

# Обработка сигналов в системах телекоммуникаций

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Афанасьевский В.Б., Корнев С.Ф., Бойко О.А. ([boy\\_legacy@mosk.ru](mailto:boy_legacy@mosk.ru))

Институт криптографии связи и информатики Академии ФСБ Российской Федерации  
119602, Москва

При осуществлении тестирования, радиомониторинга и радиоконтроля различных систем связи одной из основных задач является определение параметров сигнала. Развитие современных систем связи тесно связано с применением цифровых технологий. Цифровой способ передачи информации является основным для большинства систем связи. Основными параметрами, которые оцениваются и определяются при техническом (додемодуляционном) анализе сигнала, являются: несущая и тактовая частоты, а так же тип модуляции сигнала. Под типом модуляции будем понимать амплитудную (АМ), частотную (ЧМ), фазовую (ФМ), квадратурно-амплитудную (КАМ) модуляции (в то время как под видом понимается также указание количества сигнальных позиций: ФМ-4, ЧМ-2 и др. [1]). Для оценки указанных параметров и определения типа модуляции сигнала цифровой системы связи предлагается использовать следующие методы:

1. спектральный анализ нелинейных преобразований сигнала;
2. спектрально-корреляционный анализ (метод спектрокоррелограмм);
3. вейвлет-анализ сигнала.

### 1. Спектральный анализ нелинейных преобразований сигнала.

Данный метод основан на том, что вне зависимости от типа модуляции и формирующего фильтра (Roll-off, Square Root Rolloff и др. [2]), амплитудный спектр сигнала на выходе нелинейного преобразователя будет иметь ярко выраженные локальные максимумы (экстремумы, точки разрыва 1 рода) на частотных составляющих, соответствующих гармоникам несущей и тактовой частоты. Для оценки тактовой частоты наиболее эффективным нелинейным преобразованием является квадрат производной квадратурной составляющей комплексной огибающей (КСКО) сигнала (рис. 1).

$$F\{A_x^2(t) + A_B^2(t)\}$$

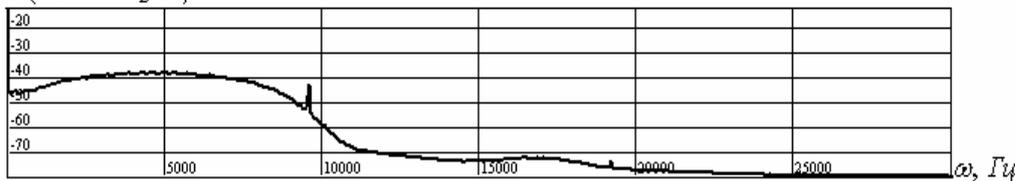


Рис. 1. Амплитудный спектр квадратурной составляющей комплексной огибающей сигнала.

При этом мощность составляющей на тактовой частоте  $\omega_C$  зависит от  $N$  – количества элементарных посылок (ЭП), спектр нелинейного преобразования которых используется для оценки тактовой частоты:

$$S_{NP}(\omega_C) = NB_0(\omega_C),$$

где  $B_0(\omega_C)$  – функция, зависящая от типа нелинейного преобразования и формирующего фильтра. Поэтому для оценки по данному методу требуется длительная реализация сигнала и соответственно вычисление быстрого преобразования Фурье (БПФ) с большим порядком ( $> 2^{15}$ ). Точность оценки при этом также зависит от  $N$  и порядка БПФ.

Оценка несущей частоты  $\omega_H$  и определение типа модуляции могут быть осуществлены, исходя из следующих соображений:

– амплитудный спектр непреобразованного АМ сигнала имеет ярко выраженный максимум на несущей частоте, что позволяет сразу отличить их от сигналов с другими типами модуляции, а также точно оценить несущую частоту;

– при разложении сигнала на квадратуры с небольшим сдвигом относительно несущей частоты спектр нелинейного преобразования (модуля) КСКО будет иметь (рис. 2а, 2б, 2в):

- для ФМ сигналов: локальные максимумы на  $\omega_m = \{n\omega_C, n\omega_C + m\Delta\omega\}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , где  $m$  – количество точек в сигнально-кодовой конструкции,  $\Delta\omega$  – расстройка относительно несущей частоты;

- для ЧМ сигналов: локальные максимумы на  $\omega_m = \{n\omega_C + 2n\Delta\omega\}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ;

- для КАМ сигналов: локальные максимумы на  $\omega_m = \{n\omega_c\}, n = 1, 2, \dots$

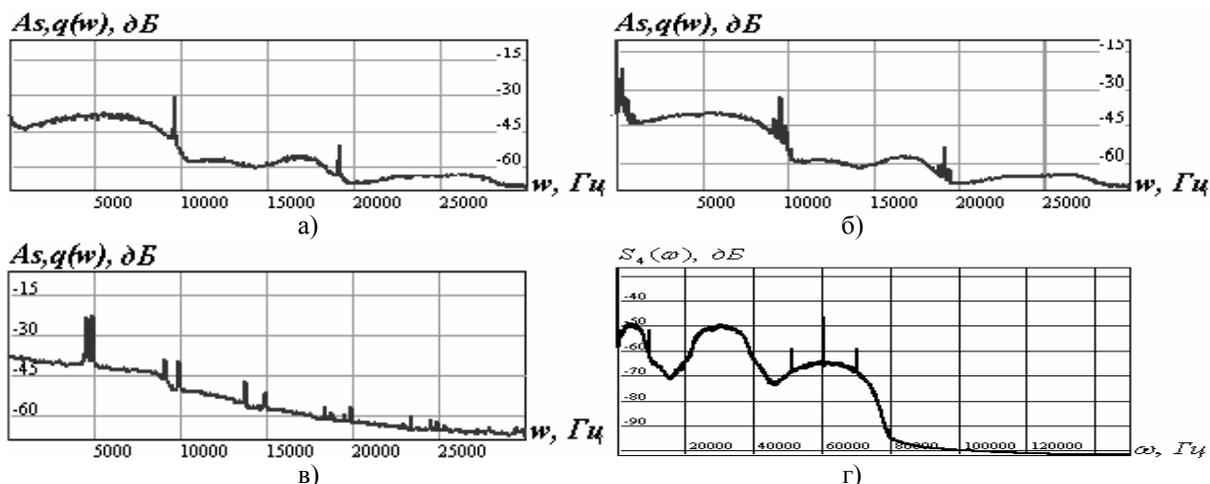


Рис. 2. Амплитудные спектры нелинейных преобразований сигналов с различными типами модуляции: а) модуль КСКО КАМ сигнала, б) модуль КСКО ФМ сигнала, в) модуль КСКО ЧМ сигнала, г) модуль сигнала ФМ-4.

Таким образом, можно различать сигналы с различными типами модуляции и оценить несущую частоту методом нуль-биений (для ФМ и ЧМ сигналов). Несущую частоту для ФМ и КАМ сигналов также можно оценить по амплитудному спектру модуля сигнала (рис. 2г). При этом частоты ярко выраженных экстремумов  $\omega_m = \{m\omega_H + n\omega_C\}, n = 1, 2, \dots$  (для КАМ  $m = 4$ ). Очевидно, что для ФМ сигналов, при этом можно определить количество сигнальных позиций  $m$ . Точность оценки по-прежнему будет зависеть от порядка БПФ.

## 2. Метод спектрокоррелограмм

Этот метод основан на корреляционных свойствах спектров кодовой последовательности и периодичности спектра модулированного сигнала [3]. Сущность метода заключается в расчете матрицы коэффициентов корреляции (матрица нелинейной когерентности) отсчетов амплитудных спектров, рассчитанных по алгоритму БПФ для различных участков реализации сигнала. Элемент матрицы определяется выражением:

$$K_{i,j} = \frac{M\{S_i S_j\} - M\{S_i\}M\{S_j\}}{\sqrt{M\{S_i^2\} - M^2\{S_i\}}\sqrt{M\{S_j^2\} - M^2\{S_j\}}}, \text{ где } S_i, S_j - \text{отсчеты спектра.}$$

Отображая каждый элемент матрицы точкой, яркость которой зависит от величины элемента (коэффициента корреляции), будем получать определенную картину для различных типов модуляции. Такое отображение назовем спектрокоррелограммой сигнала. Структура спектрокоррелограммы приведена на рис. 3а. На рис. 3б, 3в, 3г представлены спектрокоррелограммы сигналов с различными типами модуляции.

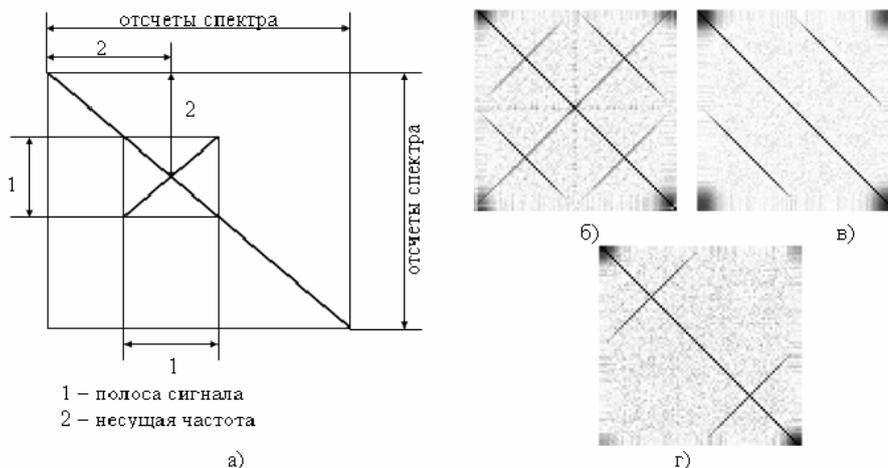


Рис. 3. Структура спектрокоррелограммы (а) и спектрокоррелограммы сигналов с: б) АМ, в) ФМ и КАМ, г) ЧМ.

Таким образом, метод позволяет различать сигналы с различными типами модуляции и оценивать несущую и тактовую частоты (точность оценки ниже, чем у метода спектрального анализа нелинейных преоб-

разований сигнала). Этот метод также требует длительной реализации сигнала, а точность по-прежнему зависит от порядка БПФ. Также недостатком метода является то, что вид спектрокоррелограммы зависит от параметров модуляции (в частности от индекса модуляции для ЧМ сигналов).

### 3. Метод вейвлет-анализа.

Непрерывное вейвлет-преобразование (ВП) сигнала  $s(t)$  определяется выражением [4]:

$$W(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi \left( \frac{t - \tau}{a} \right) dt,$$

где  $a$  – масштаб,  $\tau$  - сдвиг и  $*$  обозначает комплексное сопряжение. Функция  $\Psi(t)$  является материнским вейвлетом, а дочерние вейвлеты  $\Psi_a(t)$  получаются масштабированием и сдвигом материнского вейвлета. Простейшим базисным вейвлетом является вейвлет Хаара:

$$\psi_H(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1, \\ 0, & t \notin [0; 1] \end{cases}$$

вейвлет-преобразование с использованием базиса Хаара обозначается  $HWT(a, \tau)$  (Haar Wavelet Transform). В отличие от преобразования Фурье, базис ВП хорошо локализован как в частотной, так и во временной областях, что позволяет анализировать кратковременные особенности сигналов. Такими особенностями для сигналов цифровых систем связи являются переходные процессы в тактовые моменты времени.

Если вейвлет полностью укладывается на тактовый интервал, то модуль ВП Хаара для сигналов с различными видами модуляции описывается выражениями:

$$\begin{aligned} |HWT_{QAM}(a, \tau)| &= \frac{4\sqrt{S_i}}{\sqrt{a}\omega_H} \sin^2 \left( \frac{\omega_H a}{4} \right), \\ |HWT_{PSK}(a, \tau)| &= \frac{4\sqrt{S}}{\sqrt{a}\omega_H} \sin^2 \left( \frac{\omega_H a}{4} \right), \\ |HWT_{FSK}(a, \tau)| &= \frac{4\sqrt{S}}{\sqrt{a}(\omega_H + \omega_i)} \sin^2 \left( \frac{(\omega_H + \omega_i) a}{4} \right), \end{aligned}$$

где  $S, S_i$  - мощность ЭП,  $\omega_i$  - частота ЭП для ЧМ сигнала.

$|HWT(\tau)|$  – модуль ВП Хаара при фиксированном масштабе  $a$  в пределах тактового интервала зависит от амплитуды и частоты ЭП. В тактовые моменты времени  $|HWT(\tau)|$  имеет локальный минимум или максимум (из-за смены передаваемого символа). Таким образом,  $|HWT(\tau)|$  ФМ сигнала представляет собой постоянную функцию (со всплесками соответствующими тактовым моментам времени), а ЧМ и КАМ сигналов – ступенчатые функции. Так как дисперсия постоянной функции много меньше дисперсии ступенчатой функции, то устранив всплески путем фильтрации и рассчитав дисперсию  $|HWT(\tau)|$  анализируемого сигнала, можно выделять сигналы с ФМ. Для различения сигналов с КАМ и ЧМ необходимо осуществить амплитудную нормализацию анализируемого сигнала. Амплитудная нормализация не существенно повлияет на  $|HWT(\tau)|$  сигналов с ФМ и ЧМ, а  $|HWT(\tau)|$  КАМ сигнала станет постоянной по времени функцией. Таким образом, оценивая дисперсии  $|HWT(\tau)|$  амплитудно-нормализованного и ненормализованного анализируемого сигнала, можно определить тип модуляции сигнала. Структурная схема, устройства построенного на данных принципах приведена на рис. 4[5].

Предложенный метод анализа позволяет различать сигналы с вероятностью правильного определения типа модуляции близкой к 97% при ОСШ >5 дБ и достаточно малом числе анализируемых ЭП (до 50), что является существенным преимуществом по сравнению с ранее изложенными методами. Также следует отметить, что амплитудный спектр  $|HWT(a, t)|$  для сигналов с различными типами модуляции будет иметь ярко выраженный максимум на частоте, соответствующей тактовой частоте анализируемого сигнала. Поэтому вычисление  $|HWT(a, t)|$  анализируемого сигнала может использоваться как нелинейное преобразование для оценки тактовой частоты по методике, указанной в п.1.

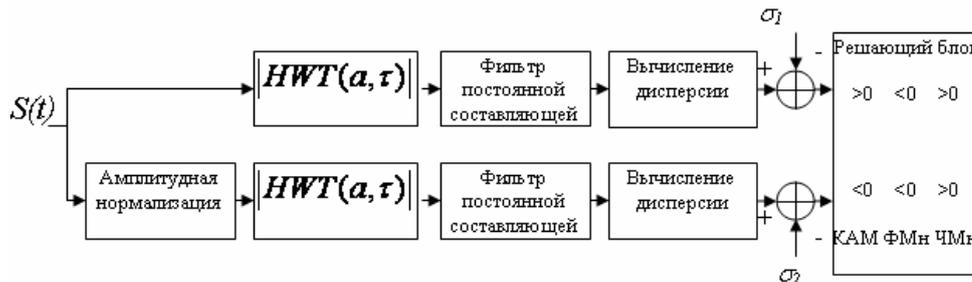


Рис. 4. Схема определения типа модуляции, основанная на ВП Хаара.

## Литература

1. Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003.
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ./ Под ред. В. И. Журавлева. – М.: Радио и связь. 2000.
3. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М., изд-во «Советское радио», 1970.
4. Яковлев А. Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов: Учебное пособие. – М: САЙНС-ПРЕСС, 2003.
5. Liang Hong, K. C. Ho, Identification of digital modulation type using wavelet transform. Department of Electrical Engineering, University of Missouri-Columbia.

## METHODS OF THE SIGNALS PARAMETERS ESTIMATION AND MODULATION TYPE DETERMINATIONS OF THE DIGITAL COMMUNICATION SYSTEM

Afanasevsky V., Kornev S., Boyko O. ([boy\\_legacy\\_mosk.ru](mailto:boy_legacy_mosk.ru))

Institute cryptography communication and computer science of Academy FSB of the Russian Federation  
119602, Moscow

One of the primary goals at realization of testing, radiomonitoring and the radiosupervision of various communication systems is signal parameters determination. Development of modern communication systems is closely coupled to application of digital technologies. The digital transmission mode of the information is the core for the majority of communication systems.

For digital communication systems parameters of signals can be subdivided into two fundamental kinds:

- parameters of an analog signal of a digital communication system: a kind of the modulation, carrier frequency, symbol rate, a frequency bandwidth, a frequency space, an index of modulation, a kind of a signal-code construction, etc. (the term "modulation", as a rule, is applied to digital communication systems instead of "manipulation", we shall consider hereinafter as their synonyms);
- parameters of a transmitted digital stream: methods of noiseproof encoding, a scrambling and multiplexing and their parameters.

Accordingly the technical analysis of signals of digital communication systems can be subdivided into two fundamental stages:

- the technical analysis of an analog signal;
- the structurally-time analysis of a transmitted digital stream.

Key parameters estimated and defined at the first stage, are: carrier frequency, symbol rate and as type of modulation of a signal. As type of modulation we shall understand amplitude (AM), frequency (FM), phase (PSK), quadrature amplitude (QAM) modulations (while the kind is understood also as the instruction of quantity of signal positions: QPSK, FSK-2, etc.).

For boosting efficiency of an estimation of parameters of an analog signal of a digital communication system it is offered to use a complex combination of following methods:

- spectrum analysis of signal nonlinear transformations (the analysis of amplitude spectrums local maximum of signal nonlinear transformations calculated on the big number of symbol);
- the spectral correlation analysis – construction of a spectrum samples correlation matrix of a signal;
- the wavelet analysis – calculation of a signal wavelet spectrum.

Use of these methods allows to estimate signal parameters with high accuracy and to define a used kind of modulation. First two of the pointed methods demand presence of long realization of a signal (some thousand symbols). The third method is based on wavelet transformation of a signal which basis is well localized both in time, and in the frequency space, therefore this method we shall apply to the analysis of short realizations of a signal.