

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ НЕСУЩЕГО КОЛЕБАНИЯ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Введение

В современных системах связи широко используется фазовая модуляция. При этом во многих случаях в течение одного сеанса связи меняется как вид модуляции, так и частота несущего колебания. Более того, разработаны методы передачи данных, у которых частота несущего колебания периодически изменяется. Примером может служить метод множественного доступа с кодовым разделением (*code-division multiple access – CDMA*). Данный метод доступа базируется на основе методов расширения спектра (*spread – spectrum – SS*), которые можно разделить на две основные категории: расширение спектра методом прямой последовательности (*direct sequence – DS*) и расширение спектра методом скачкообразной перестройки частоты (*frequency hopping*).

При использовании расширенного спектра со скачкообразной перестройкой частоты (*frequency – hopping spread spectrum – FHSS*) передача сигнала производится с помощью определенных наборов частот, имеющих свойства случайных последовательностей. Перестройка частоты сигнала происходит через определенные интервалы времени. Изменение рабочих частот приемника синхронизируется с передатчиком, что позволяет получить сигнал. В то же время при попытке несанкционированно прослушать сеанс связи будут слышны лишь неразборчивые звуки, а создание намеренных помех на одной из частот приведет к уничтожению только нескольких битов сигнала. *FHSS* – используется при передаче сигналов с фазовой манипуляцией (*phase shift keying – PSK*). Таким образом, при определении вида модуляции, демодуляции сигнала необходимо иметь механизм оценки частоты несущего колебания по ограниченной выборке (на периоде или полупериоде несущего колебания).

Анализ последних достижений и публикаций

Рассматриваемая проблема сводится к задаче анализа характеристик временных рядов, которая достаточно давно исследуется в научной литературе. Проблема анализа характеристик временных рядов, а также выявления изменений их свойств возникла в конце 50-х годов прошлого столетия. К настоящему времени эта проблема превратилась в интенсивно развивающееся направление математической статистики, которое находит широкое применение в ряде важных областей, таких как связь, радиолокация, сейсмология, медицинская и техническая диагностика и т.д. Среди значительных работ из этой области можно выделить таких авторов: Р. Блэкмана и И. Тьюки [1], Г. Дженкинса и Г. Ваттса [2], Дж. Бокса и Г. Дженкинса [3], Дж. Бендата и А. Пирсола [4], М. Бассвиль и А. Банвениста [5] и др.

Измерение несущей частоты регистрируемого сигнала является одной из наиболее важных задач. Специфичность методов определения несущей частоты обусловлена, с одной стороны, ограниченностью времени анализа и, с другой стороны, широким диапазоном анализируемых частот.

Несущая частота – один из наиболее информативных параметров сигнала. Условно способы определения частоты можно разделить на фильтровые, дискриминаторные, интерференционные, корреляционные и др.

Определение частоты при помощи фильтров сводится к поиску и указанию фильтра, настроенного на сигнал (точнее, того фильтра, в полосе которого обнаруживается сигнал). В панорамных приемниках с последовательным анализом анализируемого диапазона на все частоты в этом диапазоне последовательно настраивается один и тот же фильтр. Поэтому определение частоты сводится к определению момента времени, в который частота настройки этого фильтра совпадает с частотой сигнала.

В многоканальных приемниках с параллельным спектральным анализом исследуемого диапазона для определения частоты сигнала достаточно указать номер фильтра, в полосе которого обнаружен сигнал. То же справедливо и для указанных выше схем модификаций способов многоканального приема: для матричного приемника и приемника с цифровым спектральным анализом. Как известно [6 – 8], точность отдельного канала у многоканальных и панорамных приемников составляет в лучшем случае 50 – 500 Гц и не всегда удовлетворяет предъявляемым требованиям. Поэтому актуальной и важной является задача синтеза процедур измерения частоты несущего колебания фазоманипулированного сигнала по ограниченной выборке в условиях априорной неопределенности.

Постановка задачи и изложение материалов исследований

В качестве элементов временного ряда будем рассматривать аддитивную смесь фазоманипулированного сигнала с гауссовским шумом, который имеет нулевое математическое отклонение и заданное стандартное отклонение. При этом фазоманипулированный сигнал имеет следующий вид [6]:

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

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 ϕ_o ; $F_{дискр}$ – частота дискретизации регистрируемого временного ряда, 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.

Решение рассматриваемой задачи известными методами не приводит к требуемому качеству получаемых оценок. Поэтому в рассматриваемой работе была сделана попытка более полно учесть априорную информацию о фазоманипулированном сигнале. Известно, что при передаче одного бита данных несущее колебание содержит как минимум один период несущей. Кроме этого, количество импульсов в периоде несущего колебания определяется функциональной связью между его частотой и частотой дискретизации, т.е.

$$k = \frac{F_{дискр}}{f_{нес}}. \quad (3)$$

Современные приемные устройства фазоманипулированных сигналов имеют высококачественные кварцевые генераторы, которые с высокой стабильностью формируют $F_{дискр}$. Последнее целесообразно использовать в процессе формирования оценок несущего колебания.

Таким образом, предлагается в процессе апостериорной обработки материалов регистрации фазоманипулированного сигнала выделять полные положительные (и отрицательные) полупериоды и в процессе их обработки получать оценки частоты несущего колебания. Последующая статистическая обработка позволит уточнить эти оценки, т.е. получить их среднее значение и дисперсию.

Возникает вопрос, как определить количество импульсов в полупериоде несущего колебания. Статистическая обработка количества положительных (отрицательных) импульсов, следующих друг за другом показала, что наибольшую частоту имеет то количество, которое соответствует числу импульсов в полупериоде несущего колебания. Таким образом, количе-

ство 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.

Остановимся на процедурах оценки частоты на полупериоде сигнала. В процессе исследований установлено, что спектральные методы не дают возможности сформировать оценку требуемым качеством, т.к. требуют большего количества импульсов.

В качестве варианта решения рассматриваемой задачи оценим возможности метода, которые используются в цифровом частотомере [7]. При этом будем иметь в виду, что частота дискретизации известна.

Для пояснения метода расчета воспользуемся рис. 1. Допустим, что выделены три положительных импульса на полупериоде несущего колебания. Естественно, что слева и справа от рассматриваемой выборки будут отрицательные импульсы, один из которых x_{i-1} предшествует анализируемой выборке, а второй x_{i-5} – выделен после этой выборки.

Методика расчета длительности полупериода сигнала будет следующей. Необходимо оценить два временных интервала t_1 и t_2 (см. рис. 1). Затем из величины $(K_i + 1)/F_{диск}$, которая примерно равна половине периода сигнала, необходимо вычесть рассчитанные величины. Здесь K_i – число анализируемых на полупериоде положительных импульсов. Естественно, при этом будут иметь место ошибки, обусловленные наличием мешающего шума, которые изменяют величину импульсов, участвующих в расчетах. Кроме этого, будет влиять и используемая линейная аппроксимация между расчетными точками.

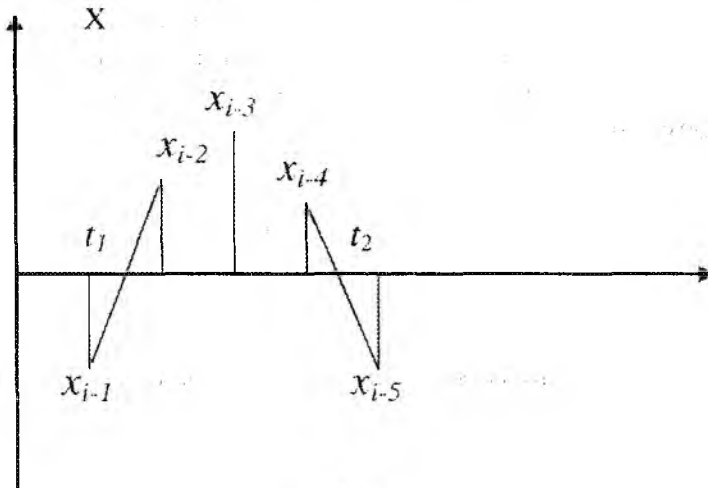


Рис. 1

Для расчета величин t_1 и t_2 используются соотношения

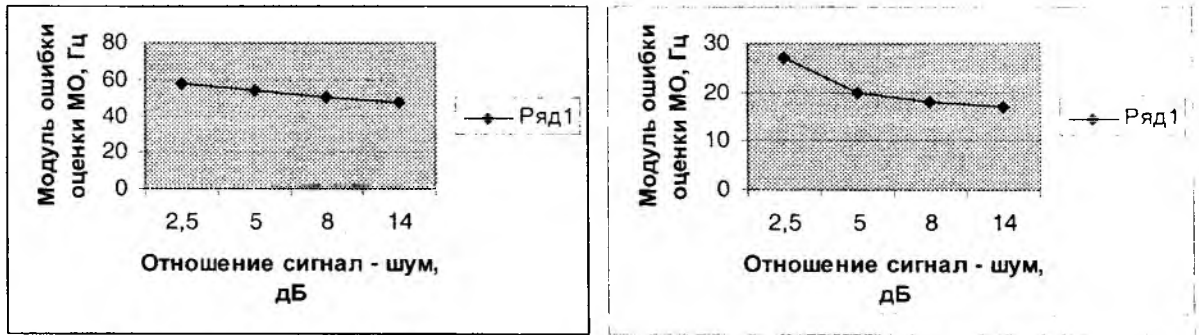
$$t_1 = \frac{Abs(x_{i-1})}{(Abs(x_{i-1}) + Abs(x_{i-2}))F_{диск}}, t_2 = \frac{Abs(x_{i-5})}{(Abs(x_{i-5}) + Abs(x_{i-4}))F_{диск}}. \quad (4)$$

Тогда оценка частоты несущего колебания может быть определена следующим образом

$$\bar{f}_{нес} = \frac{1}{2[(K_i + 1)/F_{диск} - t_1 - t_2]}. \quad (5)$$

Результаты оценки частоты несущей с помощью рассматриваемого метода приведены на рис. 2. В качестве оценки математического ожидания здесь и далее использовалось среднее арифметическое ее наблюдаемых значений. Их анализ показывает, что модуль ошибки математического ожидания слабо зависит от отношения сигнал/шум и носит почти линейный постоянный характер. Величина модуля ошибки зависит от количества анализируемых импульсов. Если их число на периоде сигнала четное (см. рис. 2, б), то величина ошибки будет меньшей и приемлемой для решения задачи определения вида фазовой модуляции.

Теперь рассмотрим возможности использования численных методов для оценки неизвестной частоты несущего колебания по ограниченной выборке с использованием *метода LS-спектра* [9].



а) PSK – 8, $f_{нес} = 1\ 600$ Гц;

б) PSK – 8, $f_{нес} = 1\ 800$ Гц;

Рис. 2

В ряде работ для оценки спектра мощности неравномерных временных рядов предложены функции, отличные от традиционной схемы оценки спектра с помощью *преобразования Фурье* или *быстрого преобразования Фурье* [9]. В основе построения этих новых оценок лежит общая идея: аппроксимация временного ряда простой гармонической функцией с весовыми коэффициентами. Рассмотрим порядок формирования этих оценок подробнее. Представим анализируемый временной ряд, включающий аддитивную сумму шума и фазо манипулированного сигнала вида (1), как $x_k = X(t_k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, который задан на произвольном множестве временных отсчетов t_k . В качестве модели этого ряда возьмем выражение

$$f(t) = \sum_{i=1}^2 a_i \varphi_i(t), \tag{6}$$

где

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

$\omega = 2\pi f_{нес}$ – угловая частота несущего колебания, a_i – весовые коэффициенты, рассчитываемые с использованием метода наименьших квадратов [9].

Невязку аппроксимации

$$\varepsilon_k = x_k - f(t_k) \tag{7}$$

минимизируем за счет подбора частоты ω . Оценка частоты несущего колебания будет минимизировать сумму квадратов невязок, т.е.

$$\|\varepsilon\|^2 = \min. \tag{8}$$

На рис. 3 представлены результаты обработки аналогичных временных рядов, по которым исследовались возможности метода на основе процедур цифрового частотомера. Эти временные ряды 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 удовлетворяющие предъявляемым требованиям; однако среднее квадратическое отклонение достаточно большое, поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность объединения оценок полученных рассмотренными выше методами.

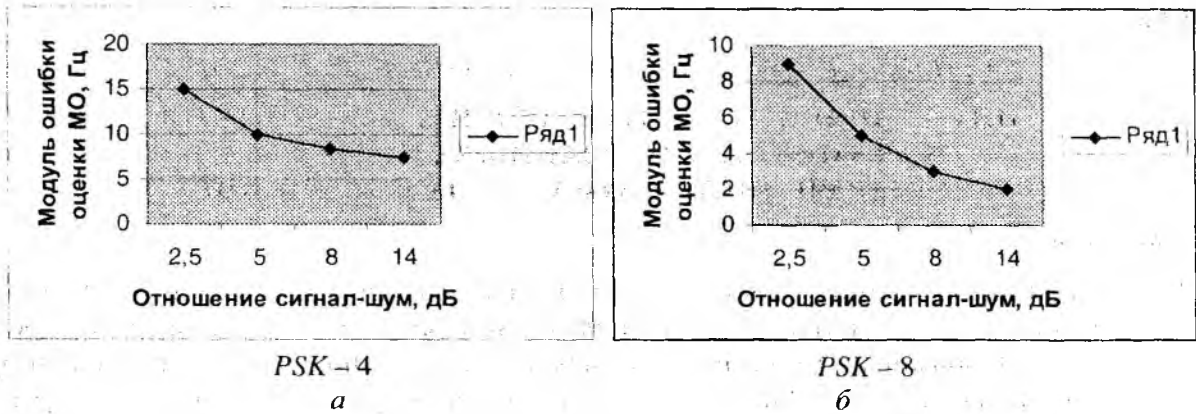


Рис. 3

Для этого в процессе обработки оцениваются не только оценки средних значений, но и их оценки среднеквадратического отклонения, т.е. \bar{f}_1, σ_1 и \bar{f}_2, σ_2 .

В дальнейшем для повышения точности результатов расчетов можно воспользоваться известными соотношениями объединения оценок, полученных с разной точностью (расчет «взвешенного среднего»), т.е.

$$\bar{f}_{\text{вс}} = (\sigma_2^2 \bar{f}_1 + \sigma_1^2 \bar{f}_2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2). \quad (9)$$

Результаты и направления дальнейших исследований

Исследованы возможности получения оценки частоты несущего колебания сигналов с многоуровневой фазовой модуляцией в условиях априорной неопределенности. Синтезированы алгоритмы оценки неизвестной частоты по ограниченной выборке с использованием процедур на основе метода цифрового частотомера и метода *LS-спектра*. Исследования выполнены по результатам модельного эксперимента, проведенного с использованием программного комплекса *Simulink* версии 4/5 системы компьютерной математики *MATLAB* версии 6/6.1/6.5. Полученные оценки свидетельствуют об эффективности разработанных процедур.

Дальнейшие исследования связаны с уменьшением стандартного отклонения для полученных оценок за счет исключения аномальных измерений.

Список литературы: 1. *Blackman R.B., Tukey J.M.* The measurement of power spectra from the point of view communications engineering, Dover, New York, 1958. 360 с. 2. *Дженкинс Г., Ватмс Д.* Спектральный анализ и его применения. Вып.1. М.: Мир, 1972. 385 с. 3. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с. 4. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 542 с. 5. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / Под ред. *М. Бассвиль и А. Банвениста*. М.: Мир, 1989. 278 с. 6. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. с.1104. 7. *Цветнов В.В., Демин В.П., Куррияном А.И.* Радиоэлектронная борьба: радио разведка и радио противодействие. М.: МАИ, 1998. 8. *Хорев А.А.* Технические средства и способы промышленного шпионажа. М.: ЗАО Концерн Дальснаб, 1997. 9. *Витязев В.В.* Анализ неравномерных временных рядов. Учеб. пособие СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2001. 68с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.10.2008