивают очень высокое отношение PAPR, при котором CFR можно уменьшить более чем на 5 дБ, чтобы значительно повысить КПД.

Напротив, блок цифрового предискажения повышает эффективность за счет такого уровня линейности УМ, для обеспечения которого потребовался бы УМ с лучшими характеристиками. Блок цифровой обработки менее чувствителен к применяемому типу модуляции, чем CFR, и выдает сигнал коррекции исходя из характеристик композитного сигнала, приложенного независимо от стандарта передачи. Уменьшение коэффициента амплитуды и цифровое предискажение – это разные, но дополняющие друг друга технологии, которые можно совместно использовать.

#### ВЫВОДЫ

Разработка блока цифрового предискажения является одним из этапов проектирования передатчика. Блоки цифрового предискажения последнего поколения корректируют комплексные нелинейности и схемотехнические недостатки, однако требуют использования таких ресурсов как ПЛИС, микросхемы памяти, регистры и умножители, что увеличивает стоимость решений. С учетом этого следует максимально использовать возможности аналогового блока предискажения. Необходимо, чтобы УМ не переходил в режим насыщения при максимальном ожидаемом сигнале, поскольку в этом случае невозможно компенсировать нелинейность. В то же время не обязательно, чтобы УМ был линейным – достаточно, чтобы его допустимая входная мощность превышала пиковое значение входного сигнала. Наилучшие характеристики достигаются при линеаризации более простого УМ, чем при использовании сложного УМ с высокой линейностью. ◻