

ПАССИВНАЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИЯ В СВЧ-ЦЕПЯХ: МЕХАНИЗМЫ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ

Л. Белов, к.т.н., В. Кочемасов, к.т.н., Е. Строганова, д.т.н. belovla@gmail.com

Уровень интермодуляционных искажений (ИМИ) широкополосных сигналов микроволнового диапазона – критический параметр, влияющий на характеристики систем связи и на возможность соблюдения в них нормативов электромагнитной совместимости (ЭМС). Специфический вид ИМИ – пассивная интермодуляция (ПИМ) – возникает в узлах и конструкциях, которые традиционно считались линейными: в подложках печатных плат, в микрополосковых линиях, в радиочастотных кабелях и соединителях, в антенных конструкциях и окружающих антенну предметах. Увеличение мощности сигналов, частотное уплотнение каналов связи, повышение пространственной плотности размещения аппаратуры на базовых станциях мобильной связи и другие факторы [1] предъявляют жесткие требования к уровню ПИМ. В статье рассматриваются причины появления ПИМ, методы ее измерения и способы снижения.

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАССИВНОЙ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ

Интермодуляционные явления возникают в электрических цепях при нелинейном преобразовании суммы колебаний нескольких частот или одного сигнала со сплошным частотным спектром. В выходной цепи такого узла, кроме искажений в пределах полосы частот входного сигнала, возникают внеполосные мешающие комбинационные составляющие с частотами, которых не было на входе. Продукты ПИМ могут попасть в полосу пропускания приемного устройства этой же системы связи либо в полосы частот других систем связи, нарушая требования ЭМС. Для пользователей телекоммуникационных систем это оборачивается тем, что ухудшается соотношение сигнал/шум и снижается качество приема информации [2].

Если на вход электронного узла поступают два синусоидальных колебания с частотами f_1 и f_2 , то на выходе возникают составляющие с комбинационными частотами $f_k = \pm n f_1 \pm m f_2$, где n и m – целые

числа натурального ряда 0, 1, 2,.... Если одна или обе составляющие передаваемого сигнала (Tx) имеют сплошной спектр с полосой занимаемых частот Δ (рис.1), то создаваемые приему (Rx) помехи имеют структуру интермодуляционной полосы третьего порядка ИМ3 на основе комбинаций вида $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$, полосы пятого порядка ИМ5 на основе комбинаций вида $3f_1 - 2f_2$ и $3f_2 - 2f_1$, а также интермодуляционных полос более высокого нечетного порядка.

Уровни мешающих составляющих с частотами выше и ниже полосы передачи (ИМ⁺ и ИМ⁻ соответственно на рис.1) одинаковы, если нелинейность безынерционная; они могут различаться, если в инерционном нелинейном элементе проявляется эффект памяти, вызванный амплитудно-фазовым преобразованием. Соотношение между уровнями интермодуляционных продуктов третьего, пятого и более высоких порядков изменяется по мере увеличения мощности входного сигнала $P_{вх}$ на частотах f_1 и f_2 : мощность ИМ3 возрастает со скоростью 3 дБ/дБ, мощность ИМ5 – со скоростью 5 дБ/дБ и т.д.

В условиях острого дефицита частотного ресурса составляющие ИМИ могут попадать в выделенные полосы маломощного приемного устройства своего или соседнего по частоте стандарта и ухудшать его функционирование [3]. Например, для сети связи стандарта GSM-900 выделены полосы приема/передачи (890–915) / (925–960) МГц. Для значительной частоты передачи 930 и 955 МГц интермодуляционная составляющая третьего порядка с частотой $2 \times 930 - 955 = 905$ МГц попадает в полосу приема этого стандарта. Для стандарта 3G-UMTS с частотами (1920–1980) / (2110–2170) МГц интермодуляционная компонента излучения седьмого порядка с частотой $4f_1 - 3f_2$ попадает в полосу его приема.

При расположении на одной вышке сотовых систем антенн разных стандартов ситуация усложняется [4]. Например, интермодуляционные продукты излучения второго порядка системы GSM-900 попадают в полосу приема GSM-1800; ИМ-продукты четвертого порядка от GSM-900 и третьего порядка от GSM-1800 мешают приему сигналов стандарта UMTS. По мере развития в России широкополосных систем 4G с полосами частот от (832–839,5) / (791–798,5) МГц до (2530–2540) / (2650–2660) МГц, а также цифрового телевидения DTV увеличивается риск недопустимого влияния мешающих интермодуляционных продуктов. Повсеместное применение [5] косайтинга (совместного использования оборудования различными операторами или для разных стандартов связи) приводит к тому, что излучения, вызванные пассивной интермодуляцией, загрязняют полосы частот базовых станций сотовой связи.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПИМ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЕЕ УРОВНЯ ПИМ в радиочастотных соединителях

В коаксиальных соединителях [6] нелинейные явления, приводящие к ПИМ, могут возникать, например, в результате недостаточно плотного контакта в токонесущих соединениях "металл-металл", а также влияния нелинейных процессов в корпусе соединителя или в покрытии его поверхности.

Из-за особенностей конструкции или технологии изготовления коаксиального соединителя, недостаточного усилия в зоне контакта, погрешностей заделки кабеля могут образоваться полости, неровности, микротрещины, дефекты и загрязнения металлической поверхности в области контактирования по центральному проводнику или по внутренней поверхности коаксиальной линии. При этом удлиняется путь тока, возникает потенциальный барьер напряжения, могут появляться

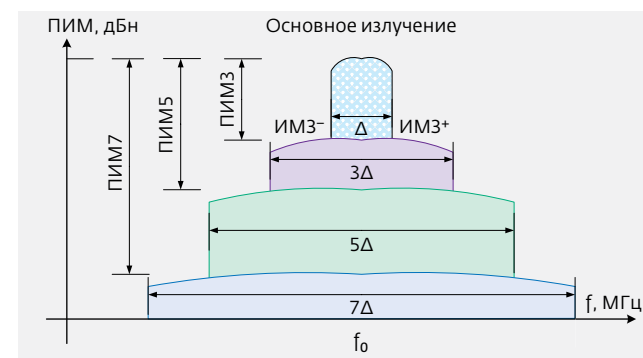


Рис.1. Интермодуляционные составляющие на выходе нелинейного узла вблизи рабочей полосы частот. f_0 – центральная частота сигнала

микроскопические искрения, при которых генерируются продукты интермодуляции. Поверхностные окислы металлов ведут себя как металлооксидные детекторы с нелинейной характеристикой ("диодный эффект"). На поверхности металла сохраняются влага, пыль, органические загрязнения и остатки различных солей металлов после операций химического травления и осаждения покрытий. Они также имеют нелинейную вольтамперную характеристику (ВАХ), приводящую к ПИМ. Плотный контакт необходим для того, чтобы при воздействии кислорода из окружающей среды не допустить коррозии, так как оксидный слой даже малой толщины имеет нелинейную ВАХ.

Резистивный и магнитно-резистивный эффекты в разнородных проводниках внутри соединителя вызывают локальное изменение сопротивления в области контакта. Сталь (в том числе нержавеющая), железо, никель имеют ферромагнитные свойства, в них могут проявляться эффекты гистерезиса, приводящие к нелинейным явлениям и ПИМ. Поэтому высококачественные соединители должны изготавливаться из дорогостоящих, но немагнитных материалов – латуни,

бериллиевой и фосфористой бронзы. Если на материал с магнитными свойствами нанесено антикоррозийное покрытие (например, в результате серебрения или золочения), то необходимо учитывать глубину скин-слоя для проходящих через контакты высокочастотных токов. При недостаточной толщине или неравномерности покрытия проникающие в основной материал токи будут вызывать ПИМ. Использование в качестве антикоррозийного покрытия соединителя гальванически осажденного никеля также недопустимо при высоких требованиях к ПИМ. Корпус соединителя, изготовленный из сплавов алюминия, уменьшает массу изделия, но окисная пленка на поверхности этого металла может создать недопустимый уровень ПИМ.

Для покрытия оптимизированных по уровню ПИМ соединителей широко применяются "белая бронза" (немагнитный коррозионно-стойкий и износостойкий сплав меди, олова и цинка) и серебро. Уровень ИМЗ в высококачественных соединителях, корпус которых покрыт "белой бронзой", а центральный контакт – серебром, не превышает -155 дБн при тестировании двухчастотным сигналом мощностью 2×43 дБмВт. Измерения уровня ИМЗ для типовых коаксиальных соединителей с тестовым сигналом на частотах 463 и 468 МГц мощностью 2×43 дБмВт показали [7], что для соединителей типа SMA уровень собственных помех ИМЗ составил -108 дБн, типа BNC -118 дБн, типа "стандартный N" -123 дБн, типа "покрытый серебром N" -163 дБн, типа DIN 7-16 не хуже -175 дБн. Выяснилось, что прямые соединители имеют более низкий уровень ПИМ, чем угловые.

Некачественную подготовку и заделку кабеля в коаксиальный соединитель трудно обнаружить при осмотре невооруженным глазом. Качество соединителей по параметру ПИМ снижается по мере увеличения количества циклов соединений-разъединений в результате износа, появления микротрещин, ослабления усилия в соединениях металл-металл.

ПИМ в материале печатной платы

Материал подложки и технология изготовления печатной платы имеют существенное значение для снижения уровня ПИМ. Ведущие производители фольгированных диэлектрических материалов (ламинатов) для подложек СВЧ-плат оптимизируют свойства выпускаемых продуктов за счет снижения уровня диэлектрических потерь, согласования коэффициентов теплового расширения диэлектрика в разных направлениях с коэффициентами

теплового расширения металлических покрытий [8]. Например, специализированный ПИМ-ламинат типа DiClad 880-PIM компании Arlon-MED, изготовленный на основе многослойного армированного стеклотканью фольгированного фторопласта PTFE, характеризуется на частоте 10 ГГц диэлектрической проницаемостью $\epsilon_f = 2,20$ с температурным коэффициентом $TK\epsilon = -160$ ppm/°C и малым затуханием $tg\delta = 0,0009$. Ламинат имеет высокую теплопроводность $\lambda = 0,261$ Вт/мК в интервале температур от -40 до 150°C. Испытания изделий, изготовленных из этого материала, при двухчастотном тестовом сигнале диапазона 1,9 ГГц мощностью 2×20 Вт показывают, что относительный уровень ИМЗ не превышает -155 дБн.

ПИМ в полосковых, коаксиальных и волноводных линиях передачи

Повышение уровня ПИМ в линиях передачи вызывают холодная сварка, скрутка или стяжка, загрязнение на поверхности диэлектрика, трещины в полужесткой оболочке кабеля, температурные колебания окружающей среды, нагрев проводников от протекающего постоянного и высокочастотного тока.

В полосковых линиях передачи [9] уровень ПИМ может возрасти по следующим причинам: использование диэлектрика печатной платы недостаточно высокого качества; применение промежуточных слоев покрытий из никеля, обладающего ферромагнитными свойствами; возникновение градиентов распределения температур в материале платы из-за нагрева печатного проводника.

Установлено, что в моделях коаксиальных кабелей, не ориентированных на снижение уровня ПИМ, при двухчастотном тестовом сигнале диапазона 1,8 ГГц мощностью 40 дБмВт (10 Вт) уровень ИМЗ составляет -78 дБмВт, а при использовании сертифицированного по этому параметру кабеля и соединителей типа DIN 7-16 уровень таких помех снижается на 30 дБ и не превышает -125 дБмВт.

Колебания температуры окружающей среды из-за различий в коэффициентах температурного расширения для подложки, покрытий и металлизации приводят к снижению плотности соединения и к образованию локальных участков с окислами, имеющими нелинейную ВАХ. Нагрев печатного проводника от протекающего по линии передачи тока [10] вызывает различное тепловое расширение диэлектрика подложки и покрытий.

Специфический источник ПИМ – мультипакторный эффект – характерен для пассивных линий передачи в составе спутниковых ретрансляторов,

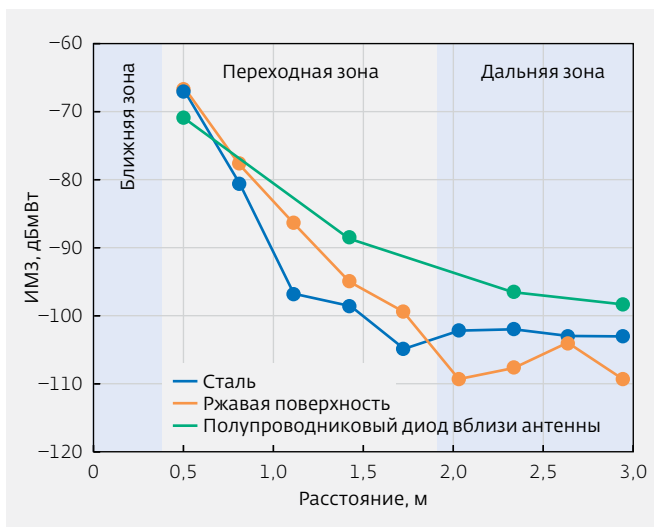


Рис.2. Изменение уровня ПИМ в зависимости от расстояния между отражающим объектом и антенной (безэховая камера, тест 2×20 Вт)

функционирующих в условиях вакуума и наличия потоков заряженных частиц, вызывающих вторичную эмиссию.

ПИМ в направленных ответвителях, частотных дуплексерах и трансформаторах

В направленных ответвителях, вентилях и циркуляторах, содержащих ферритовые материалы [11], нелинейные проявления обусловлены гистерезисным характером их магнитных свойств. По мере повышения мощности входного сигнала увеличение плотности магнитного потока приводит к режиму насыщения, что увеличивает уровень ПИМ.

В трансформаторах с ферритовыми сердечниками, кроме нелинейности, обусловленной ферритом, повышенный уровень ПИМ связан с магнитным сопротивлением сердечника. Для типовых пассивных компонентов используются марганцево-цинковые сердечники низкого сопротивления, которые для предотвращения короткого замыкания часто покрывают изоляционным материалом. Провода обмотки также изолированы для предотвращения короткого замыкания между витками. Обнаружено, что в процессе стандартных сборочных операций не исключается повреждение изоляции на проводах и сердечнике, что приводит к локальным коротким замыканиям, и в результате повышается уровень ПИМ [12]. Применение специальных материалов и контроль качества изоляции в оптимизированных по уровню ПИМ конструкциях снижают вероятность таких эффектов.

Важную роль в снижении влияния ПИМ на функционирование системы передачи данных играют архитектура, материалы и технология изготовления частотно-разделительных фильтров – дуплексеров. Для обеспечения высокой прямоугольности амплитудно-частотных характеристик в переходной зоне между полосами Tx и Rx необходимо использовать резонансные цепи высокого порядка с точной настройкой. Применение в них подстроечных элементов в виде стальных винтов с недостаточно плотным покрытием из серебра способно существенно повысить уровень ПИМ за счет окислов металлов в резьбовых соединениях и привести к динамическим изменениям уровня ПИМ при воздействии механических вибраций.

Внешние источники ПИМ

Внешними по отношению к передающему устройству и антенному тракту источниками ПИМ выступают [13] конструктивные элементы антенного устройства, вышки и окружающие антенну предметы и объекты. В них используются стальные болты, стяжки, контактные соединения, имеющие нелинейные ВАХ и способные переизлучать мощность падающего на них СВЧ-сигнала в разных направлениях на различных комбинационных частотах. В результате этого сигнал на эквиваленте антенны может иметь допустимый уровень ПИМ, а в дальней зоне уровень ПИМ повышается до недопустимых значений. Это явление, получившее название "эффект ржавого болта", характерно для антенн и конструкций, недостаточно защищенных от воздействия агрессивной окружающей среды. При работе базовых станций сетей 3G/4G в общей полосе частот ПИМ от внешних источников приводит к снижению производительности и уменьшению зоны покрытия (рис.2) [13].

Современные антенны представляют собой сложные электрические и механические конструкции, которые поддерживают несколько полос и поляризации, имеют дистанционно управляемую диаграмму направленности. Следовательно, есть большая вероятность механических неисправностей при передаче сигнала. Обычно антенну проверяют на уровень ПИМ до установки. Для точного измерения характеристик антенны в условиях эксплуатации требуется учитывать место ее установки, так как существует потенциальная возможность возникновения ПИМ от внешних источников. В идеальной ситуации антенна должна быть размещена на неметаллической конструкции высотой не менее 0,5 м над землей, а главный лепесток направлен в свободное пространство (например,

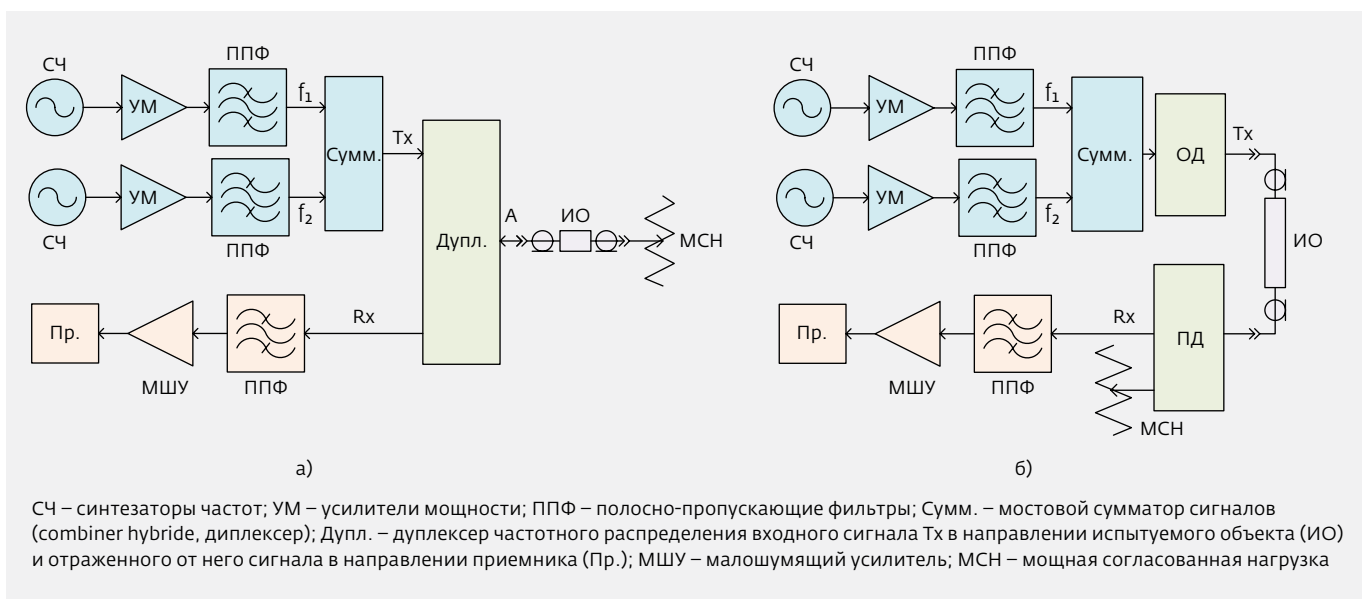


Рис.3. Схема измерения уровня ПИМ методами "на отражение" (а) и "на проход" (б)

вверх). Место вокруг антенны должно быть свободно от любых металлоконструкций (заборов, подъемников и вышек), которые могут вызвать ПИМ. Аэропорты, спортивные объекты и длинные туннели могут использовать систему распределенных антенн, где сигналы с базовых станций всех операторов объединяются и используют общую антенну и распределительную систему [5]. В таких случаях недопущение ПИМ становится критической задачей, которую невозможно решить даже с помощью высококачественной фильтрации.

Для поиска и минимизации помех от внешних источников ПИМ изменяют азимут направления главного лепестка и угол возвышения диаграммы направленности, устраняют нелинейные объекты, переизлучающие ИМ-компоненты, например металлические балки, в которых могут появиться окислы железа.

Для снижения уровня ПИМ применяют частотные дуплексеры (разделители падающих и отраженных волн близких частотных полос) с повышенной прямоугольностью амплитудно-частотных характеристик на границах частотных полос; конструкции, которые не содержат материалов и компонентов, способных к нелинейным преобразованиям проходящих сигналов. Также принимают меры по уменьшению пик-фактора мощности суммарного сигнала разных частотных полос в общих частях антенного тракта и изменяют тип поляризации передающей и приемной антенн. Разработаны рекомендации по размещению антенн разных стандартов и полос частот на одной вышке с целью

минимизации их взаимной связи и влияния, а также по конструкции и расположению внутренних (indoor) антенн с учетом конструктивных особенностей здания и аппаратуры.

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПИМ

В литературе и на практике большое внимание уделяется оценке уровня ИМИ и мерам по их снижению для повышения энергетической эффективности в усилителях мощности [12]. Рекомендации Международной электротехнической комиссии IEC 62037 (комитет 46, рабочая группа 6) [14] определяют процедуру измерения уровня ПИМ методом тестирования цепи или компонента сигналом в виде суммы двух синусоидальных колебаний смещенных частот f_1 и f_2 одинаковой мощности 2×10 Вт, 2×20 Вт или 2×30 Вт, а также измерения уровня спектральной составляющей на одной из частот ИМЗ - $2f_1 - f_2$ или $2f_2 - f_1$.

Измерять уровень ПИМ можно двумя способами: "на отражение" (рис.3а) и "на проход" (рис.3б). В качестве испытуемого объекта могут выступать кабельные сборки, фильтры, смесители, а также антенны. В роли приемника выступает анализатор спектра.

При измерениях ПИМ малого уровня необходимо принимать меры к тому, чтобы, во-первых, в достаточной мере ослабить связь между синтезаторами тестовых сигналов, например, при помощи мостового сумматора; во-вторых, обеспечить низкий уровень собственных ПИМ-компонентов, возникающих в кабелях, соединителях, частотных

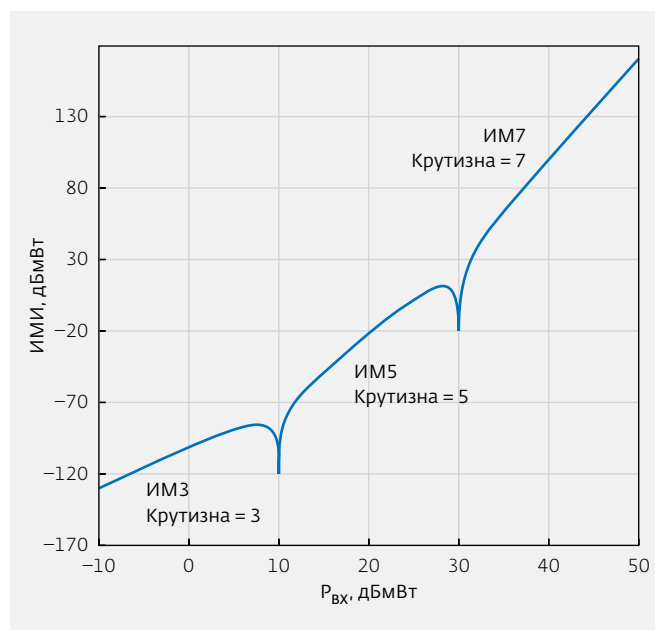


Рис.4. Суммарная мощность комбинационной помехи в зависимости от мощности двухчастотного тестового сигнала

фильтрах, в мощной согласованной нагрузке измерительной схемы (не более -170 дБмВт для тестового сигнала 2×43 дБмВт).

В качестве характеристики уровня ПИМ измеряемого компонента в [14] рекомендовано использовать абсолютное значение мощности сигнала на частоте ИМ3 в логарифмической шкале [дБмВт] по отношению к мощности в 1 мВт либо значение его мощности по отношению к мощности каждого из двух источников сигнала тестирования в шкале [дБн] при обязательном указании мощности тестового сигнала. Таким образом, оценки ПИМ -110 дБмВт и -153 дБн равносильны при тестовом сигнале 2×43 дБмВт.

Поскольку уровень ПИМ может изменяться в очень широких пределах, для обнаружения грубых неполадок в радиочастотном тракте применяют тестирующие сигналы меньшей мощности, например, 2×2 Вт, а для тонких измерений и обнаружения дополнительных источников увеличивают мощность тестовых сигналов до 2×40 Вт и более.

При повышенной рабочей мощности радиопередающего устройства наибольшие помехи приемному тракту могут создавать интермодуляционные компоненты более высокого нечетного порядка, например, ИМ5, ИМ7 и т.д., мощность которых значительно быстрее возрастает при увеличении мощности тестирующего сигнала (рис.4).



Рис.5. Динамический ПИМ-тест при простукивании компонентов в присутствии тестового сигнала

В системах с множеством несущих частот необходимо контролировать уровень пик-фактора мощности рабочего сигнала, чтобы установить в соответствии с ним мощность источника тестирования. При использовании технологии передачи с расширенным спектром ПИМ-помеха оказывается также широкополосной, что следует учитывать при настройке приемного устройства.

Метод "на отражение" имеет более высокую чувствительность, его применяют для объектов как с одним, так и с двумя портами. В [14] рекомендовано, чтобы остаточный уровень собственных интермодуляционных продуктов приемника и других элементов измерительной схемы был на 10 дБ ниже уровня продуктов тестируемого устройства и не превышал -170 дБн. Предлагается выполнять динамическое тестирование (рис.5), при котором проверяется механическая целостность и устойчивость конструкции. С этой целью проводится простукивание компонентов и соединений, фильтров, объединительных плат, антенн, сгибание кабелей и др. Это позволяет выявить дефекты контактных соединений, способных повысить уровень ПИМ в результате воздействия жары, холода, ветра, вибрации, переменных нагрузок.

Первоначальное тестирование уровня ПИМ проводят методом "на проход", затем применяют метод "на отражение", при этом определяют ближайшее место со значительным уровнем ПИМ. Каждый раз, когда источник обнаружен, увеличивают точность поиска следующего по величине ПИМ-источника. Тестирование повторяют до тех



Рис.6. Измерители уровня ПИМ компании Kaelus: а) батарейный тестер серии iTA, б) носимый анализатор серии iQA

пор, пока все значительные динамические проявления ПИМ не будут устранены.

АППАРАТУРА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПИМ

Специализированное оборудование для тестирования цепей, устройств и систем на определение уровня ПИМ производится фирмами Kaelus, Agilent, Rosenberger, Wireless Telecom Group, AWT Global, Anritsu и др.

Фирма Kaelus (подразделение компании Smiths Interconnect) – преемник известного производителя аппаратуры для тестирования ПИМ-параметров базовых станций сотовых сетей Summitek Instruments. Портативный батарейный анализатор пассивной интермодуляции серии iTA этой фирмы (рис.6а), совмещающий два диапазона, рассчитан на работу на вершине или у подножия мачты, на крыше, в здании с фазированными многоэлементными DAS-системами. В серии iTA представлены модели для стандартов LTE-800, GSM-900, DCS-1800, LTE-2600, AWS и др., оснащенные встроенными режимами мониторинга спектра, качания частоты и отслеживания изменения ПИМ по времени при динамическом тестировании по стандарту IEC 62037. Их собственный уровень ПИМ не более -168 дБн при тесте 2×20 Вт. Чувствительность приемника позволяет измерять ПИМ-компоненты с уровнем мощности от -50 до -128 дБмВт. Входная мощность двух тестовых источников устанавливается в диапазоне от 20 до 43 дБмВт с шагом 1 дБ. Контролируются ИМ-компоненты третьего, пятого, опционально седьмого и девятого порядков. Масса тестера iTA составляет 22 кг, ударостойкость 40 G, прибор функционирует от встроенных батарей до 2 ч при температуре от -10 до 45°С. Модули Range-to-Fault и Distance-to-PIM позволяют оперативно определить расстояния до имеющихся в тракте



Рис.7. Лабораторные анализаторы ПИМ: а) серии S1L компании AWT Global; б) серии Portable Type компании Rosenberger

неоднородностей и до нескольких источников ПИМ соответственно.

Анализаторы серии iQA (рис.6б) дают возможность контролировать ИМ-компоненты нечетного порядка от ИМ3 до ИМ11. Они имеют мощность тестовых сигналов от 33 до 43 дБмВт, питаются от сети, функционируют в диапазонах Tx/Rx от нижней полосы стандарта 700 МГц – (728–746) / (698–716) МГц – до частот стандарта UMTS – (2110–2170) / (1920–2080) МГц.

Лабораторный анализатор серии S1L компании AWT Global (рис.7а) предназначен для диагностики ПИМ-явлений на частотах от 730 до 2690 МГц. Чувствительность к ПИМ-компонентам в анализаторе S1L составляет -172 дБн при тесте 2×43 дБмВт; мощность источников тестовых сигналов устанавливается в пределах от 15 до 46 дБмВт. Прибор позволяет измерить компоненты нечетного порядка от ИМ3 до ИМ25; имеет динамический диапазон уровней не менее 96 дБ; обеспечивает документирование результатов; оснащен режимами измерения расстояния до источника нелинейности (Distance-to-PIM) и до источника линейного отражения (Distance-to-Fault). Прибор комплектуется кабелями, согласованными нагрузками, соединителями и адаптерами с малым уровнем ПИМ, тестовым источником искаженных сигналов PIMGEN с уровнем ПИМ до -80 дБмВт.

Анализаторы уровня ПИМ компании Rosenberger выпускаются в носимом (рис.7б) и стационарном исполнениях, предназначены для работы со стандартами AMPS, EGSM, DCS, PCS, UMTS, WiMAX в полосах (3500–3600) / (3400–3500) МГц, контролируют ИМ-составляющие от третьего до девятого порядков по двухчастотному сигналу мощностью от 37 до 46 дБмВт; их собственный уровень ПИМ не более -168 дБн.

Тестер MW82119A серии PIM Master компании Anritsu [13] (рис.8), разработанный для калибровки



Рис.8. Анализатор уровня ПИМ MW82119A серии PIM Master компании Anritsu

уровня ПИМ в полосе частот 900 МГц в сетях GSM, UMTS-900 и LTE, отличается высокой точностью измерений и оснащен режимами Distance-to-PIM для определения дистанции до источника нелинейности и PIM vs. Time для динамического тестирования. Опционально доступен GPS-приемник, позволяющий сопроводить записываемую информацию точными координатами места измерения. Помимо стандартной мощности 2×20 Вт прибор имеет опцию тестирования сигналом увеличенной мощности 2×40 Вт для более точного определения проблем, которые могут остаться незамеченными при стандартной мощности тестового сигнала.

В заключение следует отметить, что телекоммуникационные системы более зависимы, чем когда-либо, от характеристик радиочастотной инфраструктуры, реализация которой напрямую связана с конструкцией компонентов и качеством их сопряжения. ПИМ-тестирование стало неотъемлемой частью создания новых телекоммуникационных сетей и технологий. Архив результатов тестирования может быть использован для мониторинга сети в случае ухудшения качества связи и блокировки вызовов.

Проблемы, возникающие в связи с повышенным уровнем ПИМ и нарушением внутрисистемных требований ЭМС, должны решаться комплексно: необходимо принимать меры по оптимизации линейности материалов и компонентов в интервалах изменения параметров окружающей среды, выбирать с учетом требований к ПИМ частотные полосы, архитектуру и технологию изготовления частотно-разделительных цепей, конструкции и способы размещения антенн.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hartman R.** Passive Intermodulation (PIM) Testing Moves to the Base Station. – Microwave Journal, 2011, May 11.
2. **Cannon N.** PIM Testing Growing in Importance as 4G Rolls Out in Europe. – Microwave Journal, 2011, October 7.
3. **Стригин И.** Пассивные интермодуляционные помехи в сетях мобильной связи. – Технологии и средства связи, 2013, № 2, с. 39–40.
4. **Строганова Е.П.** Интеллектуальные антенны для сетей 3G. – Технологии и средства связи, 2008, № 6, с. 42–45.
5. **Строганова Е.П.** Косайтинг: "за" и "против". – Технологии и средства связи, 2008, № 4, с. 68–70.
6. **Джуринский К.** Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ / 2-е изд. – М.: Техносфера, 2006.
7. **Jargon J.A., DeGroot D.C.** Comparison of Passive Intermodulation Measurements for the U.S. Wireless Industries. NIST Technical Note 1515. October 1999.
8. **Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е.** Фольгированные диэлектрики – как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов. – Печатный монтаж, 2013, ч. 1 – № 2 (0043), с. 156–168, ч. 2 – № 3 (0044), с. 142–147.
9. **Wilkerson J.R., Lam P.G., Gard K.G., and Steer M.B.** Distributed Passive Intermodulation Distortion on Transmission Lines. – IEEE Trans. MTT, v. 59, № 5 (May 2011), p. 1190–1205.
10. **Rocas E., Collado C., Orloff N.D., Mateu J., Padilla A., O'Callaghan J.M., and Booth J.C.** Passive Intermodulation Due to Self-Heating in Printed Transmission Lines. – IEEE Trans. MTT, v. 59, № 2, (February 2011), p. 311–322.
11. **Collins S., Flynn K.** Intermodulation Characteristics of Ferrite-based Directional Couplers. – Microwave Journal, 1999, November 1.
12. **Белов Л.А., Кондрашов А.С., Рожков В.М., Ромащенко К.В.** Повышение линейности и энергетической эффективности усилителей мощности широкополосных СВЧ-сигналов. – Электросвязь, 2012, № 5, с. 23–25.
13. **Bell T.** Mitigating external sources of Passive Intermodulation. – Anritsu Company, 2013–9, № 11410-0756, Rev. A.
14. Стандарты МЭК на измерения ПИМ. IEC 62037: Passive RF and Microwave Devices, Intermodulation Level Measurement, parts 1...8, IEC 62037-2 Ed. 1.0 b:2013 RF Connectors, connector-cable assemblies and cables – Intermodulation level measurement.