

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

УДК 621.396

ДВУМЕРНАЯ ОБОБЩЕННАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2021 М. Ю. Калинин

ООО «Импульс-сервис», Москва, Россия

Рассматривается универсальная модель, позволяющая формировать марковские модели радиосигналов с заданными изменениями формы двумерной плотности вероятностей.

Ключевые слова: радиосигнал, модуляция, марковская модель, плотность вероятностей.

Введение

В современной радиотехнике используются модулированные сигналы, обеспечивающие требуемые технические характеристики систем радиосвязи и их разнообразие постоянно нарастает [1-4]. Актуальной является задача анализа и моделирования радиосигналов с разнообразными видами модуляции и способами их формирования. Эффективной двумерной моделью дискретизированных по времени и квантованных по уровню сигналов является простая цепь Маркова [5], для аналитического формирования которой целесообразно разработать универсальную функцию двумерной плотности вероятностей, которая бы описывала статистические свойства основных видов радиосигналов.

Виды радиосигналов и их марковские модели

В системах цифровой связи [2, 4] применяются сигналы $s(t)$ с амплитудной (АМ),

частотной (ЧМ) и фазовой (ФМ) модуляцией, и их комбинированные варианты. При цифровой обработке [4] они дискретизируются по времени и квантуются по уровню аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и представляются последовательностью отсчетов s_n , где $n = \overline{1, N}$ – их номера, N – объем выборки, а для их описания целесообразно использовать марковскую модель [6-8].

В простой цепи Маркова [5] текущее значение отсчета $s_n = j$ вероятностно зависит только от предшествующего значения $s_{n-1} = i$ и эта связь описывается матрицей переходных вероятностей $[P_{ij}]$, где $i, j = \overline{1, M}$, M – число уровней квантования АЦП. Если известна двумерная плотность вероятностей значений сигнала $w(x_1, x_2)$, то для совместных вероятностей значений $s_1 = i$, и $s_2 = j$ получим

$$P(s_1 = i, s_2 = j) = \int_{g_{i-1}}^{g_i} \int_{g_{j-1}}^{g_j} w(x_1, x_2) dx_2 dx_1, \quad (1)$$

где $g_k, k = \overline{0, M}$ – уровни квантования АЦП, а переходные вероятности равны

$$P_{ij} = \frac{P(s_1 = i, s_2 = j)}{P(s_1 = i)} = \frac{\int_{g_{i-1}}^{g_i} \int_{g_{j-1}}^{g_j} w(x_1, x_2) dx_2 dx_1}{\int_{g_{i-1}}^{g_i} \int_{-\infty}^{\infty} w(x_1, x_2) dx_2 dx_1}. \quad (2)$$

При обработке экспериментальных реализаций отсчетов сигнала в них определяется

число l_{ij} переходов значений отсчетов от $s_{n-1} = i$ к $s_n = j$, которые также можно представлять матрицей и по величинам l_{ij} можно оценивать совместные вероятности значений отсчетов

$$\tilde{P}(s_1 = i, s_2 = j) = \frac{l_{ij}}{N-1} \quad (3)$$

и переходные вероятности \tilde{P}_{ij} в виде

$$\tilde{P}_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{r=1}^M l_{ir}}. \quad (4)$$

Как видно, двумерная плотность вероятностей $w(x_1 x_2)$ или числа перехода l_{ij} определяют свойства марковской модели.

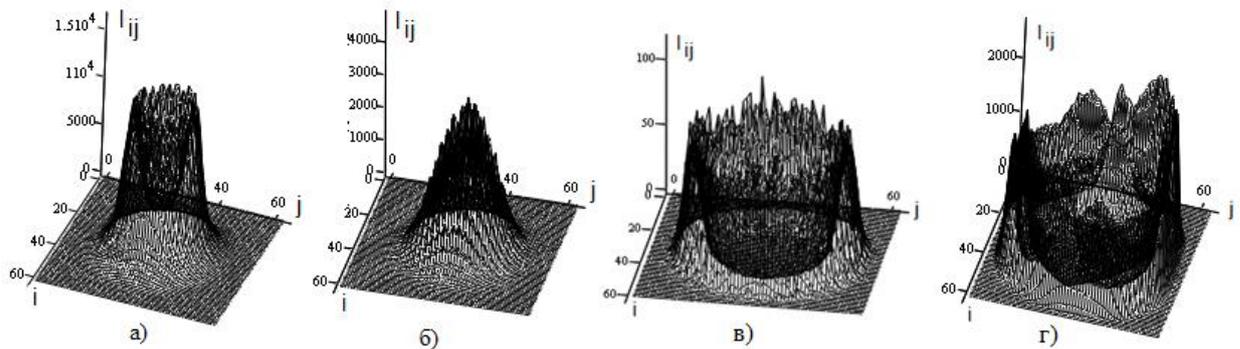


Рисунок 1. Примеры трехмерных диаграмм чисел перехода

Целесообразно разработать формулу двумерной плотности вероятностей $w(x_1 x_2)$ в виде функции двух переменных, форма которой описывает форму трехмерных диаграмм чисел перехода в марковских моделях

радиосигналов, примеры которых показаны на рисунке 1.

Обобщенная вероятностная модель

В качестве простой обобщенной вероятностной модели выберем функцию двух переменных

$$w(x, y) = \frac{A \exp[a(x^2 + by^2)] \cdot \exp\left[-(x^2 + y^2)^d\right]}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[a(x^2 + by^2)] \cdot \exp\left[-(x^2 + y^2)^d\right] dx dy}, \quad (5)$$

где a , b и d – параметры модели.

На рисунке 2 приведена панорама трехмерных диаграмм плотности вероятностей универсальной модели (5), которые согласуются с формой экспериментальных диаграмм на рисунке 1. Параметр a определяет форму поверхности, коническую при $a=0$, или с провалами вершины $a = 1 \div 3$ и далее с глубоким провалом ($a=10$). Параметр d задает крутизну скатов конической или цилиндрической поверхности, а величина b находится в окрестности 1 и определяет срез одной из сторон цилиндрической поверхности.

Предлагаемая универсальная модель позволяет формировать марковские модели радиосигналов с заданными изменениями формы двумерной плотности вероятностей,

например, для исследования эффективности алгоритма классификации сигналов [9, 10]. На этой основе можно создавать имитаторы сигналов [8] с заданными свойствами для исследования процедур их цифровой обработки.

Заключение

Предложена обобщенная двумерная вероятностная модель, описывающая связи соседних отсчетов радиосигналов с различными видами модуляции, позволяющая формировать их марковские модели с заданными различиями для исследования свойств алгоритмов классификации, формирования границ соседних классов и тестирования соответствующих программного обеспечения и аппаратуры обработки сигнала.

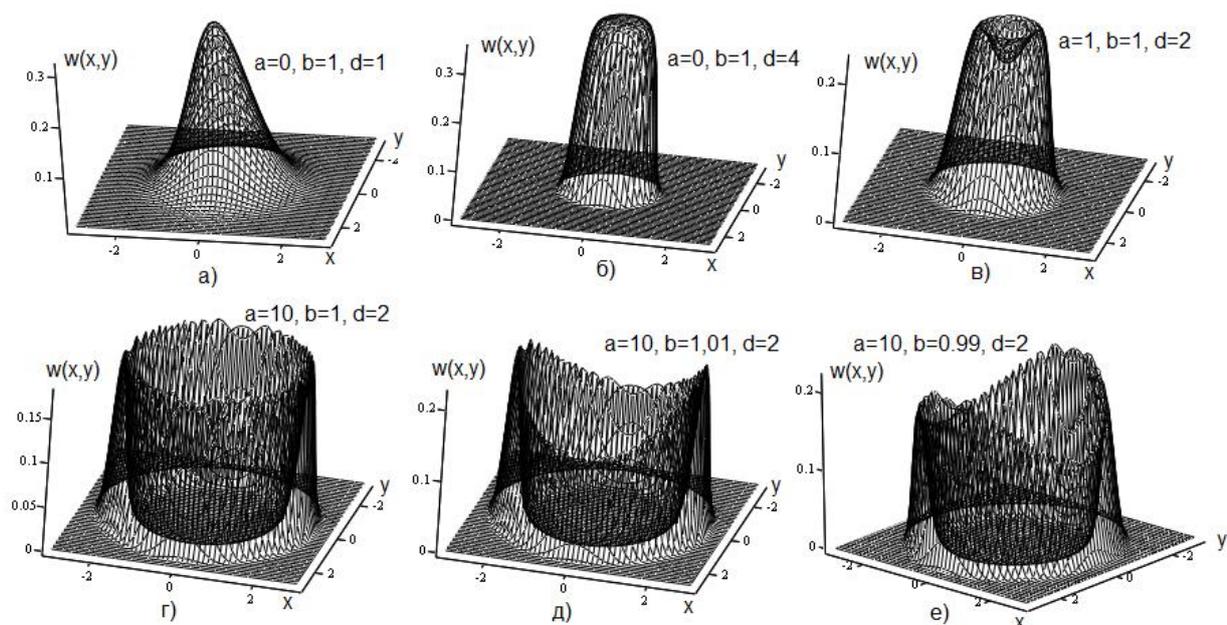


Рисунок 2. Трехмерные диаграммы плотности вероятностей универсальной модели

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

2. Simon Haykin, Michael Moher. Introduction to Analog and Digital Communications. John Wiley & Sons, inc., 2007. – 515 p.

3. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. – М.: Советское радио, 1970. – 376 с.

4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб: Питер, 2002, – 608 с.

5. Казаков В. А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи / В. А. Казаков. – М.: Советское радио, 1973. – 232 с.

6. Глушков А. Н. Аспекты применения марковских моделей информационных сигналов при разработке устройств имитации информационных сигналов / А. Н. Глушков, М. Ю. Калинин // Охрана, безопасность, связь. Воронеж, ВИ МВД России. – 2017. – № 1-1. – С. 272-276.

7. Gaussian signals simulation using biconnected markov chain / A. N. Glushkov, V. V. Menshikh, N. S. Khohlov, O. I. Bokova, M. Y. Kalinin // 2nd International Ural Conference on Measurements (uralcon) Proceedings. – 2017. – P. 245-250.

8. Markov model based mathematical representation of radio signals / A. N. Glushkov, V. V. Menshikh, N. S. Khohlov, O. I. Bokova, M. Y. Kalinin // 2nd International Ural Conference on Measurements (uralcon) Proceedings. – 2017. – P. 239-244.

9. Калинин М. Ю. Программа классификации информационных сигналов / М. Ю. Калинин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618911, 23.07.2018. Заявка № 2018616495 от 13.06.2018.

10. Калинин М. Ю. Программа формирования матриц переходных вероятностей / М. Ю. Калинин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619251, 02.8.2018. Заявка № 2018616464 от 13.06.2018.

TWO-DIMENSIONAL GENERALIZED PROBABILITY MODEL RADIO SIGNALS

© 2021 M. Y. Kalinin

Impulse-Service (Moscow, Russia)

A universal model is considered that makes it possible to form Markov models of radio signals with given changes in the shape of the two-dimensional probability density.

Keywords: radio signal, modulation, Markov model, probability density.