УДК 621.396.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВУХСИГНАЛЬНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ЦИФРОВЫХ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

В.М. Питолин, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин

Обоснована методика выявления и количественной оценки опасности побочных каналов приема, обусловленных эффектами интермодуляции второго и третьего порядков. Методика включает этапы расчета частот и уровней продуктов интермодуляции в нелинейном тракте приемника и измерение параметров помехозащищенности приемника. Методика ориентирована на применение в практике испытаний цифровых радиоприемных устройств на электромагнитную совместимость и помехозащищенность и отличается снижением трудоемкости испытаний

Ключевые слова: закон распределения, плотность распределения вероятностей, моментные характеристики закона распределения, метод формирования сигнала

Методики измерения многосигнальной избирательности разработаны и стандартизированы в середине 1980-х годов (ГОСТ 12252-86, ГОСТ 22580-84). Указанные действующие до настоящего времени стандарты регламентируют показатели многосигнальной избирательности приемников (интермодуляционная избирательность, избирательность по комбинационным каналам приема) и методы их измерения. В это же время разработаны также нормы на значения характеристик многосигнальной избирательности приемников (ГОСТ 6551-82, Нормы ГКРЧ). Практическое применение указанной совокупности нормативно-методической базы в полной мере обеспечивает испытания на помехозащищенность аналоговых приемных устройств, однако далеко не в полной мере соответствует практическим потребностям оценки качества современных цифровых радиоприемников. Последнее обстоятельство обусловлено специфическими особенностями принципов построения цифровых радиоприемных устройств.

Особенности измерения параметров многосигнальной избирательности цифровых приемников (по сравнению с аналоговыми) связаны с необходимостью формирования цифровых испытательных сигналов, и с оценкой эффекта воздействия интермодуляционных помех по показателю BER [1].

Измерения многосигнальной избирательности приемников характеризуются высокой трудоемкостью, поэтому актуален поиск методов экспресс-анализа помехозащищенности приемников, позволяющих сократить время проведения испытаний при заданных ограничениях на достоверность получаемых результатов. Рассмотрим возможность решения поставленной задачи путем разумного сочетания инструментальных и расчетных методик исследования характеристик приемников.

На основании изложенного целью статьи является обоснование методики определения многосигнальной избирательности цифровых приемников, отличающейся от известных снижением трудоемкости измерительных процедур.

Расчет частот продуктов интермодуляции в нелинейном тракте приемника

Существующие методики оценки многосигнальной избирательности приемников реализуют выявление нежелательных каналов приема при подаче на его вход двухчастотного испытательного сигнала одинаковой амплитуды на частотах f_1 и f_2. Наиболее опасными побочными каналами приема являются интермодуляционные. Проявляются они в результате прохождения помех на выход приемника при воздействии на его входе двух (или более) помех, частоты которых не совпадают с частотами основного и побочных каналов приема [2]. В результате взаимодействия помех с частотами f_1 и f_2 на нелинейных элементах приемного тракта возникают интермодуляционные продукты вида

$$f_{in} = \pm mf_1 \pm nf_2 \qquad (1)$$

где m и n – целые числа.

Из комбинационной формулы (1) следует, что возможны интермодуляционные комбинации на частотах, совпадающих с частотой настройки приемника (которые попадают в полосу основного канала приема), либо с частотами зеркального и прочих каналов приема

Питолин Владимир Михайлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 2238018
Панычев Сергей Николаевич - ВИ ФСИН, д-р техн. наук, доцент, тел. 8-915-583-90-02
Самоцвет Николай Андреевич - ВГТУ, аспирант, тел. 8-951-871-87-04
Акулинин Станислав Алексеевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-76-95, e-mail: vstu-ppe@mail.ru

супергетеродинного приемника (попадают в полосы побочных каналов приема).

Известно, что из всех возможных продуктов интермодуляционных комбинаций наиболее опасными являются интермодуляционные искажения второго ($f_1 \pm f_2$) и третьего ($2f_2 - f_1, 2f_1 - f_2$) порядков, поскольку их амплитуды относительно велики, а частоты могут быть достаточно близко расположенными на частотной оси относительно частоты настройки приемника.

Таким образом, из приведенного краткого анализа интермодуляционных эффектов в приемнике следует, что расчет их частот не представляет сколько-либо значительных трудностей, в то время как выявление побочных каналов приема экспериментальным способом является продолжительной и трудоемкой операцией. Измерения и расчеты амплитуд помех для оценки относительной чувствительности приемника по интермодуляционным каналам также являются достаточно сложными и трудоемкими процедурами. Рассмотрим возможные способы упрощения указанных исследований за счет сочетания расчетных и экспериментальных методик.

Расчет амплитуд и мощностей продуктов интермодуляции в нелинейном тракте приемника

Предлагаемый упрощенный способ определения амплитуд интермодуляционных продуктов в приемнике основан на получении информации о передаточной характеристике нелинейного тракта приемника. Вид этой характеристики в основном влияет на амплитуды нелинейных откликов при поступлении на вход приемника двухчастотной помехи. В инженерной практике нелинейную статическую передаточную характеристику приемного тракта аппроксимируют степенным рядом вида [3]:

$$Y(X) = G_1 X + G_2 X^2 + G_3 X^3 + \ldots, \qquad (2)$$

где ***X*** – амплитуда сигнала на входе нелинейного тракта приемника, а ***Y***– на его выходе.

Ограничиваясь третьей степенью полинома (2) и подбирая с помощью стандартных математических аппроксимирующих пакетов безразмерные коэффициенты G1, G2 и G3 (они могут быть дробными и отрицательными), с достаточно высокой точностью можно аппроксимировать вид снятой экспериментально передаточной характеристики нелинейного тракта приемника.

При подаче на вход приемника нормального испытательного двухчастотного сигнала с амплитудами ***A*** и ***B*** (рис. 1) входной сигнал описывается простой функцией

$$X = A \sin\alpha + B \sin\beta, \qquad (3)$$

где $\alpha = 2\pi f_1 t$, $\beta = 2\pi f_2 t$ – частоты гармонических сигналов.

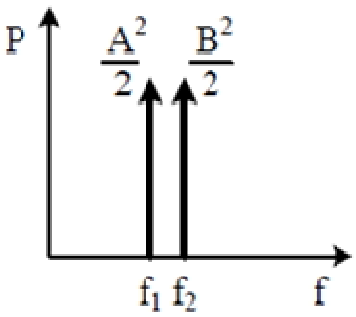


Рис. 1. Испытательный сигнал

Амплитуды продуктов интермодуляции второго и третьего порядков на выходе нелинейного тракта определяются, соответственно, параметрами

$$X^2 = (A \sin\alpha + B \sin\beta)^2 \quad и \quad X^3 = (A \sin\alpha + B \sin\beta)^3$$

В результате не сложных тригонометрических преобразований получены значения этих амплитуд:

$$(A \sin\alpha + B \sin\beta)^2 = \frac{A^2 + B^2}{2} -$$

$$- AB\cos(\alpha + \beta) + AB\cos(\alpha - \beta) -$$

$$- \frac{A^2}{2}\cos 2\alpha - \frac{B^2}{2}\cos 2\beta, \qquad (4)$$

$$(A \sin\alpha + B \sin\beta)^3 = (\frac{3}{4}A^3 + \frac{3}{2}B^2 A)\sin\alpha +$$

$$+ (\frac{3}{4}B^3 + \frac{3}{2}A^2 B)\sin\beta +$$

$$+ \frac{3}{4}A^2 B \sin(2\alpha - \beta) + \frac{3}{4}B^2 A \sin(2\beta - \alpha) -$$

$$- \frac{A^3}{4}\sin 3\alpha - \frac{B^3}{4}\sin 3\beta -$$

$$- \frac{3}{4}A^2 B \sin(2\alpha + \beta) - \frac{3}{4}B^2 A \sin(2\beta + \alpha) \qquad (5)$$

Путем подстановки (4) и (5) в (2), с учетом того, что мощности входных сигналов на частотах f_1 и f_2 через их амплитуды определяются соотношениями $P_A = \frac{A^2}{2}$, $P_B = \frac{B^2}{2}$ получены расчетные значения мощностей интермодуляционных составляющих помех второго и третьего порядков на выходе нелиней-

ного тракта приемника, которые указаны на рис. 2.

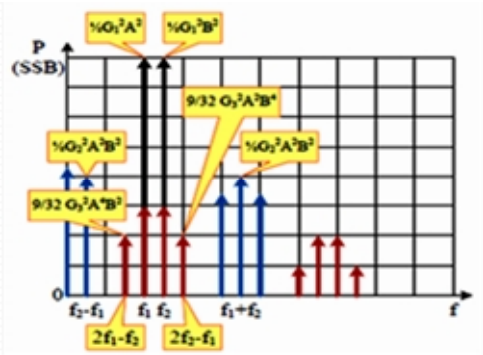


Рис. 2. Амплитуды интермодуляционных составляющих

Изложенная простая методика позволяет произвести предварительный экспресс-анализ опасности возможных интермодуляционных поражений приемника (и выявить наиболее опасные по наибольшим уровням мощностей)расчетным путем. Применение этой методики позволяет сократить общий объем последующих измерений, ограничивая их лишь детальным исследованием наиболее значительных по уровню мощности нежелательных интермодуляционных влияний.

Особенности анализа многосигнальной избирательности цифровых приемников

Широкое внедрение цифровых методов приема и обработки сигналов в современных радиоприемных устройствах приводит к необходимости изменения методик их многосигнальной избирательности. В настоящее время в наибольшей степени потребностям практики испытаний цифровых приемников на многосигнальную частотную избирательность соответствует европейский стандарт ETS 300 113. Он определяет перечень контролируемых параметров цифровых приемников (в том числе и по интермодуляционной избирательности) и методики их измерения.

Характерные отличительные особенности измерения характеристик многочастотной избирательности цифровых приемников заключаются в следующем. Для генерации стандартных испытательных сигналов используют специализированные генераторы псевдослучайных последовательностей бинарных импульсов, спектр которых ограничивают специальным формирующим фильтром.

Конечный эффект влияния интермодуляционной помехи на качество приема (снижение достоверности приема) оценивают количественно как относительное количество ложно принятых символов при передаче тестовой последовательности (функция BER). В аналоговых приемниках снижение качества приема за счет интермодуляции в соответствии с требованиями стандарта определяют через отношение уровня помехи на выходе приемника к амплитуде входного испытательного сигнала (при заданном значении отношения сигнал-шум на входе приемника). Для цифрового приемника интермодуляционная избирательность определяется как относительная величина мешающего сигнала, частота которого не совпадает с частотами ложных каналов приема и частотами соседних каналов, при которой обеспечивается заданный уровень ошибок принимаемой информации.

Расчетно-инструментальная методика анализа двухсигнальной избирательности цифрового приемника.

Отличительная особенность данной методики заключается в сокращении трудозатрат на выявление и инструментальный анализ многосигнальной избирательности цифровых приемных устройств за счет сочетания расчетных и измерительных процедур. Сущность методики заключается в следующем.

На первом (экспериментальном) этапе испытаний цифрового приемника измеряют нелинейную статическую передаточную (проходную) характеристику нелинейного тракта приемника по стандартной методике определения амплитудной передаточной характеристики четырехполюсника.

Передаточную характеристику строят в виде графика зависимости

$$K(U) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \qquad (6)$$

При необходимости эту характеристику снимают для других частот настройки приемника.

На втором (расчетном) этапе любым математическим методом аппроксимируют полученную кривую зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ степенным рядом (2) (проведя замену $Y = U_{вых}$, $X = U_{вх}$ путем подбора коэффициентов аппроксимации G_i. Аппроксимирующие коэффициенты целесообразно подбирать по критерию минимума среднеквадратического отклонения аппроксимирующей кривой от полученной экспериментально методом наименьших квадратов (с помощью стандартных программных пакетов). При этом качество аппроксимации сказывается на точности последующего расчета амплитуд интермодуляционных составляющих на выходе нелинейного тракта приемника.

На следующем (третьем) этапе методики расчетным методом для фиксированных ча-

стот настройки приемника, задавая числовые значения частот входных воздействий f_1 и f_2, по указанным выше интермодуляционным формулам рассчитывают значения совокупности частот интермодуляционных комбинаций второго и третьего порядков.

На четвертом (расчетном) этапе, задают амплитуды входного двухчастотного испытательного сигнала (рекомендуется соблюдать условие $A = B$) и рассчитывают численные значения мощностей интермодуляционных составляющих, приведенных на рис. 2. Анализ полученных мощностей позволяет спланировать дальнейшую стратегию проведения испытаний, которая не отличается от традиционно используемой на практике.

На пятом (экспериментальном) этапе проводят уточнение полученных расчетных значений амплитуд и мощностей интермодуляционных продуктов инструментальным методом. На вход приемника подают двухчастотный сигнал на частотах f_1 и f_2 с амплитудами $U_1 = U_2 = A = B$ и измеряют мощность (напряжение) интермодуляционных помех на выходе нелинейного тракта приемника при помощи измерителя мощности и частотно-избирательных фильтров (либо селективного микровольтметра).

На заключительном шестом (экспериментальном) этапе определяют вероятность принятия ошибочных символов BER только для наиболее опасных (выявленных на предыдущих этапах 4 и 5) интермодуляционных каналов приема. Этот этап выполняется по стандартизованной методике, рекомендуемой стандартом ETS 300 113.

Итак, первые пять этапов предлагаемой технологии испытаний приемников являются подготовительными и предназначены для существенного снижения общего объема работ, выполняемого на заключительном этапе испытаний. В совокупности применение обоснованной методики позволяет существенно сократить время на проведение полномасштабных испытаний цифрового радиоприемного устройства на помехозащищенность. При этом результирующая точность получаемых данных не отличается от точности результатов, получаемых по известным методикам измерений, поскольку погрешности измерений обусловлены метрологическими характеристиками применяемых на шестом этапе испытаний измерительных приборов.

Предварительный расчет частот и уровней интермодуляционных искажений в приемнике обеспечивает надежное прогнозирование возможных интермодуляционных каналов приема в нем. Возможность проведения расчета мощности интермодуляционных помех на выходе нелинейного тракта приемника обеспечивается двухэтапной процедурой снятия передаточной характеристики нелинейного тракта и аппроксимации ее полиномом третьей степени. Расчет выходных эффектов при воздействии двухчастотного сигнала на вход цифрового приемника снижает трудоемкость его испытаний за счет исключения процедур поиска и измерений не опасных побочных каналов приема. В целом предложенная технология обеспечивает выполнение дорогостоящих и сложных цифровых радиоприемных устройств на радиоэлектронную защиту в полном объеме и с требуемым качеством. Измерения интермодуляционных искажений в приемнике являются наиболее сложным видом измерений, поэтому предложенная методика может быть распространена на другие виды измерений, а именно характеристик многосигнальной и односигнальной частотной избирательности приемника по побочным каналам приема.

Литература

1. Овчинников А.М., Галкин В.А., Варукин Е.П. Измерение параметров средств цифровой радиосвязи// Технологии и средства связи, 2006, №3, с. 38 – 46.

2. ГОСТ 23611 - 79.

3. Поляков А.Е. Методика измерения IP2 и IP3 двухтонального сигнала.// Интернет-ресурс digteh.ru/LIB/Poljakov/intermod_IPx_Article.Pdf.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний

EXPERIMENTAL-CALCULATING METHOD FOR DETERMINING TWO-INPUT SELECTIVITY DIGITAL RADIO RECEIVERS

V.M. Pitolin, S.N. Panychev, N.A. Samotsvet, S.A. Akulinin

The technique to identify and quantify the risk of side channels of reception, training-conditionality intermodulation effects of second and third order. The procedure involves the steps of calculating the frequencies and levels of intermodulation products in the nonlinear path of the receiver and measurement of noise immunity of the receiver. Methodology oriented to application in practice test digital radio receivers for electromagnetic compatibility and noise immunity and reduce the complexity of different tests

Key words: the distribution density of a probability distribution, the torque characteristics of the distribution law, the method of the signal generation