УДК 621.372.542

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

О. В. ПОНОМАРЕВА, А. В. ПОНОМАРЕВ, В. А. ПОНОМАРЕВ
ФГБОУ ВПО «ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М. Т. Калашникова»
Ижевск, Россия

В различных областях научных исследований часто приходится сталкиваться с цифровой обработкой случайных сигналов, содержащих «скрытые» гармонические (тональные) компоненты (решение так называемой задачи выявления скрытых периодичностей [1, 2]). Например, в пассивной гидролокации анализ таких сигналов осуществляется при решении задачи обнаружения и классификации как надводных, так и подводных судов [3].

Целью настоящей работы является разработка метода и алгоритма, обеспечивающих:

– высокую разрешающую способность цифровой обработки;

– устойчивость выбранной дискретной системы фильтрации;

– минимум времени цифровой обработки и объема необходимой памяти для ее осуществления.

Одним из эффективных алгоритмов получения фиксированного числа бинов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) является фильтр Герцеля. Данный алгоритм, широко применяемый при декодировании DTMF сигналов (DTMF - Dual Tone Multi Frequency), позволяет эффективно вычислить значение k-го бина N-точечного ДПФ [2, 4]:

$$S_N(k)=\sum_{n=0}^{(N-1)}x(n)\cdot W_N^{kn}\ ,\ W_N^{k\ n}=\exp(-j\frac{2\pi}{N}kn)\ . \qquad (1)$$

Фильтр Герцеля [4], используется нестандартно, не как обычный фильтр, в котором запоминаются все выходные отсчеты. В алгоритме Герцеля обработка проводится блоками в N отсчетов при этом вычисляется и запоминается только каждое N значение выходного отсчета. Заметим, что именно отказ от получения всех промежуточных выходных отсчетов обеспечивает алгоритму Герцеля возможность экономии в числе вычислений по сравнению с определением k-го коэффициента ДПФ $S_N(k)$ «в лоб», согласно соотношению (1).

При комплекснозначном входном сигнале алгоритм Герцеля позволяет примерно вдвое сократить число операций по сравнению с алгоритмом ДПФ. Для действительнозначного входного сигнала как алгоритм ДПФ. так и алгоритм Герцеля позволяют получить дополнительную экономию в вычислениях по сравнению с комплекснозначным входном сигналом [5, 6].

Существенный недостаток алгоритма Герцеля заключается в том, что фильтр находится на грани устойчивости, так как его полюс расположен на единичной окружности z-плоскости. Если за счет округления коэффициентов фильтра полюс выйдет за пределы единичной окружности, то фильтр Герцеля теряет устойчивость. Известный метод борьбы с указанным недостатком – обработка сигналов блоками длительностью в N отсчетов и обнуление внутренних регистров вначале обработки каждого нового блока данных [4]. Таким образом, устойчивость алгоритма Герцеля обеспечивается ***сокращением обрабатываемой длительности входного сигнала до N отсчетов*** (при этом как отмечено в [4] N может измеряться сотнями).

Допустим необходимо вычислить коэффициенты ДПФ от последовательности $x(n)$, длительностью в $n = \overline{0, s \cdot N - 1}$ отсчетов. Согласно (1), значение $(k \cdot s)$-го бина ДПФ при длительности сигнала $(N \cdot s - 1)$ отсчетов равно:

$$S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{n=0}^{(s \cdot N-1)} x(n) W_{N \cdot s}^{k \cdot s \cdot n}, \qquad k = \overline{0, (N \cdot s - 1)},\ s = 1,2,\ldots,\ W_N^{k\,n} = \exp(-j\frac{2\pi}{N}kn). \tag{2}$$

Так как дискретные экспоненциальные функции (ДЭФ) $def(k,n) = W_N^{k\,n}$ обладают свойством периодичности : $def(k, n \pm rN) = def(k,n),\ r = 0,1,2,\ldots$, то сумму (2) можно представить в виде s сумм:

$$S_{s \cdot N}(s \cdot k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) W_N^{kn} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n+N) W_N^{kn} + \ldots + \sum_{n=0}^{N-1} x(n + (s-1) \cdot N) W_N^{kn}. \tag{3}$$

Следовательно, возможна своеобразная процедура блочной обработки отсчетов входного сигнала, которую авторы назвали ***цифровой блочной обработкой с накоплением (ЦБОН).*** Поясним пошагово процедуру ЦБОН.

1. Разбиваем исходный сигнал на s блоков по N отсчетов в каждом.
2. Блок 1 $\Rightarrow$ [$x(0),\ldots x(N-1)$],…Блок $s \Rightarrow$ [$x((s-1)N),\ldots x(s \cdot N - 1))$].
3. Вычисляем k-е коэффициенты ДПФ каждого блока согласно (1):

$$S_{N,1}(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) \cdot W_N^{kn}, \ldots, S_{N,s}(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n + (s-1) \cdot N) \cdot W_N^{kn}.$$

4. Суммируем полученные значения k-х коэффициентов ДПФ: $S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{i=1}^{s} S_{N,i}(k)$.

Опираясь на полученные результаты, можно выполнить ***обобщение алгоритма Герцеля*** для целых значений переменной k (переменная k «отвечает» в фильтре Герцеля за частоту) введя процедуру ЦБОН. Обобщенный алгоритм Герцеля можно реализовать в виде БИХ-фильтра, структура которого приведена на рис. 1.

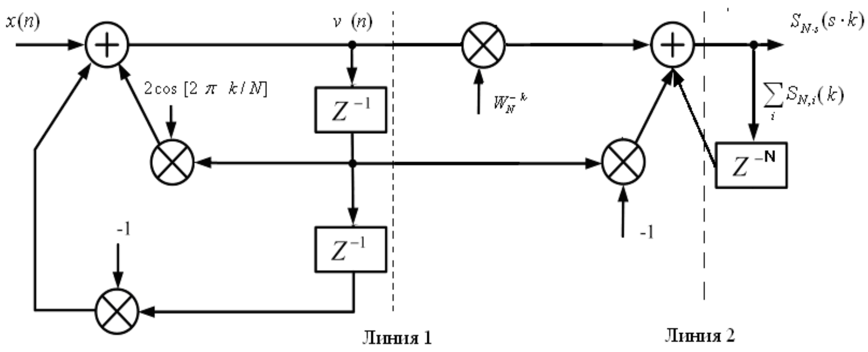

Рис. 1. Структура БИХ-фильтра, реализующего обобщенный алгоритм Герцеля

Последовательность выполнения операций в обобщенном алгоритме Герцеля и их число при длительности блока N отсчетов, числе блоков s следующая: операции слева от пунктирной линии 1 выполняются N раз для каждого блока; операции между линиями 1 и 2 выполняются один раз после обработки каждого блока; операции справа от пунктирной линии 2 выполняются s раз по числу блоков.

Введенная авторами процедура ЦБОН позволяет стандартным фильтром Герцеля, обрабатывающим блоки по N отсчетов, вычислять значение ks-го бина Ns-точечного ДПФ. При этом обеспечивается:

– высокая разрешающая способность цифровой спектральной обработки за счет увеличения длительности обрабатываемого входного сигнала до Ns отсчетов;

– устойчивость работы фильтра за счет выполнения «обнуление» всех внутренних регистров памяти в начале обработки каждого блока в N отсчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебренников, М. Г.** Выявление скрытых периодичностей / М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1965. – 244 с.

2. **Оппенгейм, Э.** Применение цифровой обработки сигналов / Э. Оппенгейм. – М. : Мир, 1980. – 552 с.

3. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2007. – Т. 7. – 829 с.

4. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.

5. **Пономарев, В. А.** Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2–6.

6. **Пономарева, О. В.** Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей / О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.