

УДК 621.391

*Ю.М. Кориунов*

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННО СОЗДАННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИГНАЛА И ПОМЕХИ

*Предложен метод проверки эффективности процедуры фильтрации искаженного помехой сигнала и выбора наиболее эффективного фильтра, основанный на построении имитационной модели реального сигнала.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, сигнал, помеха, фильтрация, фильтры с конечной памятью, период квантования, интервал дискретизации, скользящее окно, медианный фильтр, аддитивная помеха, мультипликативная помеха.

**Введение.** Задачи *управления, получения информации* о природных явлениях и *взаимном обмене информацией* занимают общественное мышление с древнейших времен до наших дней. Возникающие при этом проблемы на ранних стадиях развития общества решались на основе личного опыта и интуиции и, конечно, не всегда удачно. Само развитие общества приводило к появлению все новых и новых проблем, делая все более актуальным нахождение новых методов их решения. Первая промышленная революция в VII – VIII столетиях и бурное развитие физики и других наук, в том числе математики в XIX – XX столетиях вселили надежду на успешное разрешение возникающих проблем. Этому в значительной степени способствовали появление и бурное развитие вычислительной техники с огромным объемом оперативной памяти и колоссальным быстродействием выпускаемых промышленностью компьютеров.

Появилась новая терминология. Объект управления стали называть просто *объектом*, на *процессы* в котором можно воздействовать и изменять характер его работы в нужном нам направлении. Этому, однако, мешает множество сопутствовавших работе объекта посторонних факторов, которые нарушают нормальное функционирование объекта. Их называют *шумами, помехами, возмущениями*. Для того чтобы объект мог нормально функционировать, необходимо устранить воздействие помех на сигнал, не затронув функционирования самого объекта. Этим, начиная с середины XX столетия и до наших дней, занимается область науки, называемая *фильтрацией*. Процесс удаления помехи из смеси сигнала и помехи осуществляется *фильтрами*.

**Постановка задачи.** Мы не будем вдаваться в детали работы различных фильтров, которых к настоящему времени разработано огромное количество для обработки одномерных  $f(x)$  и двумерных  $f(x, y)$  сигналов, искаженных помехой. С описанием многих видов фильтров можно познакомиться по работам, приведенным в библиографическом списке, а также по многочисленным статьям в центральной печати и в журнале «Вестник РГРТУ».

На кафедре АИТУ реализованы многие алгоритмы фильтрации, привязанные к задачам обработки изображений [2]. В дальнейших примерах будут использованы описанные в [1] цифровые сглаживающие фильтры с конечной памятью, разработанные и опробованные для фильтрации одномерных сигналов. Укажем обозначения параметров в приводимых примерах.

$n_0, n$  - начальный и конечный такты сигнала;

$x = \overline{n_0, n}$  - текущий такт сигнала;

$u(x)$  - значение исходного сигнала на такте  $x$ ;

$z(x)$  - значение искаженного помехой сигнала на такте  $x$ ,

$uc(x)$  - результат обработки сигнала  $z$  фильтром.

Рассматривается также два вида помехи, искажающей сигнал:

$sf = 1$  - аддитивная помеха,

$sf = 2$  - мультипликативная помеха.

Через  $sgf$  обозначено среднеквадратическое отклонение помехи.

В этих обозначениях искаженный помехой сигнал запишется в виде:

если  $sf = 1$ , то  $z = u + sgf * randn(1, n)$ ;

если  $sf = 2$ , то  $z = u * (1 + sgf * randn(1, n))$ .

Особенность фильтра с конечной памятью состоит в том, что весь диапазон наблюдения от  $n_0$  до  $n$  разбивается на интервалы длительностью  $L$ , названные периодами квантования. На каждом периоде квантования отфильтрованный сигнал  $uc$  представляется полиномом одной и той же степени  $r$ , параметры которого находятся по **методу наименьших квадратов** и результат фильтрации выдается на конечном такте каждого периода квантования. Для получения значения  $uc$  в промежуточных точках используется метод **скользящего окна с интервалом дискретизации  $dck$** . Также на основе фильтра с конечной памятью реализован **медианный фильтр** [3], определяющий выборочное среднее на интервале  $L$ , смещенное относительно конца интервала на  $-(L+1)/2$  тактов. Параметры  $L$  и  $r$  можно изменять, подбирая наиболее эффективный способ фильтрации.

Основная трудность при решении задачи фильтрации состоит в невозможности в наблюдаемом сигнале  $z$  отделить друг от друга исходный сигнал  $u$  и помеху. При этом всегда нужно помнить, что любой фильтр не только не может полностью устранить помеху, но искажает и сам сигнал. Поэтому оценка качества используемого фильтра сводится к нахождению двух видов ошибок в сигнале  $uc$ , называемых **динамической** ошибкой, отражающей искажение фильтром исходного сигнала  $u$ , и **случайной** ошибкой, отражающей неполное устранение помехи.

Для оценки качества результата фильтрации  $uc$  обычно трактуют разность  $\varepsilon = z - uc$  как оценку помехи, находя для нее оценки математического ожидания  $\mu_\varepsilon$  и дисперсии  $s_\varepsilon^2$ . На основании этих оценок находятся коэффициенты вариации, вычисляется отношение сигнал/шум и строятся различные критерии проверки качества оценки  $uc$ . Однако считать  $\varepsilon$  оценкой помехи можно лишь условно, как некоторую гипотезу, которая требует проверки. С методами такой проверки можно познакомиться по имеющимся публикациям. Однако всегда остаются сомнения в достоверности полученных результатов.

В настоящей работе предлагается для проверки эффективности используемого метода фильтрации построить имитационную модель, вырабатывающую сигнал  $u$ , отражающий свойства реально существующего сигнала. При этом предполагается, что при современном уровне развития науки и знания закономерностей, изучаемых в механике, электротехнике, теплотехнике, гидравлике и других дисциплинах, квалифицированному специалисту вполне доступно

разобраться в конструкции и функционировании устройства, вырабатывающего интересующий нас сигнал  $u$ , и дать математическое описание процесса  $f_n(x)$ , вырабатывающего этот сигнал. Это и будет модель исходного сигнала. Зная условия, в которых работает исследуемое устройство, можно составить представление и о характере помех, искажающих сигнал  $u$ .

В этом случае нам не нужно строить и проверять гипотезы о близости отфильтрованного сигнала  $uc$  к сигналу  $u$ . Достаточно вычислить разностный сигнал  $\varepsilon = u - uc$ . Поскольку считается, что в отфильтрованном сигнале  $uc$  математическое ожидание для помехи равно нулю, то значение  $\mu_\varepsilon$ , полученное по ограниченному участку сигнала длительностью  $L$ , будет характеризовать динамическую ошибку, а величина  $s_\varepsilon^2$  - дисперсию случайной ошибки.

**Проверка эффективности работы фильтра.** Приводимые примеры иллюстрируют использование предлагаемого метода на простейших искусственно созданных примерах с использованием цифрового фильтра с конечной памятью методом скользящего окна и с использованием медианного фильтра.

Рисунки 1 – 5 иллюстрируют эффективность различных методов устранения помехи для **одномерного** сигнала при различных видах помехи и различных способах фильтрации.

На рисунке 1 приведены исходный сигнал  $u$  для  $n_0 = 1$  и  $n = 120$  и тот же сигнал  $z$ , искаженный аддитивной помехой с параметром  $sgf = 0.25$ .

На рисунке 2 к сигналам  $u$  и  $z$  добавлен результат обработки  $uc$  сигнала  $z$  фильтром с конечной памятью с параметрами  $L = 30, r = 3$  и с использованием скользящего окна с параметром  $dck = 3$ . На рисунке хорошо видно значительное отличие сигнала  $uc$  от исходного сигнала  $u$ , что позволяет сделать вывод о невысоком качестве использованного фильтра.

На рисунке 3 показана обработка сигнала  $z$  медианным фильтром с параметрами  $L = 13, dck = 3$ . Сравнение сигналов  $u$  и  $uc$  показывает, что случайная ошибка практически отсутствует, но имеется небольшая динамическая ошибка. Качество фильтрации хорошее.

На рисунках 4 и 5 те же самые операции проделаны для случая искажения сигнала  $u$  мультипликативной помехой с  $sgf = 0.05$ . Опять наилучшие результаты дал медианный фильтр, однако хуже, чем в предыдущем случае. Возможно, следует опробовать другие методы фильтрации.

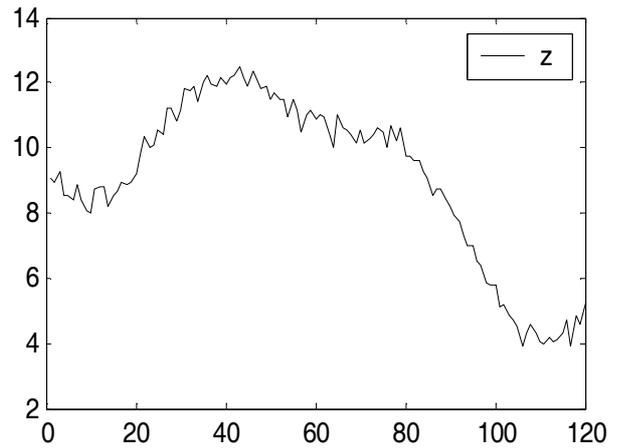
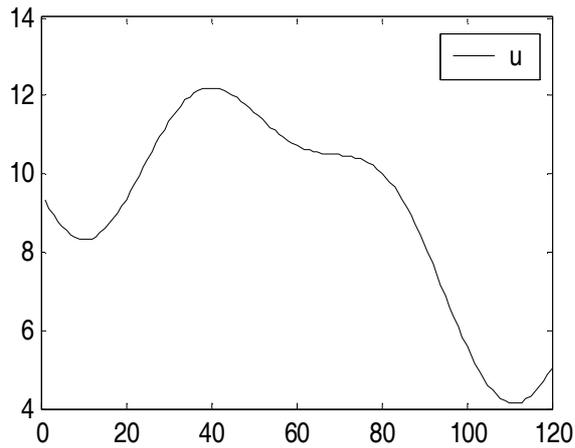


Рисунок 1 -  $u$  – исходный сигнал,  $z$  – сигнал  $u$ , искаженный помехой,  $n_0=1$ ,  $n=120$ ,  $st=1$  – аддитивная помеха,  $sgf=0.25$

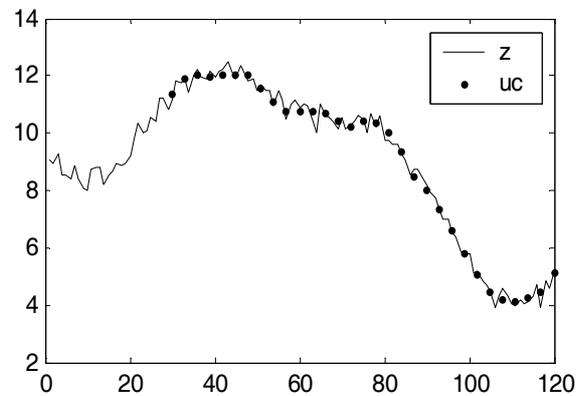
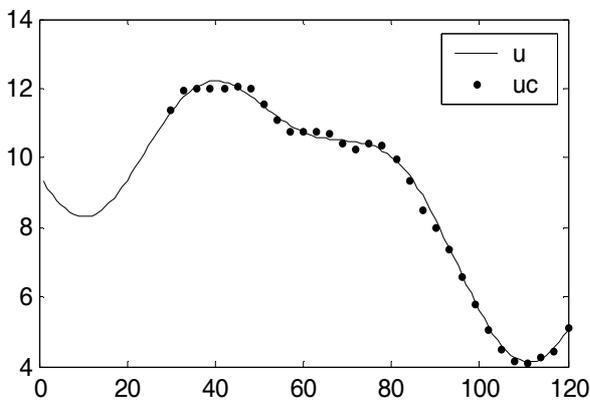


Рисунок 2 - Цифровой сглаживающий фильтр с конечной памятью  $L=30$ ,  $r=3$ , скользящее окно,  $dsk=3$ ,  $uc$  – обработанный фильтром сигнал  $z$

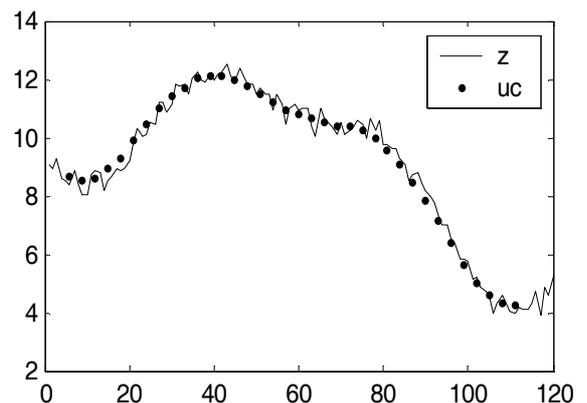
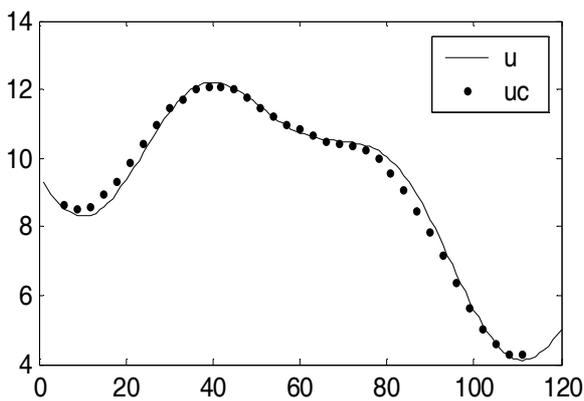


Рисунок 3 - Медианный фильтр,  $L=13$ ,  $r=0$ , скользящее окно,  $dsk=3$

Для проверки эффективности различных методов фильтрации при обработке двумерных сигналов был искусственно создан двумерный исходный сигнал  $u(i, j)$  в виде матрицы размером  $150 \times 150$  тактов. Была также сформирована двумерная мультипликативная помеха с параметром  $sgf = 0.035$ , искажающая сигнал  $u$ . На рисунке 6 показано двумерное изображение

исходного сигнала  $u$  и искаженного помехой сигнала  $z$ . Однако визуальное рассмотрение этих рисунков не может дать никакой информации о характере искажения сигнала помехой.

Сравнение сигналов можно осуществить путем выделения опорных точек, в которых указываются значения сигналов  $u$  и  $z$ . Было выделено  $9 \times 9 = 81$  опорных точек, отстоящих

друг от друга на 18 тактов по каждой оси. Часть этих опорных точек указана в приведенных данных к рисунку 6. Сравнивая значения  $u(i, j)$

и  $z(i, j)$  в опорных точках, можно судить о характере помехи.

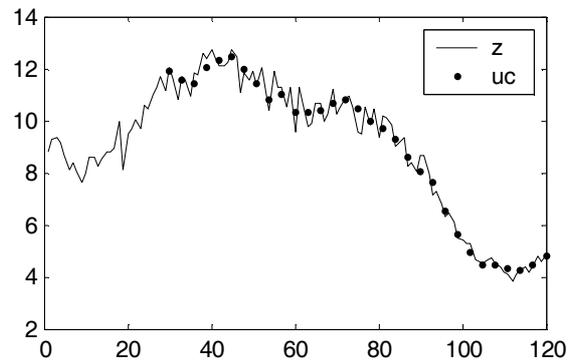
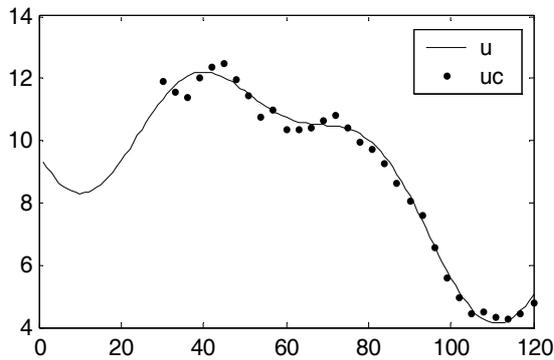


Рисунок 4 - Цифровой сглаживающий фильтр с конечной памятью  $L=30$ ,  $r=3$ , скользящее окно,  $dsk=3$ ,  $st=2$  – мультипликативная помеха,  $sgf=0.05$

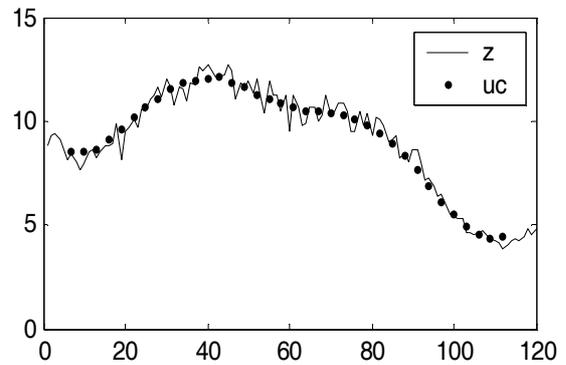
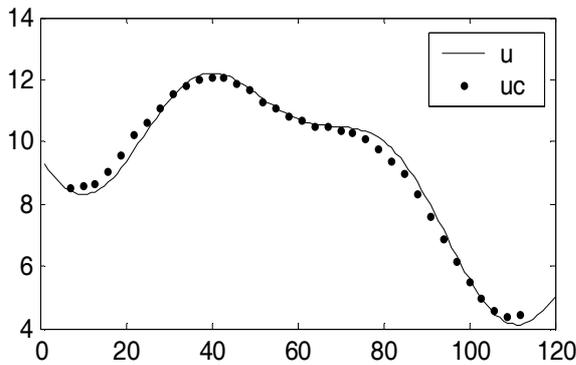


Рисунок 5 - Медианный фильтр,  $L=15$ ,  $r=0$ , скользящее окно,  $dsk=3$

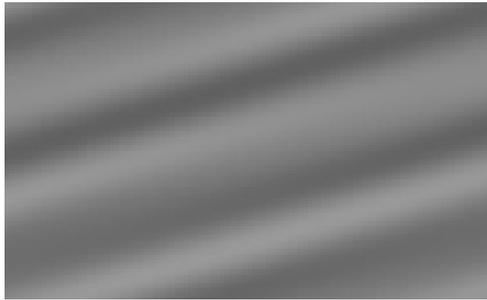
Если в нашем распоряжении имеется подходящий двумерный фильтр, преобразующий сигнал  $z$  в оценку исходного сигнала  $uc$ , то, найдя значения  $uc(i, j)$  в опорных точках и сопоставив их со значениями  $u(i, j)$ , можем судить о качестве работы фильтра. Однако в распоряжении автора не было подходящего двумерного фильтра, хотя работники кафедры занимались разработкой фильтров, устраняющих мультипликативную помеху (см. [4], [5]). Поэтому был использован уже опробованный одномерный вариант цифрового фильтра с конечной памятью, который можно применить к любой строке двумерного изображения. На рисунке 7 приведены графики  $u$  и  $z$  для 50-й строки двумерного изображения и результат  $uc$  обработки сигнала  $z$  медианным фильтром. Однако результат оказался недостаточно хорошим как в смысле сглаживания

помехи, так и в смысле динамической ошибки. Для обработки сигнала, искаженного мультипликативной помехой, требуется использование других методов фильтрации.

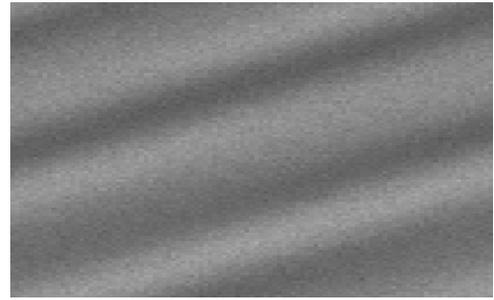
**Заключение.** Предложен основанный на построении имитационной модели реального сигнала метод проверки эффективности процедуры фильтрации искаженного помехой сигнала и выбора наиболее эффективного фильтра из имеющихся в распоряжении.

Метод проверен на искусственно созданных моделях одномерного и двумерного сигналов и устранении помехи цифровым фильтром с конечной памятью с использованием скользящего окна и медианного фильтра. При практическом применении этого метода могут возникнуть трудности с построением имитационной модели, достаточно хорошо отражающей свойства реального сигнала и характера искажающей сигнал помехи.

signal (u)



noise+signal (z)



**Опорные точки изображения**

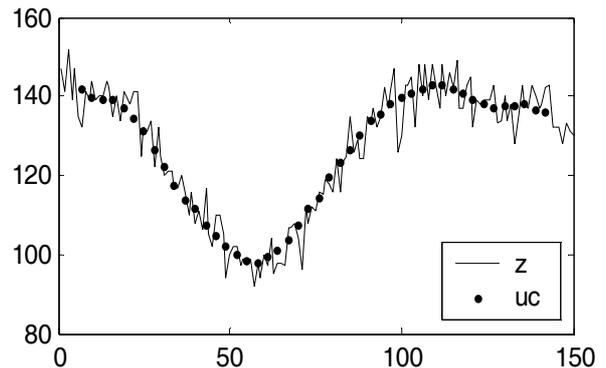
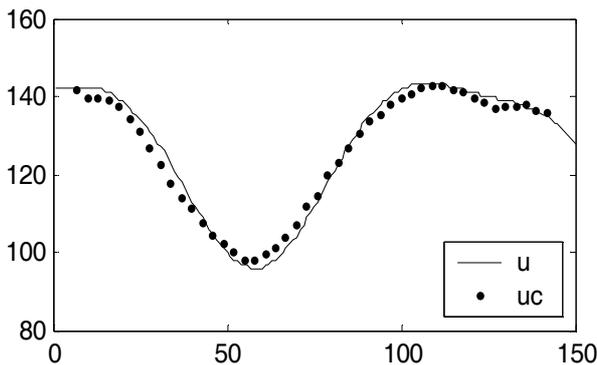
**опорные точки базового кадра**

146	117	103	111	121	134	150	141	111
100	113	126	137	148	137	107	99	118
132	140	145	133	105	99	121	139	141
141	128	103	100	125	143	141	136	122

**опорные точки искаженного кадра**

144	115	101	116	121	142	156	132	107
94	116	137	140	151	140	106	104	113
131	142	143	124	108	97	124	139	140
139	136	103	98	125	152	133	131	117

**Рисунок 6 - Двумерное изображение исходного сигнала u и искаженного мультипликативной помехой сигнала z**



**Рисунок 7 - Медианный фильтр, L=15, r=0, скользящее окно, dsk=3**

**Библиографический список**

1. Кориунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 482 с.
2. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление/ Б.А. Алтатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин, М. Радиотехника, 2008. 176 с.
3. Пратт У. Цифровая обработка изображений.

М.: Мир, 1982. Кн.1. 312 с., Кн 2. 480 с.

4. Бехтин Ю.С. Алгоритм вейвлет-фильтрации зашумленных изображений // Вестник РГРТУ. Вып. 15. 2004.С. 22 – 27.
5. Брянцев А.А. Комбинированная фильтрация изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной структурой // Вестник РГРТУ. Вып. 21. 2007.С. 16 – 19.