

УДК 681.51/54

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛЧМ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Д. С. Марычев, О. А. Морозов, С. Л. Хмелев

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского
Государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Получена 28 февраля 2012 г.

Аннотация. Предложен метод оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией, основанный на применении цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами, функционирующего подобно схеме фазовой автоподстройки частоты. В работе приведены рекомендации по выбору параметров фильтра и адаптивного алгоритма. Предложена схема классификации и оценки параметров ЛЧМ сигналов. Проведено исследование зависимости качества восстановления частоты ЛЧМ сигнала от величины отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, фазовая автоподстройка частоты, линейная фильтрация.

Abstract. Parameter estimation method for signals with linear frequency modulation was introduced. Basis of this method is digital filter with adaptive parameters operating like a phase locked loop (PLL). Some recommendations related to the proper choice of adaptive algorithm parameters were presented. Algorithm of estimation parameters and classification of signals with linear frequency modulation was introduced. Results of the study of frequency recovery quality depending on magnitude of signal to noise ratio (SNR) were presented.

Keywords: linear frequency modulation, phase locked loop, linear filtering.

Введение

Частотно-модулированные (ЧМ) сигналы широко применяются в различных областях техники: радиолокации, радионавигации, системах связи,

радиоизмерениях и т.п. В частности, использование таких сигналов в радиолокации позволяет достичь высокой разрешающей способности по времени и частоте. Наиболее широкое применение находят сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), а также получаемые на их основе M- и V-образные сигналы [1].

Важной задачей при обработке ЛЧМ сигналов является получение оценки изменения мгновенной частоты, иными словами, их демодуляция. Для оценки частоты сигнала часто используются следующие подходы: на основе метода максимального правдоподобия (ММП), спектрально-временное преобразование Вигнера-Вилля; методы на основе нелинейного спектрального оценивания, в частности, на основе анализа собственных значений автокорреляционной матрицы (гармоническое разложение Писаренко, ГРП) и на основе построения и анализа параметрических (например, авторегрессионной) моделей сигнала [2].

Применение представленных алгоритмов в задаче оценки частоты ЛЧМ сигналов может быть сопряжено с определенными сложностями, связанными, в частности, с зависимостью разрешающей способности по частоте от длины анализируемой выборки, необходимостью вычисления оценок автокорреляции по коротким выборкам данных, решения задачи на собственные числа и т.п.

Описание метода

В работе предлагается вычислительно простой метод оценки значений мгновенной частоты ЛЧМ сигнала, основой которого является использование схемы фазовой автоподстройки частоты [3, 4, 5] на основе цифрового фильтра с перестраиваемыми параметрами.

Данная схема (рис. 1) включает в себя комплексный цифровой фильтр, характеризующийся частотой f_c и фазой φ_c , устройство перемножения действительной и мнимой компонент его выходного сигнала, а также блок управления.

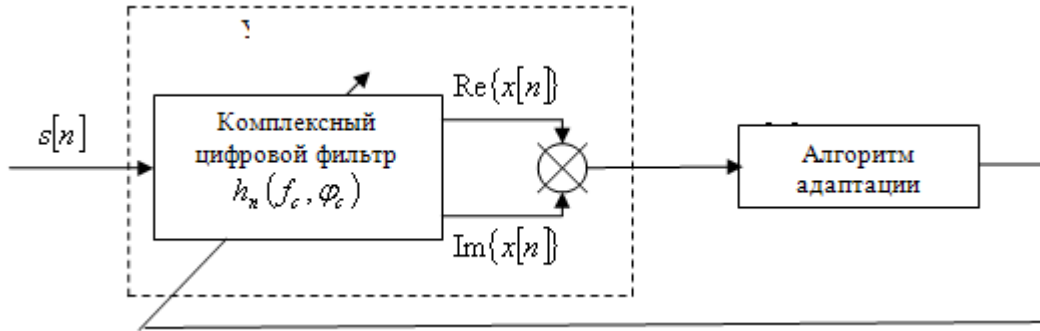


Рис.1. Схема фазовой автоподстройки частоты на основе цифрового адаптивного фильтра.

Совокупность фильтра и перемножителя представляет собой аналог классического фазового детектора с перестраиваемой дискриминационной характеристикой и в данной работе обозначается как управляемый фазовый детектор (УФД). Ошибка, характеризующая величину фазового рассогласования входного сигнала и УФД, формируется как произведение действительной и мнимой компонент выходного сигнала фильтра. Выберем фильтр с импульсной характеристикой следующего вида:

$$h_n[k] = \frac{1}{p} \exp(i2\pi f_c[n]k + i\varphi_c[n]), \quad 0 \leq k \leq p-1 \quad (1)$$

Алгоритм подстройки частоты фазы фильтра имеет вид:

$$\varphi_c[n] = \varphi_c[n-1] + 2\pi f_c[n-1] - \alpha e[n-1], \quad (2)$$

$$f_c[n] = f_c[n-1] - \beta 2\pi e[n-1], \quad (3)$$

где α и β характеризуют величину обратной связи. Для обеспечения максимальной скорости сходимости, α и β должно выполняться следующее соотношение:

$$\beta = \frac{\alpha^2}{4}.$$

Анализируемый ЛЧМ сигнал:

$$r[n] = A \cos(2\pi f_0 n + \lambda n^2 + \varphi_0),$$

где A – амплитуда, φ_0 – начальная фаза, измеряющаяся в радианах, f_0 – несущая частота, n – номер временного отсчета сигнала, λ – скорость изменения частоты, измеряющиеся в единицах частоты дискретизации f_s , рассматривается в I и Q компонентах:

$$I[n] = \frac{A}{2} \cos(\lambda n^2 + \varphi_0); \quad Q[n] = -\frac{A}{2} \sin(\lambda n^2 + \varphi_0),$$

из которых формируется комплексный входной сигнал схемы автоподстройки частоты следующим образом:

$$s[n] = I[n] - iQ[n] = \frac{A}{2} \exp(i(\lambda n^2 + \varphi_0)). \quad (4)$$

После завершения переходного процесса отсчеты частоты фильтра будут соответствовать отсчетам мгновенной частоты входного сигнала с задержкой, определяемой числом коэффициентов фильтра (рис. 2, линия 2).

Захват частоты входного сигнала в рассматриваемой схеме возможен лишь в сравнительно узкой области спектра в окрестности частоты f_c , определяемой шириной главного лепестка фильтра (1). С учетом того, что ЛЧМ сигналы, особенно радиолокационные, характеризуются шириной спектра, значительно превышающей ширину данной окрестности, необходима начальная настройка фильтра на предварительно оцененную частоту. Оценка частоты может быть произведена, в частности, по максимуму периодограммы, построенной по небольшому числу отсчетов сигнала в начале импульса. Точность оценки будет влиять исключительно на длительность переходного процесса.

В работе предложен алгоритм, позволяющий классифицировать ЛЧМ сигналы и определять такие их параметры, как девиация и скорость изменения частоты. Множество сигналов, которые могут быть классифицированы указанным алгоритмом, включает в себя сигналы без модуляции, ЛЧМ сигналы с восходящим и нисходящим изменением частоты, а также V-образные сигналы (составленные из двух ЛЧМ сигналов). Основу алгоритма составляет метод построения модели изменения мгновенной частоты сигнала. Модель состоит из

двух прямолинейных участков, пересекающихся в некоторой точке в пределах выборки.

Коэффициенты прямолинейных участков модели, а также точка их пересечения определяются путем решения задачи оптимизации:

$$\varepsilon^2(k_l, b_l, k_r, b_r, N) = \sum_{n=0}^{N-1} (f[n] - k_l n - b_l)^2 + \sum_{n=N}^{M-1} (f[n] - k_r n - b_r)^2 \rightarrow opt,$$

где n – номер временного отсчета, $f[n]$ – оценка частоты, k_l, b_l – коэффициенты модели для отсчетов $n < N$, k_r, b_r – коэффициенты модели для отсчетов $n \geq N$, N – точка пересечения участков модели, M – общее число отсчетов.

Классификация, а также определение направления изменения и девиации частоты производится путем анализа знаков и величин угловых коэффициентов линейных участков (k_l и k_r) полученной модели. Иллюстрации работы рассмотренного алгоритма представлены на рис. 2 и рис. 3.

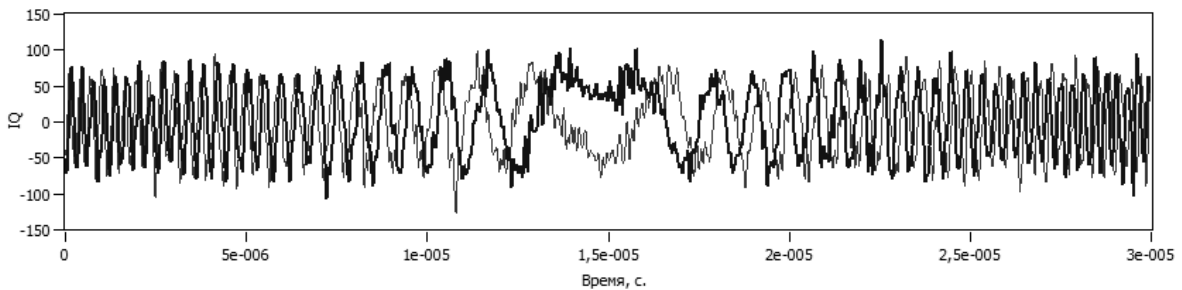


Рис. 2. IQ-компоненты ЛЧМ сигнала.

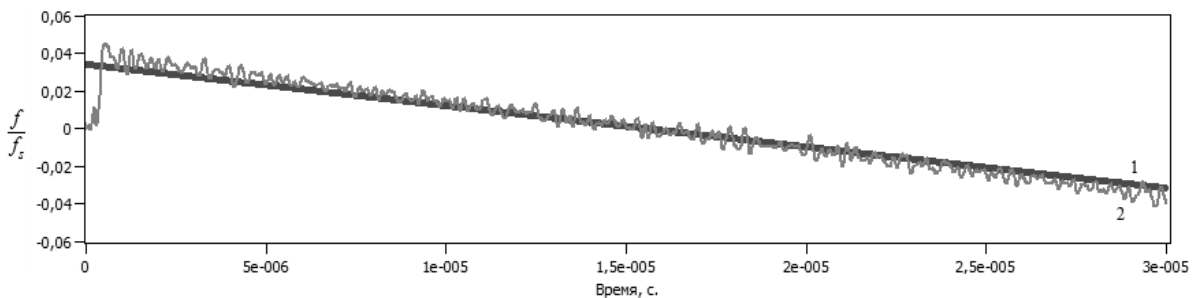


Рис. 3. Оценка мгновенной частоты ЛЧМ сигнала, представленного на рис. 2 (линия 1), Модель изменения частоты (линия 2).

Результаты численного моделирования

В работе проведено исследование влияния шума на качество восстановления мгновенной частоты ЛЧМ сигнала на примере задач классификации и оценки параметров, а именно, величины девиации частоты.

На рис. 4. представлен результат исследования зависимости вероятности ошибки классификации ЛЧМ сигнала от величины отношения сигнал/шум. На вход схемы подавался ЛЧМ сигнал в смеси с аддитивным белым шумом. Отношение сигнал/шум при этом варьировалось в пределах от +8 до -12 дБ. На основе полученных оценок мгновенной частоты производилась классификация сигнала, то есть отнесение его к одному из классов. Анализ представленной зависимости показывает, что для получения вероятности ошибки классификации ЛЧМ сигнала не хуже 10^{-3} необходимо отношение сигнал/шум в исследуемом сигнале не ниже +3 дБ.

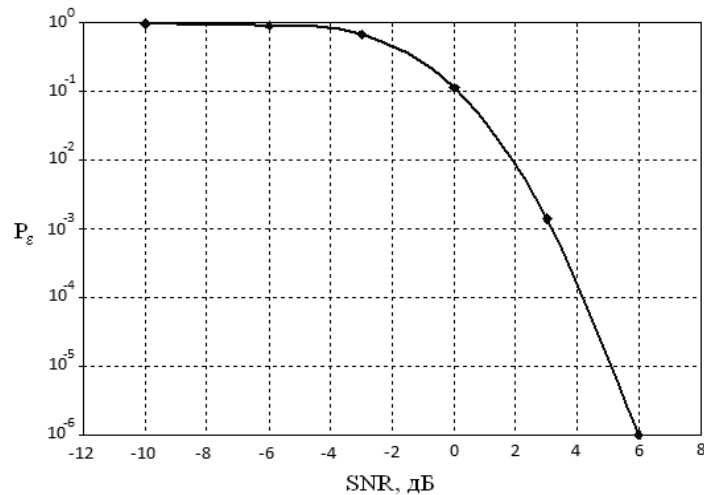


Рис. 4. Зависимость вероятности неправильной классификации ЛЧМ-импульса от величины отношения сигнал/шум.

Применительно к задаче оценки параметров ЛЧМ сигналов представляет интерес исследование точности оценки девиации частоты сигнала. В работе проведено исследование зависимости среднеквадратичного отклонения оценки девиации частоты от истинного значения от величины отношения сигнал/шум.

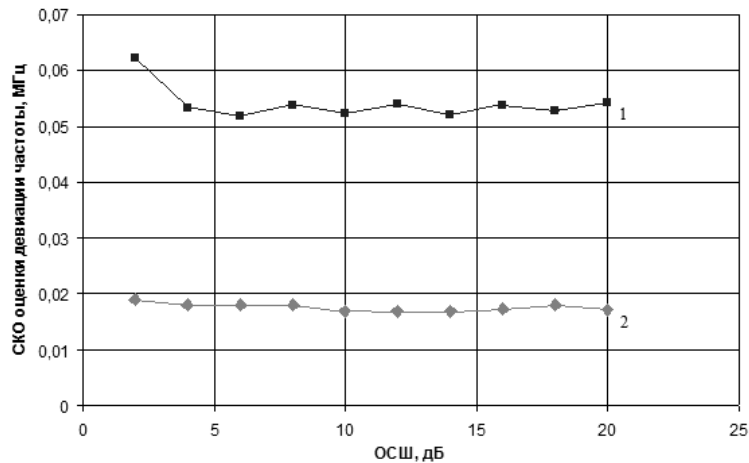


Рис. 5. Зависимость СКО оценки девиации частоты ЛЧМ сигнала от отношения сигнал/шум, произведенной с использованием БПФ в скользящем окне (линия 1) и предложенной схемы (линия 2).

Вычисление девиации производилось на основе оценок мгновенной частоты сигнала, полученных с использованием БПФ в скользящем окне (рис. 5, линия 1) и предложенного метода (рис. 5, линия 2). Анализ полученных результатов показывает, что использование предложенного метода для оценки мгновенной частоты ЛЧМ сигнала по небольшой выборке данных позволяет повысить точность измерений примерно в 3 раза.

Заключение.

В работе рассмотрена задача оценивания параметров сигналов с линейной частотной модуляцией. Предложен метод оценки мгновенной частоты сигнала на основе цифровой адаптивной фильтрации, а также алгоритм оценки параметров и классификации сигналов. Приведены рекомендации по выбору параметров фильтра и адаптивного алгоритма. Результаты проведенных исследований позволили выявить предельные значения отношения сигнал/шум, при которых возможно получение устойчивых результатов, а также показали, что предложенный подход к оценке мгновенной частоты в условиях наличия коротких выборок данных позволяет добиться ощутимого повышения точности оценки параметров сигналов по сравнению с классическими методами.

Литература

1. *Кочемасов. Н. Ф., Белов Л. А., Оконешников В. С.* Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: «Радио и связь», 1983. – 192 с.
2. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 551 с.
3. *Акимов В.Н., Белюстина Л.Н., Белых В.Н. и др.* Системы фазовой синхронизации. – М.: Радио связь, 1982. – 288 с.
4. *W.A. Sethares, J.M. Walsh, C.R. Johnson Jr.* AN ADAPTIVE VIEW OF SYNCHRONIZATION // *Circuits and Systems*, 2002. MWSCAS-2002. The 2002 45th Midwest Symposium on. 2002. Vol.2. pp. 521-524.
5. *Hagemann Eric The Costas Loop.* – <http://i.cmpnet.com/dsp/dspsourced/DSP010628F1.pdf>
6. *Сизых В.В., Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А. и др.* Синхронизация и радиосвязи и радионавигации: Учебное пособие – М.: Горячая Линия-Телеком, 2011.