

М. А. Ураксеев, В. Ю. Чернышев, А. С. Чепайкин, С. В. Жернаков,
Р. А. Мунасыпов, И. Т. Губайдуллин, Т. П. Андреева

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ПОМЕХАМИ

Описывается методика цифровой обработки сигнала, которая может быть применена для борьбы с помехами в периодическом сигнале произвольной формы. *Быстрое преобразование Фурье; периодический сигнал; помехи; цифровой фильтр; спектр сигнала*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, которую необходимо решать при обработке цифровых сигналов является фильтрация помех. Эта задача трудно-разрешима, когда частотный спектр помех близок или совпадает со спектром частот полезного сигнала [1,2]. Использование цифровых фильтров в таком случае приводит к искажению полезной составляющей сигнала, что может быть нежелательно. Для цифрового периодического сигнала произвольной формы с широкополосными помехами данная проблема может быть разрешена с помощью методики, описанной далее.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Рассмотрим цифровой периодический сигнал произвольной формы с периодом T_1 и, соответственно, частотой $f_1 = 1 / T_1$ (рис. 1). Этот сигнал вызван процессом, характеристики которого медленно меняются во времени, то есть в течение нескольких периодов форму сигнала и частоту можно считать постоянными. Несущая частота этого сигнала (основная гармоника) $f_2 = 1 / T_2$ связана с частотой f_1 таким образом, что $f_2 / f_1 = k$, где k – известное число. Частота дискретизации сигнала f_d больше частоты Найквиста для данного сигнала. Периоду T_1 , таким образом, соответствует число отсчетов $N = f_d / f_1$.

В сигнале присутствуют следующие помехи: высокочастотные с амплитудой меньшей, чем амплитуда несущей гармоники f_2 сигнала,

показанные на рис. 2, и широкополосные помехи, различной продолжительности, частотный спектр которых перекрывает спектр полезного сигнала.

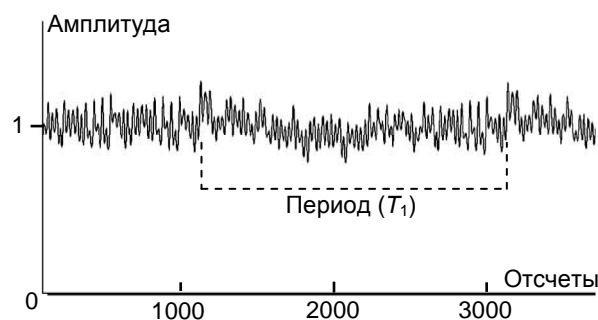


Рис. 1. Периодический сигнал произвольной формы (для данного сигнала частота дискретизации равна 400 кГц, $f_1 \approx 13,5$ кГц, число уровней квантования – 2^{13} , амплитуда сигнала здесь и далее для простоты восприятия указана в относительных единицах)

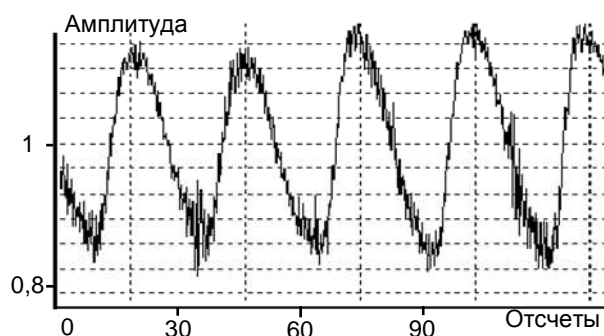


Рис. 2. Сигнал с высокочастотными помехами (частота помехи более 50 кГц)

Контактная информация: (347) 273-77-89

Исследования по данной тематике, проводимые авторами статьи, стали возможными благодаря финансовой поддержке в рамках грантов РФФИ № 11-08-00871_а, № 10-08-00359_а и гранта по программе УМНИК № 7099р/9646.

Высокочастотные помехи устраняются с помощью цифрового фильтра Баттерворта 8-го порядка (рис. 3, 4). При этом полезная составляющая сигнала не изменяется [3, 5].

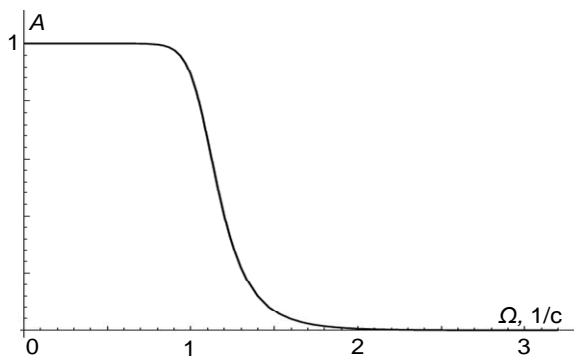


Рис. 3. График АЧХ цифрового фильтра, где А – амплитуда, Ω – нормированная частота цифрового фильтра

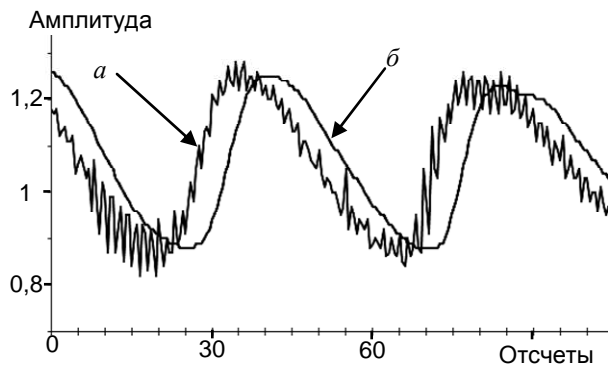


Рис. 4. Сигнал: а – исходный; б – обработанный фильтром Баттерворта

Широкополосные помехи с помощью цифровых фильтров устранить без искажения формы полезного сигнала невозможно [4], что может быть проиллюстрировано следующим образом.

На рис. 5, а показан участок сигнала без помех (полезный сигнал), на рис. 5, б его частотное представление, полученное с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) по массиву отсчетов размером 2^{15} . Для сравнения на рис. 6, а представлен участок сигнала с помехами, частота которых близка к несущей частоте сигнала f_2 , превышающими по амплитуде полезную составляющую сигнала. На частотном представлении сигнала (рис. 6, б) видно, что нельзя точно определить максимум, соответствующий несущей частоте, так как спектр искажен гармониками, порожденными помехой.

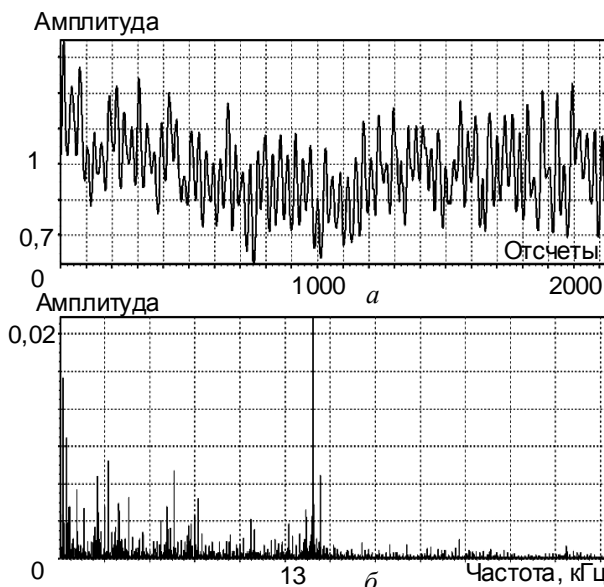


Рис. 5. Сигнал без помех: а – во временной области; б – в частотной области (результат БПФ)

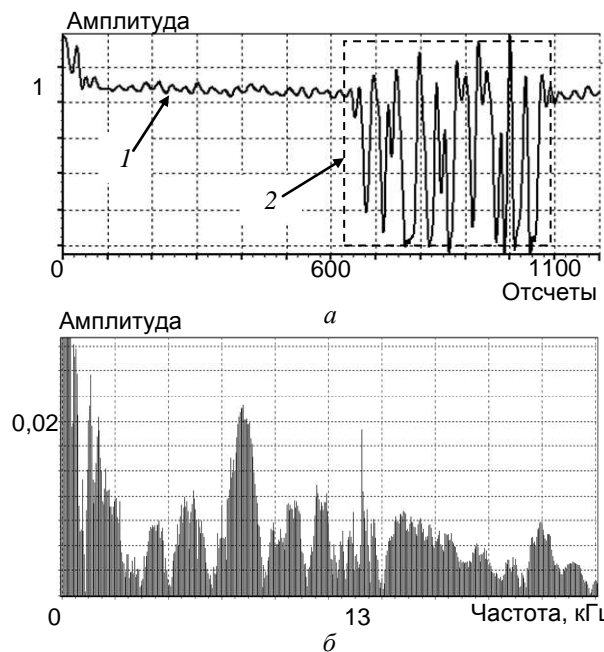


Рис. 6. Сигнал с помехой: а – во временной области, 1 – полезный сигнал, 2 – помеха; б – в частотной области (результат БПФ)

Так как процесс медленно меняющийся, то эти помехи можно устранять путем сопоставления периодов сигнала T_1 , полученных один за другим, с помощью алгоритма, описанного далее. Для этого необходимо точно вычислять значение N , чтобы можно было совмещать эти периоды без сдвигов по фазе.

В спектре гармоник на выходе БПФ находят гармонику с максимальной амплитудой,

исключая нулевую. Частота этой гармоники соответствует несущей частоте f_2 .

Частота $f_1 = 1 / T_1$, где T_1 – период сигнала может быть получена следующим образом:

$$f_1 = \frac{f_2}{k} = \frac{f_d \cdot n_g}{k \cdot n_{fur}}, \quad (1)$$

где n_g – номер гармоники с максимальной амплитудой, f_d – частота дискретизации, $n_{fur} = 2^{15}$ – число точек БПФ, k – известное число.

Далее находят число отсчетов N , с учетом (1):

$$N = \frac{f_d}{f_1} = \frac{f_d}{\frac{f_d \cdot n_g}{k \cdot n_{fur}}} = \frac{k \cdot n_{fur}}{n_g}. \quad (2)$$

Далее несколько последовательных периодов $T_1(n)$, $T_1(n + 1)$ и т. д. сопоставляются друг с другом и выбираются отсчеты, соответствующие сигналу без помех. Для этого применяется следующий алгоритм.

При возникновении помехи модуль производной амплитуды сигнала с помехой $\left| \frac{dU}{dt} \right|$ значительно больше того же модуля производной сигнала без помехи. Критерием выявления помехи служит результат сравнения со значением максимально допустимого модуля производной сигнала $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$ за несколько периодов T_1 .

При сравнении соответствующих отсчетов этих периодов выбираются отсчеты с минимальной амплитудой, для которых выполняется $\left| \frac{dU}{dt} \right| \leq \max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$. Значение максимально допустимого модуля производной находят с помощью нейронной сети [6], осуществляющей кластерный анализ сигнала, что для наглядности может быть показано на самоорганизующихся картах Кохонена.

Исходные данные для кластерного анализа представляют собой массив отсчетов цифрового сигнала размером два периода T_1 или более. Из массива исходных данных выделяют участок сигнала, содержащий два периода T_1 . Оба выделенных периода разделяются на k равных частей, где $k = T_1 / T_2$, таким образом получают $2k$ участков сигнала, которые можно рассматривать как кластеризируемые объекты. Для каждого объекта находят параметры, описанные в табл. 1. В результате получают обучающую выборку (см. табл. 2), которая может быть подвергнута анализу с помощью карт Кохонена,

например, в программном пакете Deductor, Somap Analyzer.

Таблица 1

Параметры кластерного анализа	
Параметр	Описание
Smax	Максимальное значение сигнала на участке
Smin	Минимальное значение сигнала на участке
Smed	Среднее значение сигнала на участке
S'max	Максимальный модуль производной на участке

Таблица 2

Пример фрагмента данных обучающей выборки, строки которой соответствуют кластеризуемым объектам

	A	B	C	D
1	Smax	Smin	Smed	S'max
2	2469	1975	2173	45
3	2389	1881	2095	58
4	2222	1937	2042	51
5	2154	1748	1941	49
6	2253	1683	1924	57
7	2326	1954	2126	47
8	2269	1835	2016	58
9	2292	1871	2069	55
10	2265	1910	2065	49
11	2323	1841	2025	46
12	2302	1873	2037	50
13	2248	1929	2072	42
14	2236	1738	1939	52
15	2248	1725	1927	53
16	2238	1915	2021	46
17	2135	1847	1960	32
18	2128	1782	1934	39
19	2209	1824	1959	47

По обучающей выборке строятся карты, с количеством кластеров равным 2. Карты, построенные по обучающей выборке, показаны на рис. 7.

На рис. 7 представлены 6 самоорганизующихся карт Кохонена, на которых объекты обучающей выборки разбиты на 2 кластера, граница между кластерами обозначена толстой черной линией в левом нижнем углу каждой карты. Первый кластер на всех картах содержит большую часть объектов, второй кластер – меньшую.

Кластеры резко отличаются по величине параметров. Первый кластер – ячейки со светлым фоном (помеченные кружками), в него попали участки сигнала, которые не были искажены помехами.

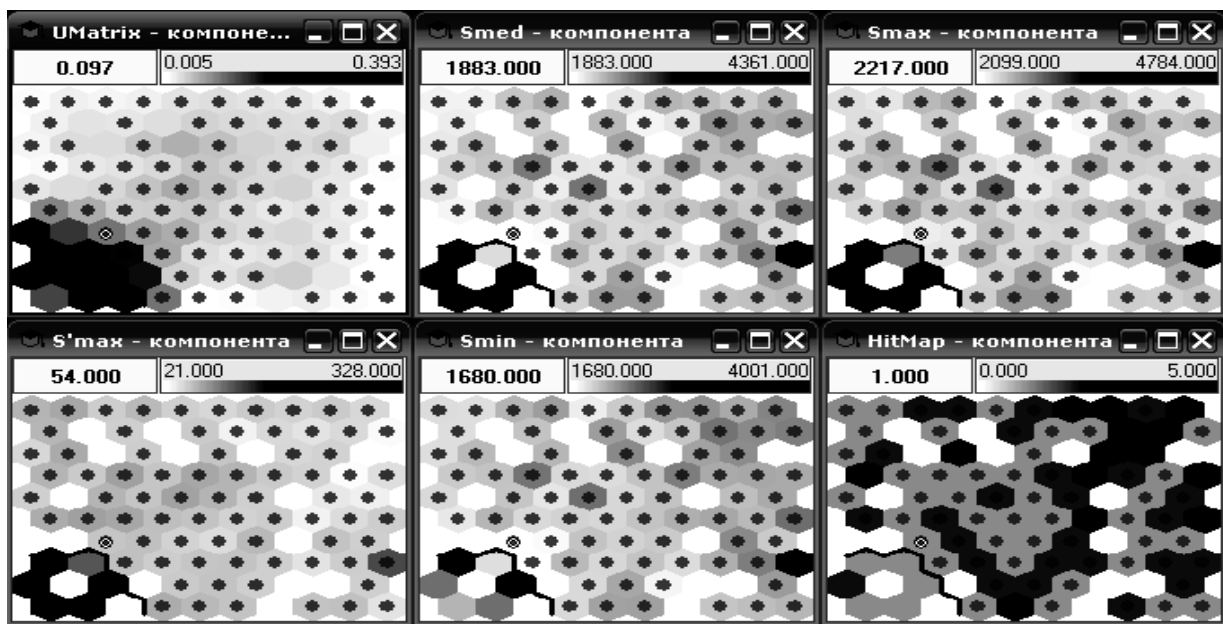


Рис. 7. Самоорганизующиеся карты Кохонена, построенные по параметрам кластеризации унифицированной матрицы расстояний (UMatrix) и числу попаданий (HitMap) по левой нижней карте выбирают ячейку со значением $S'max$ равным 54

Второй кластер – ячейки с темным фоном, сюда попали объекты, которые соответствуют участкам сигнала, искаженным помехами. На границе между кластерами в кластере 1 выбирается объект с минимальным значением $S'max$.

Это значение соответствует $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$.

Таким образом, получают N отсчетов обработанного сигнала, соответствующих периоду $T_1(n)$. Затем процедура повторяется для получения следующих N отсчетов периода $T_1(n + 1)$. Результат обработки по описанному алгоритму представлен на рис. 8.

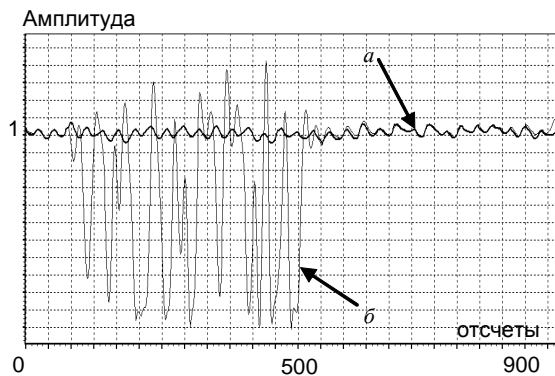


Рис. 8. Результат обработки сигнала: a – обработанный полезный сигнал, b – сигнал с помехой

Видим, что участок сигнала, искаженный помехой, полностью замещен отсчетами, соответствующими полезному сигналу.

ВЫВОДЫ

Таким образом, обработка сигнала, позволяющая бороться с данными помехами, производится в несколько этапов:

- вычисление БПФ – число точек M быстрого преобразования Фурье определяет размер обрабатываемого массива отсчетов – для одной итерации процесса обработки необходимо не менее $2N$ отсчетов (два периода T_1);
- вычисление границ высокочастотной помехи в спектре БПФ;
- поиск по результатам БПФ несущей частоты f_2 (соответствующего ей номера гармоники в спектре БПФ) и расчет числа отсчетов N по формуле (2);
- применение высокочастотного цифрового фильтра Баттерворта 8 порядка;
- выделение в массиве отсчетов n отдельных оборотов, где n равно целой части от M/N ;
- загрузка обучающей выборки объектов для кластерного анализа, для этого два последовательных оборота разделяются на участки по числу k , для каждого объекта вычисляются параметры, по которым будет идти кластеризация;

- кластерный анализ полученной обучающей выборки с целью получения значения максимально допустимого модуля производной;

- применение метода замены отсчетов по нескольким (в нашем примере двум) оборотам с учетом максимально допустимого модуля производной $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$, полученного с помощью кластерного анализа сигнала.

Разработанная методика обработки цифрового сигнала может быть применена в решении различных прикладных задач для борьбы с широкополосными помехами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная технология интеграции интеллектуального пирометрического модуля в систему управления, контроля и диагностики (fadec) ГТД / Е. В. Распопов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. № 38.

2. **Чепайкин А. С., Чернышев В. Ю.** Создание аппаратно-программного комплекса для измерения температуры лопаток ротора ГТД // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. 4-й всероссийск. зимн. шк.-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа, 2009. С. 554–558.

3. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. Питер, 2002. 608 с.

4. **Айфичер Э. С., Джервис Б. У.** Цифровая обработка сигналов: практический подход. Вильямс, 2004. 992 с.

5. **Богнер Р., Константи́нидис А.** Введение в цифровую фильтрацию. Питер, 2008. 512 с.

6. **Смит С. В.** Научно-техническое руководство по цифровой обработке сигналов. Автекс, 2001. 607 с.

ОБ АВТОРАХ

Ураксеев Марат Абдулович, проф. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж.-мех. (Ташкентск. политехн. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устройствам вычисл. техн. и систем упр.-я. Иссл. в обл. волоконно-оптич. датчиков для техн. процессов и производств.

Мунасыпов Рустэм Анварович, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инженер электрон. техн. (УАИ, 1982). Д-р техн. наук по сист. анализу, управл. и обр. информации (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. интеллект. и адаптивн. систем управления сложн. динамич. объектами.

Жернаков Сергей Владимирович, зав. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

Андреева Татьяна Петровна, нач. сектора ФГУП УНПП «Молния». Дипл. инж.-физик по электронике твердого тела. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. оптико-электронных систем измерения и управления.

Губайдуллин Ирек Тимерьянович, вед. инж.-конструктор, ФГУП УНПП «Молния». Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Иссл. в обл. оптико-электронных систем измерения и управления.

Чернышев Владимир Юрьевич, асп. каф. инф.-изм. техники. Дипл. магистр по направлению инф.-изм. техника и технологии (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. систем оптической пирометрии

Чепайкин Александр Сергеевич, асп. каф. техн. кибернетики. Дипл. магистр по направлению автоматизация и управление (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. цифровой обработки сигналов.