

УДК 621.391.82 + 621.396.62

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПРИЕМА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ РАДИОПРИЕМНИКОВ МЕТОДОМ ДВУХЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е.В. СИНЬКЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 июня 2011

Для анализа нелинейных явлений в радиоприемниках разработана и успешно применяется технология двухчастотного зондирования, которая позволяет легко обнаружить все имеющиеся в приемнике каналы поражения помехами, включая области паразитной генерации в присутствии сильных помех. В настоящей работе предложена универсальная методика распознавания обнаруженных с помощью двухчастотного зондирования каналов поражения приемника помехами; методика получена путем развития метода измерения частот и решения системы линейных алгебраических уравнений. С целью проверки предложенной методики выполнено распознавание нелинейных явлений в панорамном приемнике «Schaffner SMR 4518» по измеренным двухчастотным диаграммам. Результаты проверки методики показывают ее высокую эффективность: все наблюдаемые каналы приема (основной, побочные, интермодуляционные до 41-го порядка) были корректно распознаны.

Ключевые слова: радиоприемник, интермодуляция, электромагнитная совместимость, радиопомехи, радиоизмерения.

Введение

Технология двухчастотного зондирования (ДЧЗ) представляет собой весьма эффективный и проверенный практикой инструмент для анализа восприимчивости радиоприемников к помехам по антенному входу [1–3]. В [1, 2] рассмотрены основы реализации и результаты использования автоматизированной системы (АС) ДЧЗ, построенной на базе данной технологии.

Испытания радиоприемников по технологии ДЧЗ выполняются, как правило, в три этапа: 1) обнаружение каналов приема, 2) их распознавание (т.е. определение путей и эффектов, приводящих к появлению помехи на выходе приемника) и 3) измерение параметров каналов приема [1, 2].

При разработке АС ДЧЗ нового поколения [4] поставлена задача обеспечить ее совместимость с военными стандартами США (MIL-STD). Это ужесточает требования к процедуре распознавания обнаруженных каналов приема, поскольку, в соответствии со стандартом [5], испытываемый приемник может иметь до трех преобразований частоты.

Для распознавания обнаруженных каналов приема в АС ДЧЗ предыдущих поколений использовалась, главным образом, комбинация следующих двух методов: 1) оценки углов между изображением канала приема и осями двухчастотной диаграммы (ДЧД); 2) распознавания характерных групп изображений каналов приема на ДЧД [1, 2].

Методика распознавания, основанная на указанной комбинации методов, имеет следующие недостатки: 1) задача идентификации решается частично (удаётся распознать только коэффициенты при частотах испытательных сигналов); 2) группы изображений на ДЧД распознаются эвристически (вручную), причем существует ряд специфических проблем, особенно для приемников, имеющих более одного преобразования частоты (см. раздел 2).

Цель настоящей работы – разработать универсальную, полностью автоматизированную методику распознавания каналов поражения помехами приемников, имеющих до трех преобразований частоты.

Статья имеет следующую структуру: постановка задачи распознавания каналов приема изложена в разделе 1, затем проанализированы недостатки известных методов распознавания (раздел 2), предложена новая методика распознавания (раздел 3) и выполнена ее экспериментальная проверка (раздел 4).

1. Сущность задачи распознавания каналов приема

Образование каналов приема (основного, побочных, интермодуляционных) в радиоприемнике можно описать следующим уравнением, которое называется уравнением каналообразования:

$$z_1 \cdot f_1 + z_2 \cdot f_2 + C = 0, \quad C = f_{NL,LO} - f_{out}, \quad (1)$$

$$f_{NL,LO} = \begin{cases} 0, & N_{fc} = 0; \\ z_3 \cdot f_{LO1}, & N_{fc} = 1; \\ z_3 \cdot f_{LO1} + z_4 \cdot f_{LO2}, & N_{fc} = 2; \\ z_3 \cdot f_{LO1} + z_4 \cdot f_{LO2} + z_5 \cdot f_{LO3}, & N_{fc} = 3, \end{cases} \quad (2)$$

где z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 – целочисленные коэффициенты; f_1 и f_2 – частота первого и второго испытательного сигнала на входе приемника, соответственно; $f_{NL,LO}$ – частота (реального или воображаемого) комбинационного продукта, образованного колебаниями гетеродинов; f_{out} – частота (несущая или промежуточная) полезного сигнала на анализируемом выходе приемника (для приемника прямого преобразования нужно принять последнюю промежуточную частоту равной нулю); $f_{LO1}, f_{LO2}, f_{LO3}$ – частота первого, второго и третьего гетеродина, соответственно; N_{fc} – количество преобразований частоты в приемнике.

Уравнение (1) обобщает приведенные в стандартах уравнения образования побочных и интермодуляционных каналов приема [5 – CS108/109, CS110/111], [6 – ГОСТ 22580-84, ГОСТ 12252-86 и др.]

В соответствии с (1), каждый канал приема отображается прямой линией на двухчастотной диаграмме в координатах (f_1, f_2) . Задача идентификации (распознавания) канала приема состоит в том, чтобы найти значения коэффициентов $z_1 \dots z_5$ в уравнении каналообразования (1), основываясь на изображении канала приема на двухчастотной диаграмме. Зная эти коэффициенты, пользователь может определить наиболее вероятные механизмы образования нелинейной помехи, соответствующей распознанному каналу приема.

2. Анализ методов распознавания каналов приема

Известные методы распознавания каналов приема рассмотрены в [1, 2]. Проанализируем их недостатки.

1) Метод угла наклона [1 – Section IV, method 1]:

1.1) Возможности метода ограничены: без дополнительных измерений можно определить только коэффициенты z_1 и z_2 ; коэффициент при частоте одного из гетеродинов (как правило, z_3) можно определить, изменив частоту настройки тестируемого приемника (что требует повторного измерения двухчастотной характеристики); коэффициенты при частотах остальных гетеродинов данным методом определить не позволяет.

1.2) Метод учитывает только угол наклона линии (изображения канала приема) и не учитывает ее положения (сдвига), что может привести к неправильному распознаванию. Например, интермодуляционные каналы приема четных порядков вида $(z_1, z_2, z_3) = (m, -m, 0)$,

$m = \pm 1, \pm 2, \dots$ имеют одинаковый угол наклона $\alpha = 45^\circ$ [1 – Fig. 6(e)], поэтому данный метод не позволяет отличить их друг от друга.

2) Метод распознавания образов (характерных групп изображений каналов приема) [1 – Section IV, method 2]:

2.1) Метод не всегда позволяет решить базовую задачу – распознать единственный канал приема, т.е. одну произвольную линию на ДЧД. Приведем примеры "проблемных" ситуаций: а) точка пересечения линий характерной группы, позволяющая распознать заданную линию, находится за пределами области измерения $\{(f_{1\min}, f_{1\max}), (f_{2\min}, f_{2\max})\}$ ДЧД; б) некоторые линии, входящие в характерную группу, не видны на ДЧД или видны не полностью (что может привести к неправильному распознаванию порядка узла).

2.2) Для приемников, имеющих более одного преобразования частоты, положение ряда типовых групп изображений (узлов выше 1-го порядка) оказывается неочевидным, что затрудняет их распознавание и может привести к ошибкам.

Поэтому данный метод (хотя он очень удобен для эвристического анализа ДЧД человеком-оператором) применим лишь как дополнительный метод.

3) Метод измерения частот и решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [1 – Section IV, method 3]:

3.1) Количество уравнений в системе жестко определено – оно равно количеству неизвестных коэффициентов $z_1 \dots z_5$, т.е. $N_{fc} + 2$ – см. (1) и (2). Это ограничивает точность распознавания ошибками однократных измерений.

3.2) Система уравнений решается в вещественных числах, а полученные значения коэффициентов $z_1 \dots z_5$ округляются до ближайших целых чисел, что, однако, не гарантирует получение наилучшего целочисленного решения.

3.3) Требуется дополнительная аппаратура для измерения частот гетеродинов, частот испытательных сигналов и частоты выходного сигнала тестируемого приемника.

4) Метод сопоставления параметров модуляции входных испытательных сигналов и выходного сигнала [1 – Section IV, method 4]:

4.1) Ограниченные возможности (см. п.1.1).

4.2) Повышенные требования к измерительным генераторам, т.к. испытательные сигналы должны иметь заданные параметры модуляции.

4.3) Требуется дополнительная аппаратура для измерения параметров модуляции выходного сигнала.

5) Метод сравнения скоростей изменения частоты входного быстро свипирующего сигнала и выходного сигнала [1 – Section IV, method 5]:

5.1) Ограниченные возможности (см. п.1.1).

5.2) Требуется дополнительная аппаратура для измерения скорости изменения частоты выходного сигнала.

5.3) При цифровом свипировании частоты метод неприменим напрямую и требует доработки.

5.4) Метод накладывает ограничение на скорость перестройки частоты при аналоговом свипировании (либо на шаг перестройки – при цифровом).

Как следует из рассмотренных недостатков, единственным методом, который позволяет полностью решить задачу распознавания (определить все коэффициенты $z_1 \dots z_5$ произвольного канала приема) для приемников, имеющих более одного преобразования частоты, является метод измерения частот и решения СЛАУ [1 – Section IV, method 3].

3. Предлагаемая методика распознавания каналов приема

Предлагаемая в настоящей работе методика распознавания была получена путем усовершенствования метода СЛАУ [1 – Section IV, method 3] в следующих направлениях.

1) Чтобы устранить недостаток 3.1) из раздела 2, т.е. уточнить идентификацию за счет усреднения результатов большого количества измерений, предлагается перейти к переопреде-

ленной СЛАУ вида (3) и решать ее в среднеквадратическом смысле. Например, как следует из (1) и (2), при $N_{fc} = 3$ СЛАУ имеет вид:

$$\{ z_1 \cdot f_{1,i} + z_2 \cdot f_{2,i} + z_3 \cdot f_{LO1,i} + z_4 \cdot f_{LO2,i} + z_5 \cdot f_{LO3,i} = f_{out,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{rp}, \quad (3)$$

где N_{rp} – количество точек распознавания $(f_{1,i}; f_{2,i}; f_{LO1,i}; f_{LO2,i}; f_{LO3,i}; f_{out,i})$, в которых выполняется одновременное измерение частот; i – номер точки распознавания. Количество уравнений в СЛАУ (3) произвольно и равно количеству N_{rp} точек распознавания.

2) Производительность современных персональных компьютеров позволяет устранить недостаток 3.2) из раздела 2 простейшим способом – в настоящей работе решение СЛАУ находится методом полного перебора всех потенциальных решений, т.е. целочисленных комбинаций $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$, с порядком не выше заданного максимального порядка распознавания M_{max} :

$$z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M_{max},$$

$$|z_1| + |z_2| \neq 0, \quad \sum_{k=1}^5 |z_k| \leq M_{max}. \quad (4)$$

Даже в наиболее сложном случае (приемник с тремя преобразованиями частоты и максимальный порядок канала равен 50) время решения СЛАУ рассмотренным способом не превышает 5 сек на компьютере Pentium IV, что вполне приемлемо для практики.

3) С целью устранения недостатка 3.3) из раздела 2, метод СЛАУ распространен на случай распознавания без измерения частот – в этом случае, вместо результатов одновременного измерения всех или некоторых частот $(f_{1,i}; f_{2,i}; f_{LO1,i}; f_{LO2,i}; f_{LO3,i}; f_{out,i})$ в каждой точке распознавания, используются: номинальные значения частот измерительных генераторов $f_{1,i}$ и $f_{2,i}$ в каждой точке распознавания; номинальные либо однократно измеренные значения частот $(f_{LO1}; f_{LO2}; f_{LO3}; f_{out})$, которые считаются одинаковыми для всех точек распознавания.

4) Практическое применение вышеизложенных усовершенствований метода СЛАУ показало серьезный недостаток: полученное решение (линия отклика) не всегда оказывается ближайшим к распознаваемой линии на двухчастотной диаграмме (в результате при увеличении максимального порядка распознавания линия отклика может удаляться от распознаваемой линии). Поэтому был изменен критерий оптимизации (поиска решения СЛАУ): вместо суммы квадратов невязок использован геометрический критерий "минимум суммы квадратов расстояний (по перпендикуляру) от точек распознавания до линии отклика на двухчастотной диаграмме".

Квадрат расстояния от i -ой точки распознавания $(f_{1,i}; f_{2,i})$ до линии отклика (1) можно найти по формуле [7 – eq. (2.3-1)]:

$$\delta_i^2 = \frac{(z_1 \cdot f_{1,i} + z_2 \cdot f_{2,i} + C)^2}{(z_1^2 + z_2^2)}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{rp}. \quad (5)$$

Тогда критерий оптимизации представим в виде

$$J = \sum_{i=1}^{N_{rp}} \delta_i^2 = \frac{1}{z_1^2 + z_2^2} \cdot \sum_{i=1}^{N_{rp}} [z_1 \cdot f_{1,i} + z_2 \cdot f_{2,i} + C]^2, \quad (6)$$

$$C \equiv C(z_3, z_4, z_5); \quad J(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) \rightarrow \min,$$

где C определяется в соответствии с (1) и (2).

Если в каждой точке распознавания измеряется хотя бы одна из частот $\{f_{LO1}; f_{LO2}; f_{LO3}; f_{out}\}$, то значение C изменяется от одной точки распознавания к другой $C \equiv C_i(z_3, z_4, z_5)$, поэтому геометрическая интерпретация критерия (6) становится прибли-

женной (ее можно считать приближенной, поскольку при переходе от одной точки распознавания к другой изменения частот $\{f_{LO1}; f_{LO2}; f_{LO3}; f_{out}\}$ существенно меньше, чем изменения частот f_1 и f_2).

5) Метод СЛАУ распространен на ситуацию, когда информация о внутренней структуре испытуемого приемника отсутствует: если частоты гетеродинов неизвестны, то при распознавании вместо целочисленных параметров z_3, z_4 и z_5 используется один вещественный параметр $f_{NL,LO}$, который определен в (2) и учитывает все преобразования частоты. Целочисленные коэффициенты z_1 и z_2 при частотах испытательных сигналов подбираются в соответствии с (4), а действительное значение $f_{NL,LO}$ (оно может быть и отрицательным) находится так, чтобы минимизировать геометрический критерий (6) при заданных z_1 и z_2 .

Предлагаемую методику распознавания легко распространить на случай произвольного количества преобразований частоты в тестируемом приемнике.

4. Проверка методики распознавания каналов приема

С целью экспериментальной проверки предложенной методики выполнено распознавание нелинейных явлений в панорамном приемнике «Schaffner SMR 4518» по результатам измерений из [8].

На рис. 1 приведена ДЧД, измеренная при следующих условиях. Параметры приемника: частота настройки $f_i = 2$ ГГц; сигналы подаются на антенный вход и снимаются с выхода второй промежуточной частоты $f_{out} = f_{IF2}$; полоса пропускания по уровню -3 дБ равна $\Delta f_{IF2} = 2,5$ МГц; частоты гетеродинов $f_{LO1} = 2,886$ ГГц, $f_{LO2} = 841$ МГц; промежуточные частоты $f_{IF1} = 886$ МГц, $f_{IF2} = 45$ МГц. Параметры измерений: диапазон свипирования частоты каждого из тестовых сигналов $[1,8; 2,2]$ ГГц; разрешающая способность составляет 101 точку по частоте f_1 (шаг $\Delta f_1 = 4$ МГц) и 1001 точку по частоте f_2 (шаг $\Delta f_2 = 400$ кГц); испытательные сигналы не модулированы и имеют одинаковые уровни $P_1 = P_2 = 0$ дБм; полоса анализа выходного сигнала приемника $[30; 60]$ МГц. Параметры визуализации: минимальный отображаемый на ДЧД уровень выходного сигнала $P_{min} = -66$ дБм, что на 1,5 дБ выше уровня шума.

Все наблюдаемые на рис. 1 каналы приема были успешно распознаны с помощью предлагаемой методики. Частоты гетеродинов не измерялись, а использовались их номинальные значения, которые указаны выше. Некоторые результаты распознавания показаны на рис. 2: «DR» – основной канал приема, для которого $\vec{z} = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) = (0, -1, 1, -1, 0)$; остальные обозначенные на рис. 2 каналы приема («0», «1», «2», «3») принадлежат узлу 4-го порядка и характеризуются коэффициентами $\vec{z} = (-m, -(M_n - m), 3, -1, 0)$, где M_n – порядок узла ($M_n = |z_1| + |z_2| = 4$), m – порядковый номер линии на рис. 2 ($m = 0, 1, \dots, M_n$). Побочный канал, соответствующий $m = M_n = 4$, не наблюдается на рис. 1 вследствие низкого разрешения ДЧД по частоте f_1 (101 точка по f_1 против 1001 по f_2). В отличие от [1 – Fig.6(d)], узел 4-го порядка на рис. 2 образован с участием 3-й гармоники гетеродина, а не 4-й.

Для распознавания использовался метод маркерной линии: перемещая маркеры распознавания (они обозначены кружками на рис. 2) с помощью мыши, нужно добиться наложения маркерной линии на изображение распознаваемого канала приема на ДЧД; после каждого перемещения маркера пересчитываются (по предложенной методике распознавания) и выводятся значения коэффициентов $z_1 \dots z_5$ уравнения (1), а также обновляется изображение линии отклика. Линия отклика строится по рассчитанным значениям коэффициентов $z_1 \dots z_5$ и визуализирует результат распознавания. Во многих случаях точное наложение маркерной линии на изображение распознаваемого канала приема не требуется (см., например, канал «2» на рис. 2): если линия отклика накладывается на изображение канала приема на ДЧД, то распознавание завершено.

Кроме ДЧД на рис. 1, для проверки предложенной методики были использованы и другие ДЧД из [8], в том числе результаты измерения интермодуляции высоких порядков.

Результаты проверки показывают высокую эффективность предложенной методики: все наблюдаемые каналы приема (основной, побочные, интермодуляционные до 41-го порядка) были корректно распознаны. Вследствие высокой стабильности и точности установки частот измерительных генераторов и гетеродинов тестируемого приемника, измерение частот $f_1, f_2, f_{LO1}, f_{LO2}, f_{out}$ не потребовалось.

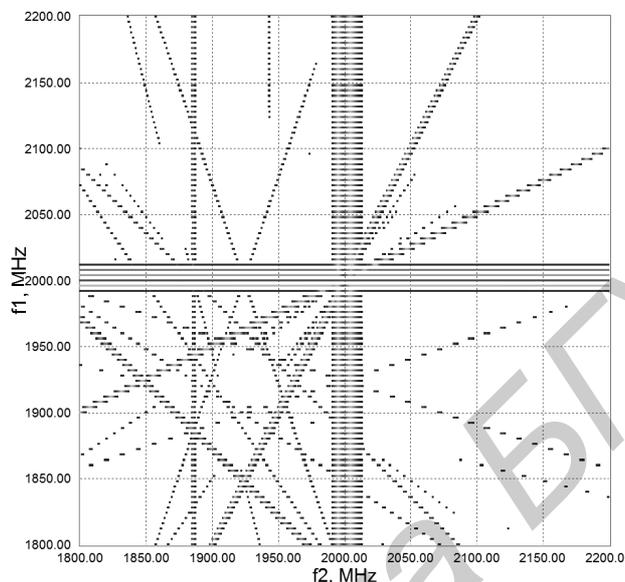


Рис. 1. Двухчастотная диаграмма приемника

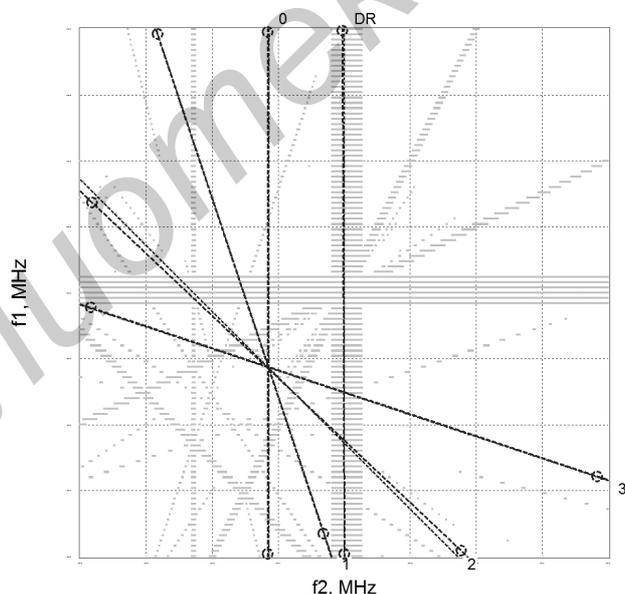


Рис. 2. Результаты распознавания каналов приема

Заключение

Впервые разработана автоматизированная методика, позволяющая полностью решить задачу распознавания, т.е. определить все коэффициенты z_i в уравнении (1) для произвольного канала приема при любом количестве преобразований частоты в испытуемом радиоприемнике.

Разработанная методика является универсальной – она дает возможность выполнить распознавание при различном объеме исходных данных: с измерением всех или некоторых

частот в каждой точке распознавания, или без их измерения, или даже без информации о внутренней структуре приемника.

Практическое применение разработанной методики показало ее высокую эффективность. На основе методики реализована процедура распознавания каналов приема в АС ДЧЗ нового поколения [9].

UNIVERSAL TECHNIQUE FOR INTERFERENCE RESPONSE RECOGNITION FROM RESULTS OF RADIO RECEIVER'S DOUBLE-FREQUENCY TESTING

E.V. SINKEVICH

Abstract

For analysis of nonlinear effects in radio receivers, a technology of double-frequency testing is developed and put into operation. This technology allows one to easily detect all existing linear and nonlinear paths that cause interference at the receiver output, including areas of spurious generation in presence of powerful interfering signals. In this paper, a universal technique for recognition of the receiver's interference responses detected by the double-frequency testing is proposed. The technique is obtained by developing the method of frequency measurement and solving the system of linear algebraic equations. In order to validate the proposed technique, the recognition of nonlinear effects in Schaffner SMR 4518 receiver from measured double-frequency diagrams is performed. Validation results indicate a high efficiency of the technique: all detected responses (desired, spurious, and intermodulation of orders up to 41) were recognized correctly.

Литература

1. *Mordachev V.I.* // IEEE Trans. on EMC. 2000. Vol. 42, №2. P. 213–225.
2. *Анорович А.Ф., Мордачев В.И.* // Proc. of IX-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. 1988. P. 867–872.
3. *Porter J.D., Billo R.E., Mickle M.H.* // Int. J. Radio Frequency Identification Technology and Applications. 2006. Vol. 1, №1. P. 4–23.
4. *Mordachev V.I., Sinkevich E.V.* // Proc. of 9-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2010» joint with 20-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. 2010. P. 714–720.
5. Military Standard «Radio Frequency Spectrum Characteristics Measurement of» (MIL-STD-449D). USA Department of Defense, Washington, 1973.
6. Государственные стандарты СССР. Государственный комитет СССР по стандартам, М., 1990.
7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1974.
8. Certain Results of the ADFTS Operation. Minsk, 2011.
9. Automated Double-Frequency Test System. User's Manual. Minsk, 2011.