

*Н. С. ПАСТУШЕНКО, канд. техн. наук, О. Н. ПАСТУШЕНКО*

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ НЕСУЩЕГО КОЛЕБАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### Введение

Важными и обширными областями применения фазоманипулированных (phase shift keying – PSK) сигналов являются сотовые системы связи, системы удаленного радиодоступа к сети общего пользования, персональные локальные сети связи (WPAN), а также при организации факсимильной связи. Одна из причин широкой популярности сигналов с фазовой модуляцией – высокая помехозащищенность этих сигналов и решение задач качественной передачи данных при низком отношении сигнал/шум [1].

Особенностью применения указанных сигналов в ряде систем связи является изменение вида фазовой модуляции и частоты несущего колебания в течение текущего сеанса [2]. Смена указанных параметров может производиться как алгоритмически (запланировано), так и в случайные (незапланированные) моменты времени, например при сбоях в работе аппаратуры связи.

Поэтому актуальной является научно-техническая задача определения частоты несущего колебания сигналов с фазовой модуляцией (ФМ). Несущая частота – один из главных, информативных параметров сигнала. Условно способы определения частоты можно разделить на фильтровые, дискриминаторные, интерференционные, корреляционные и др [3].

Как известно, фазо-манипулированный сигнал имеет следующий вид:

$$S_j(t) = \sqrt{\frac{2E}{T_o}} \cos[2\pi f_{нес} t / F_{дискр} + \phi_i(t) + \phi_o], \quad (1)$$

где  $\sqrt{\frac{2E}{T_o}}$  – амплитудный множитель, определяемый энергией сигнала  $E$  и периодом сигнала

$T_o$ ;  $f_{нес}$  – неизвестная частота несущего колебания;  $\phi_i(t) + \phi_o$  – фазовая составляющая сигнала, которая включает первый член, зависящий от времени (модулирующей последовательности) и начальную фазу  $\phi_o$ ;  $F_{дискр}$  – частота дискретизации регистрируемого сигнала,  $j$  – некоторый индекс, который определяется частотой дискретизации во временной области. Особую роль у сигналов PSK играет составляющая

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M}, \quad (2)$$

которая может принимать  $M$  дискретных значений. Здесь  $i = 1, \dots, M$ , как правило, определяется модулирующей последовательностью.

Современные информационно-статистические методы анализа и математическое моделирование являются очень важным инструментом научного исследования чрезвычайно сложных процессов, которыми являются материалы регистрации временных рядов с PSK, полученные в условиях априорной неопределенности. При этом особо важно полностью учесть априорную информацию и грамотно выбрать направление исследований. Для задачи оценки неизвестной частоты несущего колебания сигналов с фазовой модуляцией необходимо иметь в виду следующее. В первую очередь, это то, что при наличии энергетических отличий полезного и мешающих сигналов (имеет место модель сигнал/шум) в принятой реализации должна присутствовать гармоническая составляющая несущей, которая должна содержать несколько положительных или (и) отрицательных отсчетов. Этот факт обусловлен тем, что для относительной фазовой модуляции период модулирующей последовательности меньше одного (или нескольких) периода несущего колебания. Поэтому устойчивой харак-

характеристикой анализируемого временного ряда является количество импульсов (отсчетов) в положительном или отрицательном полупериоде сигнала [5].

Указанную характеристику можно получить в процессе апостериорной статистической обработки анализируемого временного ряда. Естественно предположить, что количество импульсов в полупериоде сигнала будет иметь максимальную частоту. В случае, если отношение  $F_{\text{дискр}} / f_{\text{нес}}$  не равно целому числу, то значению рассчитанной частоты могут отвечать две величины. Полученные оценки частот появления количества импульсов одной полярности позволяют получить грубую оценку частоты несущего колебания. Для этого необходимо известную частоту дискретизации разделить на полученное оценочное значение количества импульсов на периоде у анализируемого временного ряда. Более того, как показали результаты исследований, указанная характеристика слабо зависит от отношения сигнал/шум в анализируемой реализации.

Результаты статистической обработки временных рядов, сформированные с помощью СКМ МАТЛАБ без мешающего шума, представлены на рис. 1, а, б. При этом по оси X показано число положительных импульсов временного ряда, следующих друг за другом. Как и следовало ожидать, наиболее вероятное число при частоте несущей в 1600 Гц равно 3 и 4 для всех видов модуляции. Аналогичный характер имеют диаграммы для отрицательного полупериода сигнала.

Влияние гауссова шума на частоту появления количества импульсов на полупериоде сигнала при среднем отношении сигнал/шум, равном 5 дБ, представлены на рис. 1, в и г. При уменьшении отношения сигнал/шум менее 5 дБ начинаются изменения в гистограммах для всех видов модуляции.

Таким образом, количество положительных (или отрицательных) импульсов, следующих друг за другом, является устойчивой характеристикой, слабо зависящей от отношения сигнал/шум и должно использоваться при решении задачи оценки частоты несущего колебания.

В работах Барнинга (1963), Ломба (1976), Скаргла (1982) для оценки спектра мощности неравномерных временных рядов предложены функции, отличные от традиционной схемы оценки спектра с помощью преобразования Фурье или быстрого преобразования Фурье (периодограммы Шустера) [4]. В основе построения этих оценок лежит общая идея: аппроксимация временного ряда простой гармонической функцией.

Рассмотрим подробнее эту задачу. Представим анализируемый временной ряд в виде  $x = x(t_k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , который задан на произвольном множестве временных отсчетов  $t_k$ . В качестве модели этого ряда возьмем выражение

$$f(t) = \sum_{i=1}^2 a_i \varphi_i(t), \quad (3)$$

где

$$\varphi_1(t) = \cos \omega t, \quad \varphi_2(t) = \sin \omega t, \quad (4)$$

а  $\omega = 2\pi f_{\text{нес}}$  – угловая частота несущего колебания.

При изложении содержания метода LS-спектра, как правило, используются следующие обозначения [4]:

$$(p, q) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p(t_k) q(t_k), \quad (5)$$

$$\|p\|^2 = (p, p). \quad (6)$$

Для определения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  используют систему нормальных уравнений

$$\begin{bmatrix} \|\varphi_1\|^2 & (\varphi_1, \varphi_2) \\ (\varphi_2, \varphi_1) & \|\varphi_2\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x, \varphi_1) \\ (x, \varphi_2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

решение которой имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \|\varphi_2\|^2 & -(\varphi_1, \varphi_2) \\ -(\varphi_2, \varphi_1) & \|\varphi_1\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (x, \varphi_1) \\ (x, \varphi_2) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\Delta = \|\varphi_1\|^2 \|\varphi_2\|^2 - |(\varphi_1, \varphi_2)|^2. \quad (9)$$

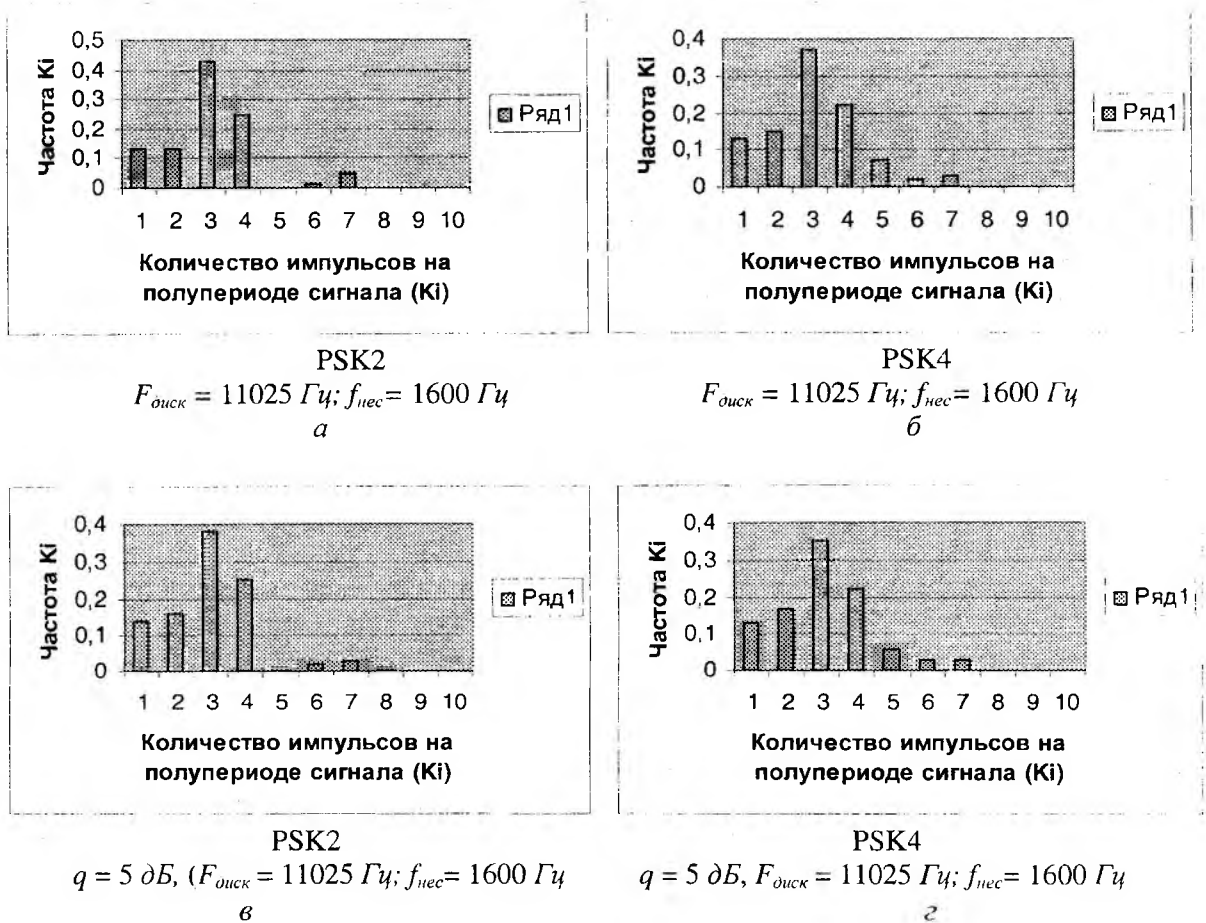


Рис. 1

Для заданной частоты  $\omega$  с помощью (8) можно найти коэффициенты модели (3) и определить невязку аппроксимации

$$\varepsilon_k = x(t_k) - f(t_k). \quad (10)$$

В дальнейшем за счет изменения  $\omega$  можно минимизировать сумму квадратов невязок, т.е.

$$\|\varepsilon\|^2 = \min. \quad (11)$$

Частота, которая обеспечивает минимум в (11), будет являться оценкой несущей.

Результаты, которые представлены на рис. 2 получены в процессе обработки временных рядов, которые включали примерно 20000 дискрет. При этом анализируемая гармоническая составляющая (положительные и отрицательные полупериоды) составляла примерно 20% от временного ряда. Величина  $|\varepsilon|^2$  при проведении моделирования была равна значению 0.00001.

Анализ полученных зависимостей дает возможность сформулировать следующие выводы: метод *LS-спектра* при отношении сигнал/шум более 7.5 дБ позволяет получить модуль

ошибки математического ожидания частоты несущего колебания удовлетворяющий предъявляемым требованиям; однако среднее квадратическое отклонение достаточно большое.

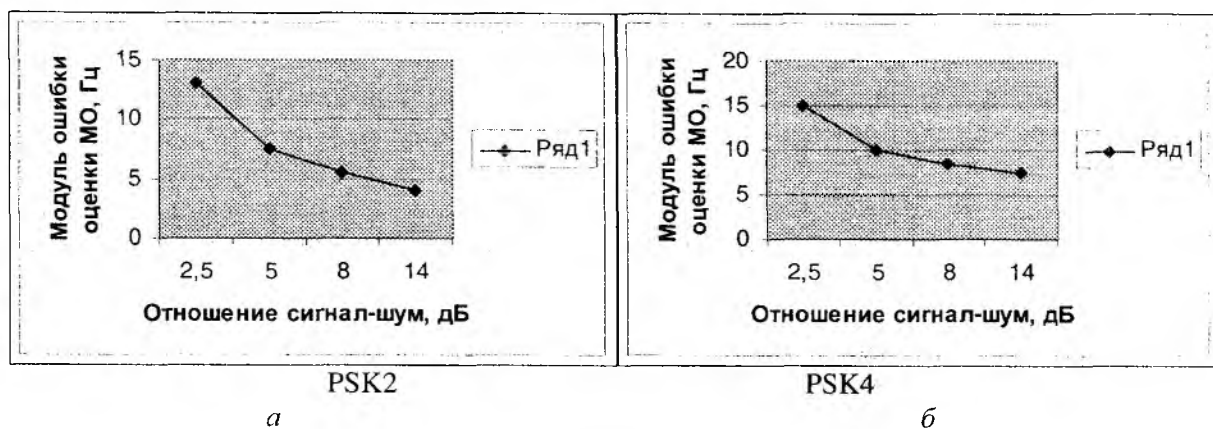


Рис. 2

Поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность автоматического уменьшения среднего квадратического отклонения. Для этого были проанализированы оценки частоты несущего колебания полученные методом LS-спектра. Гистограмма с результатами анализа представлена на рис. 3.



Рис. 3

Анализ представленной гистограммы показывает наличие в результатах оценивания начительного количества аномальных оценок, например в диапазоне от 1400 до 1410 Гц. Причинами появления аномальных оценок могут быть ошибки в работе процедур формирования исходной выборки измерительной информации (выбора полупериодов сигнала), влияние мешающего шума и т.д.

Если не учитывать наличие аномальных оценок, попытки использования оценок частоты несущего колебания в последующих процедурах обработки данных могут привести к самым негативным результатам [6]. Что же делать? Надо отбраковать аномальные оценки, а затем искать оценки частоты несущего колебания. К сожалению, реализовать отбраковку аномальных оценок оказывается совсем не просто. Оценки, аномальные с позиций одного закона распределения, являются естественным проявлением закономерностей второго. Если нет надежной процедуры отбраковки или практических соображений, связанных с физикой наблюдаемой величины, пытаются выйти из положения одним из следующих способов.

В первом случае усекают выборку, отбрасывая определенную часть минимальных и/или максимальных наблюдений, и по оставшейся части оценивают параметры распределения. Во втором – перед процедурой оценивания винзоризируют выборку: всем наблюдениям левее и/или правее определенных значений присваивают одинаковые значения [7]. Обе эти процедуры далеко не всегда приводят к положительным результатам. Кроме того, в обоих случаях имеем дело с новой генеральной совокупностью, которой принадлежит видоизмененная

выборка. Более правильным следует считать третий подход, когда выборку цензируют. Для наблюдений, попавших левее и/или правее определенных значений, фиксируют лишь факт попадания в соответствующий интервал, опуская конкретные значения этих наблюдений. По такой цензированной выборке оценивают параметры закона [8].

В условиях априорной неопределенности и необходимости автоматической реализации процедур отбраковки аномальных оценок в масштабе реального времени указанные методы неприменимы.

Для решения указанных процедур исследовалась эвристическая итерационная процедура, которая частично учитывала механизмы методов указанных выше. Алгоритм процедуры представлен на рис. 4.

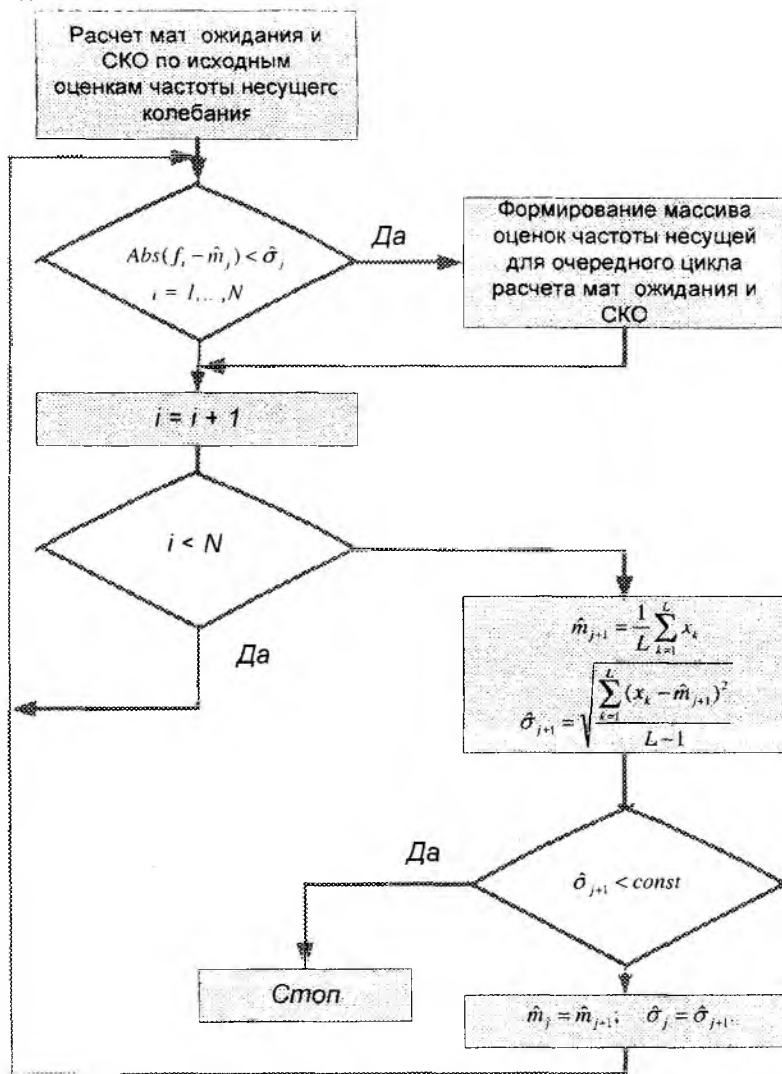


Рис. 4

Кратко рассмотрим его работу. Из исходного массива оценок частоты несущего  $f_i$  с помощью соотношения  $Abs(f_i - \hat{m}_j) < \hat{\sigma}_j$  отбирают оценки, которые имеют модуль разности меньший за величину оценки среднеквадратического отклонения  $\hat{\sigma}_j$ . Здесь  $\hat{m}_j$  – оценка математического ожидания частоты несущего колебания, которая получена по всему массиву  $(f_i)$ .

Далее по «сокращенному» массиву оценок частоты несущего колебания уточняются оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения ( $\hat{m}_{j+1}, \hat{\sigma}_{j+1}$  – соответственно). В случае, если полученная оценка  $\hat{\sigma}_{j+1}$  меньше наперед заданной константы ( $const$ ), итерационный процесс заканчивается. В противном случае, последние оценки

$\hat{i}_{j+1}, \hat{\sigma}_{j+1}$  используются в рассмотренных выше соотношениях и цикл расчетов повторяется о исходному массиву оценок несущей частоты.

Результаты моделирования этого алгоритма представлены на рис. 5.

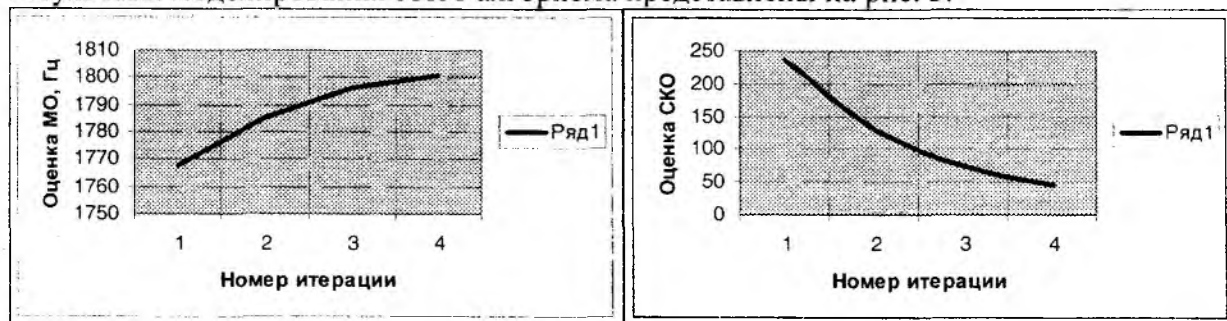


Рис. 5

Анализ полученных зависимостей показывает повышение качества оценок частоты несущего колебания PSK и уменьшение среднего квадратического отклонения в несколько раз.

### Результаты и направления дальнейших исследований

Предложен и исследован метод оценки частоты несущего колебания с использованием процедур LS-спектра. При этом получаемые оценки являются смещенными и имеют достаточно большую оценку дисперсии. Для повышения качества получаемых оценок предложена эвристическая процедура исключения аномальных оценок, которая не требует априорных данных и значительных вычислительных затрат.

Дальнейшее повышение качества оценок несущего колебания связано с учетом фазовых и частотных искажений (джиттера) принимаемых сигналов, на что и целесообразно ориентировать исследования в будущем.

**Список литературы:** 1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. С.1104. 2. Аджемов С. С., Бокк Г. О., Поборчая Н. Е. и др. Метод определения вида цифровой модуляции при априорной неопределенности основных параметров радиосигнала. М.: Радиотехника. 2004. № 5. С. 71-76. 3. Цветнов В. В., Демин В. П., Курьяном А. И. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие. М.: МАИ, 1998. С.256. 4. Витязев В. В. Анализ неравномерных временных рядов. Учеб. пособие СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. 68с. 5. Пастушенко Н. С., Пастушенко О. Н. Оценка частоты несущего колебания фазоманипулированных сигналов в условиях априорной неопределенности // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. Х.: Технологический Центр, 2008. Вып.1/2(31). С. 47-51. 6. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 303 с. 7. Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. Статистический анализ одномерных наблюдений по частично группированным данным // Изв. вузов. Физика. Томск, 1995. № 9. С. 39-45. 8. Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. Вопросы обработки выборок одномерных случайных величин // Науч. вестник НГТУ, 1996. № 2. С. 3 – 25.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.10.2008