ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 629.396.67(045)/62-932.2

Сабзиев Э. Н., к.ф.-м.н. (компания Kiber Ltd, г. Баку), **Пашаев А. Б., к.ф.-м.н., доц.** (Институт кибернетики НАНА, г. Баку)

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ МОНИТОРИНГА FM ВЕЩАНИЙ

В данной работе исследуется задача автоматизации мониторинга эфира радиопередач FM частот. При помощи математической модели удаляется отрицательный эффект интермодуляции. Разработанный программный модуль позволяет отсекать сигналы, которые являются результатом интермодуляции сигналов станций рассматриваемого диапазона частот.
***Ключевые слова*: сигнал, интермодуляция, ЧС радиовещания.**

Введение. Основной задачей мониторинга радиоэфира является идентификация станций, с целью выявления как отсутствия сигналов на частотах лицензионных станций, так и обнаружение сигналов в нелицензионных частотах. Принцип работы аппаратных средств, осуществляющие мониторинг прослушивания эфира, основывается на частотный анализ принимаемого сигнала, после его некоторого предварительного усиления. Нелинейность усилительного тракта приемников сопровождает выходной сигнал интермодуляционными явлениями. Хотя особенности проявления интермодуляции хорошо известны (см. напр., [1]), обычно обработка мониторинговой информации производиться простыми методами идентификации – без учета эффекта интермодуляции. Была поставлена задача автоматической обработки мониторинговой информации, получаемой посредством радиоприемника AOR AR-5000 [2]. При этом было необходимо учитывать явление интермодуляции.

Первые исследования интермодуляции относятся к средине прошлого века [3]. Последующие годы появились работы, которые, главным образом были посвящены проблеме минимизации влияния этого явления на работу радиоприемных систем (напр., [4-9]). Поскольку, при создании автоматизированных систем навигации, в усилителях активных антенн возникает собственная интермодуляционная помеха, в этой области есть многочисленные фундаментальные исследования Украинских ученых (напр., [10-12]). Математическая модель задачи мониторинга, которая излагается ниже, основана на идеологии работ [4-12].

Описание проблемы. Было предложено автоматизация обработки наблюдаемой информации, осуществляемое радиоприемником AOR AR-5000. Этот радиоприемник проектирован так, что одновременно не может охватывать весь FM частотный диапазон 87.5÷111.475 МГц. Поэтому диапазон разделяется на условные три интервала. Далее аппарат настраивается так, чтобы можно было наблюдать за эфиром в данном интервале частот. Для того, чтобы перейти на следующий интервал, приходится перенастраивать систему. Поэтому, сбор информации фактически происходит не единовременно, а с некоторым временным отклонением. Как оказалась, нормализация данных каждого интервала осуществлялся в автоматическом режиме, не зависимо от данных других интервалов. При этом результаты обработки сигнала, выраженные в децибелах, сохранялись с точностью до целого числа. Кроме того, данные, выходящие за пределы выделенного 60 децибельного диапазона, а в нашем случае это был диапазон от –10 до –70 ДцБ, заменялись на наиболее близкие значения из указанного диапазона. То есть, если мощность (амплитуда) сигнала была больше –10, выдавалось значение –10, если была меньше –70, то выдавалось значение –70.

При FM вещании станция генерирует не единичную несущую частоту, а целый набор частот. Радиоприемник AOR AR-5000 позволяет выбирать разумный шаг дискретизации частоты $\Delta\omega$ для обработки сигнала. Исходя из многочисленных неточностей разной природы в данных (округление до целого числа, выдача данных в пределах от –10 до –70 ДцБ и т.д.), в исследованиях было принято $\Delta\omega = 0.025$ МГц. Таким образом, рассматриваемый интервал частот дискредитируется в виде $\omega_i = 87.475 + i \cdot \Delta\omega$, $i = 1, \dots, 960$.

В качестве исходной информации для обработки, предоставляются, выраженные в децибелах, мощности сигнала в частотах ω_i, $i = 1,\dots,960$.

Задача: Разработать алгоритм автоматической идентификации радиостанций, с целью выявления как отсутствия сигналов частот лицензионных станций, так и обнаружение сигналов в нелицензионных частотах, на основе мониторинговой информации радиоприемника AOR AR-5000, с учетом указанных выше особенностей данных. При этом характеристические данные радиоприемника AOR AR-5000, такие как, коэффициенты нормализации данных и коэффициенты усиления считаются неизвестными.

Формулировка математической задачи и алгоритм решения. В соответствии [13], при инженерных расчетах усилительного каскада, достаточно учитывать нелинейность до третьей степени:

$$y(x) = g_1 x + g_2 x^2 + g_3 x^3, \qquad (1)$$

где $x = x(t)$ и $y = y(x(t))$ – соответственно, сигнал на входе и выходе усилительного каскада, t – время, g_1, g_2 и g_3 – весовые коэффициенты, рассматриваемого усилительного каскада. Если представим входной сигнал в виде суммы простых гармоник $x = \sum_s \lambda_s \sin 2\pi\omega_s t$ и подставим в (1), то перегруппируя полученное выражение по частотам ω_s, найдем амплитуду результирующего сигнала. Далее приравнивая полученное представление амплитуды к результатам измерений, получим уравнение

$$g_1\lambda_s + \frac{g_2}{2}\sum_{\omega_s=\omega_i\pm\omega_j}\lambda_i\lambda_j + \frac{g_3}{4}\sum_{\omega_s=\omega_i+\omega_j\pm\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k = A\cdot D_s, \qquad (2)$$

где $D_s = 10^{0.1\cdot d_s}$, d_s – фиксированный уровень сигнала в ДцБ, A – коэффициент нормализации данных, автоматически определяемый радиоприемником AOR AR-5000.

Уравнение (2) является некоторой базовой моделью, описывающее распределение сигнала по частотам ω_s. При построении математической модели поставленной задачи мы будем изменять его с учетом факторов, приведенных в описании проблемы.

Нетрудно видеть, что частоты рассматриваемого диапазона (87.5÷111.475 МГц) не могут способствовать явлению интермодуляции в этом же диапазоне по формулам $\omega_s = \omega_i \pm \omega_j$, $\omega_s = \omega_i + \omega_j + \omega_k$. Поэтому в уравнениях (2) суммы $\sum_{\omega_s=\omega_i\pm\omega_j}\lambda_i\lambda_j$ и $\sum_{\omega_s=\omega_i+\omega_j+\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k$ будут отсутствовать.

Обозначим через S_l отдельные непересекающиеся интервалы настройки частот аппарата, в совокупности, покрывающие весь рассматриваемый диапазон. В зависимости от того, к какому из трех интервалов частот относиться $\omega_s \in S_l$, коэффициент A в (2) примет один из возможных неизвестных значений A_l.

Нетрудно видеть, что уравнение (2) однородное относительно коэффициентов g_1, g_2, g_3 и A. Разделяя левую и правую часть уравнения (2) на g_1 и введя новые неизвестные переменные $b=\dfrac{g_3}{4g_1}$, $a_l=\dfrac{A_l}{g_1}$ $(l=1,2,3)$, можем его переписать в следующем виде:

$$\lambda_s+b\sum_{\omega_s=\omega_i+\omega_j-\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k=a_l\cdot D_s,\ \ \omega_s\in S_l. \qquad (3)$$

Это уравнение должно быть выполнено для всех ω_s, для которых значение D_s больше некоторого разумного значения $\tilde{D}$. Это значение определяется экспертом и задает значение фонового уровня. Первый член в уравнении (2) указывает на амплитуду несущей частоты, если таковая существует. Поэтому в уравнении, написанной для фоновых частот этот член будет отсутствовать и уравнение примет следующий вид:

$$b\sum_{\omega_s=\omega_i+\omega_j-\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k=a_l\cdot D_s,\ \ \omega_s\in S_l.$$

Поскольку, для всех ω_s, которые относятся фоновому уровню, эти уравнения должны быть эквивалентными, достаточно написать одно уравнение для каждого интервала S_l, $l=1,2,3$. Пусть для интервала S_l выбрана частота $\omega_{0l}\in S_l$. Обозначим через D_{0l} соответствующие значения D_s, содержащееся в правой части уравнения, которые удовлетворяют неравенства $D_{0l}<\tilde{D}$. Тогда уравнения для фоновых значений могут быть написаны следующим образом:

$$b\sum_{\omega_{0l}=\omega_i+\omega_j-\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k=a_l\cdot D_{0l},\ \ \omega_{0l}\in S_l,\ l=1,2,3. \qquad (4)$$

Общий анализ поведения решений уравнения (2) показывает, что то или иное значение коэффициента a_l, $l=1,2,3$ существенно не влияет на качественную картину распределения амплитуд λ_s по частотам ω_s. Поэтому, предполагается, что сумма этих коэффициентов равно некоторой известной постоянной $\tilde{a}$ и выбирается на основе инженерных соображений:

$$a_1+a_2+a_3=\tilde{a}. \qquad (5)$$

Таким образом, поставленная задача сводится к исследованию решения системы (3)-(5). Следует подчеркнут, что система (3)-(5) написано относительно неизвестных амплитуд λ_s, $s=1$, ... , 960 и неизвестных коэффициентов b, a_l, $l=1,2,3$. Все значения D_{0l}, $l=1,2,3$ и постоянная $\tilde{a}$ считаются известными и задаются.

Нетрудно заметить, что (3)-(5) является замкнутой системой нелинейных уравнений, и для ее решения можем применить численные методы. Перепишем систему (3)-(5) в более подходящей форме для применения метода последовательных приближений.

Находя из (4) выражения a_l, $l=1,2,3$ и учитывая их в (5), получим:

$$b=\frac{\tilde{a}}{\xi_1+\xi_2+\xi_3}, \tag{6}$$

где $\xi_l=\frac{\sum\limits_{\omega_{0l}=\omega_i+\omega_j-\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k}{D_{0l}}$. Теперь из (4) получаем представление для коэффициентов a_l, $l=1,2,3$:

$$a_l=\frac{\tilde{a}}{D_{0l}}\frac{\xi_l}{\xi_1+\xi_2+\xi_3}. \tag{7}$$

Далее, учитывая (6) и (7) в (3), получаем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно амплитуд λ_s:

$$\lambda_s\cdot\frac{\xi_1+\xi_2+\xi_3}{\tilde{a}}+\sum_{\omega_s=\omega_i+\omega_j-\omega_k}\lambda_i\lambda_j\lambda_k=\xi_l\cdot\frac{D_s}{D_{0l}},\ \ \omega_s\in S_l. \tag{8}$$

Таким образом, получена математическая модель распределения амплитуд радиосигнала по частотам ω_s, представляющая из себя систему нелинейных алгебраических уравнений, которая решается методом последовательного приближения (см. напр., [14]). Расчеты показывают, что предложенная модель (6)-(8) позволяет фильтровать многие ложные амплитуды, дает адекватную картину частотного распределения амплитуд и позволяет идентифицировать реальных станций.

Вывод. Проведенные численные эксперименты показывают, предложенная модель вполне может быть применена для идентификации FM радиостанций.

1. Нарытник Т. Н. Основы управления использованием радиочастотного ресурса [Текст] / Т. Н. Нарытник. – Киев : Основа, 2008. – 500 с. – ISBN 978-966-669-378-9. **2.** Радионаблюдатель (SWL): Радиоприемник AOR AR-5000. http://swl.net.ru/archives/1429. **3.** Wallace, C. B. Intermodulation Interference in Radio Systems. Frequency of Occurence and Control by Channel Selection

[Текст] / Wallace C. Babcock. The Bell System Technical Journal. – Jan. 1953. – Pp. 63–73. **4.** Gavan, J. Main Effect of Mutual Interference in Radio Communication Systems Using Broad-Band Transmitters [Текст] / Gavan J. IEEE Trans. Electromagn. Compat., – June 1986, vol. EMC-28, – No. 4. – Pp. 211–219. **5.** Maas, S. A. Nonlinear Microwave Circuits, Artech House, Inc., Norwood, M. A. – 1988. **6.** Lui P. L. Passive intermodulation interference in communication systems [Текст] / Lui P. L. Electronics and Communication Engineering Journal. – June 1990, – Pp. 109–118. **7.** Christian, H. Intermodulation Distortion (IMD) [Текст] / Christian H. Burr-Brown International. Application Bulletin, U.S.A. – April, 1994. – Pp. 2–9. **8.** Carvalho N. B. Compact Formulas to Relate ACPR and NPR to Two-Tone IMR and IP3 [Текст] / Carvalho N. B., Pedro J. C. // Microwave Journal. – Dec. 1999. – Vol. 42. – No 12. **9.** Shkelzen C. Modelling of Interference Caused By Uplink Signal for Low Earth Orbiting Satellite Ground Stations [Текст] / Shkelzen C., Krešimir M., Arpad L. S. Proceeding of the 17 th International Conference «Applied Simulation and Modelling» (AMS2008). – June, 23-25, 2008. – Corfu, Greece. – Pp. 187–191. **10.** Кондрашов В. И. Исследования особенностей характеристик радиочастотных каналов комплексированной навигационно-посадочной аппаратуры летательных аппаратов [Текст] / Кондрашов В. И., Федоренко В. Н. // Технология и приборостроение. – 2002. – № 1. – С. 41–46. **11.** Конин В. В. Спутниковые системы навигации [Текст] / Конин В. В., Конина Л. А. – Киев, 2008. – 286 с. **12.** Кондрашов В. І. Пути повышения безопасности навигационно-посадочных операций воздушных судов [Текст] / Кондрашов В. І., Ільченко М. М., Осіпчук А. О. // Електроніка та системи керування. – 2009. – № 3(21). – С. 80–86. **13.** Поляков А. Е. Методика измерения IP_2 и IP_3 двухтонового сигнала [Текст] / Поляков А. Е., Стрыгин Л. В. // Труды МФТИ. – 2012. – Том 4. – № 2. – С. 54–63. **14.** Гаврилюк І. П. Методи обчислень: підручник: У 2 частинах / Гаврилюк І. П., Макаров В. Л. – Київ : Вища школа, 1995.

Рецензент: д.т.н., професор Бомба А. Я. (Рівненський державний гуманітарний університет)

Sabziiev E. N., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, (Kiber Ltd company, Baku), **Pashaiev A. B., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor** (Institute of Cybernetics of ANAS, Baku)

ON AN ALGORITHM OF MONITORING OF FM BROADCASTING

In this paper, we study the problem of automation of monitoring of FM radio frequencies. Using the mathematic model is removed a negative

effect of intermodulation. Based on a mathematical model was developed a software module that allows to cut off signals that are the result of intermodulation signals of stations considered frequency range.
***Keywords*: signal, intermodulation, FM broadcasting.**

Сабзієв Е. Н., к.ф.-м.н. (компанія Kiber Ltd, м. Баку),
Пашаєв А. Б., к.ф.-м.н., доц. (Інститут кібернетики НАНА, м. Баку)

ПРО ОДИН АЛГОРИТМ МОНІТОРИНГУ FM МОВЛЕННЯ

У цій статті ми вивчаємо проблему автоматизації моніторингу FM-радіо частот. Застосуванням математичної моделі віддаляється негативний вплив інтермодуляції. На основі математичної моделі був розроблений програмний модуль, який дозволяє відсікти сигнали, які є результатом інтермодуляційнних сигналів станцій у розглянутому діапазоні частот.
***Ключові слова:* сигнал, інтермодуляція, ЧС радіомовлення.**
