

АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ U -ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Гай В. Е.

Рассматриваются алгоритмы фильтрации звуковых сигналов, основанные на интегрально-дифференциальном (U -преобразовании). Полученные результаты указывают на возможность использования предложенных алгоритмов для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, преобразование Уолша, фильтрация сигналов.

Введение

Задача очистки сигнала от шума с целью восстановления смысла сообщения, улучшения качества сигнала, является одной из актуальных задач обработки сигналов.

Часто, предполагается, что на исходный сигнал действует аддитивная или мультипликативная помеха. В работе предлагается несколько алгоритмов фильтрации помех, основанных на U -преобразовании. Обзор алгоритмов фильтрации речевых сигналов приведён в [1].

1. U -преобразование

U -преобразование заключается в формировании многоуровневого (грубо-точного) представления сигнала с помощью фильтров Уолша системы Хармута [2, 3], причём:

1) для построения каждого уровня разложения используются фильтры одинаковой длины, которые масштабируются до размера анализируемого участка сигнала;

2) сначала фильтры применяются ко всему сигналу, затем – к его частям.

Прямое U -преобразование записывается следующим образом:

$$D = U(S),$$

где $D = \{D_{ij}\}$, D_{ij} – j -ый спектр, находящийся на i -ом уровне разложения, $i \in [0; J-1]$, J – количество уровней разложения, $j \in [0; M_i-1]$, M_i – количество элементов на i -ом уровне разложения.

Предлагаются следующие алгоритмы построения U -разложения исходного сигнала:

1) алгоритм формирования K -ичного дерева разложения сигнала (параметры алгоритма: J – количество уровней разложения, K – количество сегментов на i уровне, на которые разбивается сигнал на $(i-1)$ -ом уровне), в вершине дерева

расположено разложение исходного сигнала, $M_i = K^i - 1$;

2) алгоритм построения разложения сигнала на одном уровне с использованием сегмента произвольной длины (параметры алгоритма: L – длина сегмента);

3) алгоритм построения разложения сигнала на одном уровне, при формировании которого сигнал разбивается на заданное количество сегментов (параметры алгоритма: M – количество сегментов, на которое разбивается сигнал).

Вычисление спектрального представления каждого сегмента дерева H (или одного уровня разложения):

$$D_{ij}(n) = \frac{1}{L_i} \cdot \sum_{k=0}^{L_i-1} H_{ij}(k) \cdot G'_{in}(k), \quad n \in [0; W-1], \quad G'$$

– набор фильтров, сгенерированный по фильтрам Уолша, W – количество используемых фильтров, $H_i = \{H_{i1}, \dots, H_{iM_i}\}$ – множество сегментов, полученных из исходного сигнала S с шагом L на i -ом уровне разложения, H_{ij} – j -ый сегмент сигнала на i -ом уровне разложения, $H_{ij}(k)$ – k -ый отсчёт сегмента.

Обратное U -преобразование записывается следующим образом:

$$S' = U^{-1}[D],$$

где S' – сигнал, полученный после выполнения обратного преобразования, U^{-1} – оператор обратного преобразования. Вычислить обратное преобразование можно следующим образом:

$$H'_{ij}(k) = \sum_{k=0}^{W-1} D_{ij}(k) \cdot G(k), \quad \text{где } G \text{ – набор филь-}$$

тров Уолша системы Хармута.

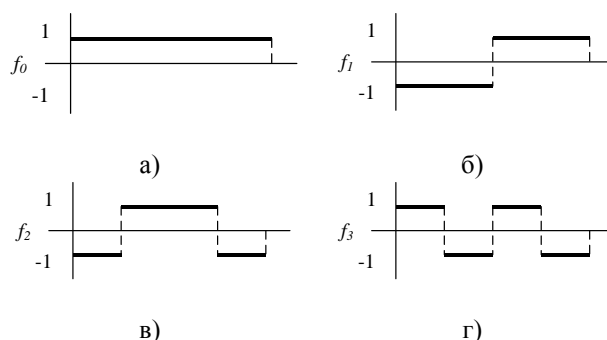


Рис. 1. Фильтры Уолша системы Хармута

Амплитуда анализируемого сигнала для выполнения операции восстановления должна

быть нормирована к отрезку $[0, 1]$ до построения разложения сигнала.

2. Алгоритмы фильтрации данных

Рассмотрим предлагаемые алгоритмы очистки сигнала от шума.

2.1. Алгоритм фильтрации 1

Разработанный алгоритм основан на обнулении коэффициентов разложения и состоит из следующих шагов:

1) построение U -разложения D сигнала S (формируется один уровень разложения, длина сегмента – L , $L = W$, W – количество используемых фильтров);

2) модификация разложения D : обнуление в каждом спектре разложения указанных коэффициентов;

3) применение к модифицированному разложению D обратного преобразования: генерация сигнала S' .

Предположим, что разложение сигнала формируется с использованием 4 фильтров, тогда существует $15 (2^4 - 1)$ комбинаций вариантов обнуления коэффициентов фильтров (см. табл.1).

Таблица 1. Варианты обнуления коэффициентов

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|----|----|----|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| № | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | |

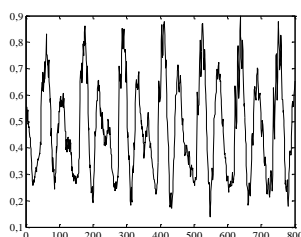


Рис. 2. Исследуемый сигнал

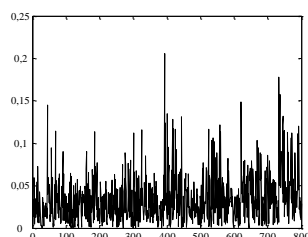


Рис. 3. Результат обнуления нулевого коэффициента

На рис. 3 показан сигнал S' (исходный сигнал показан на рис. 2), в каждом спектре которого, обнулен нулевой коэффициент. Выполнение данной операции привело к потере информации о форме сигнала (после обнуления сохраняется только высокочастотная составляющая сигнала). Таким образом, при решении задачи фильтрации

обнулением коэффициентов, нельзя использоваться комбинации с первой по восьмую (см. табл. 1).

При использовании 10, 11 и 12 комбинаций в получаемые сигналы вносятся артефакты (см. рис. 3, рис. 4, на рисунках сплошной линией показан восстановленный сигнал, пунктирной линией – исходный сигнал, отображается только часть сигнала). В данных комбинациях обнуляется первый спектральный коэффициент (см. рис. 1.б).

Можно отметить, что чем больше число знакоперемен (переходов через ноль) у фильтра, тем более высокочастотную составляющую он позволяет выделить из сигнала. Количество информации о форме сигнала, находящейся в коэффициентах, уменьшается с увеличением числа знакоперемен в фильтре, генерирующем коэффициент.

В связи с этим, не рекомендуется обнулять спектральные коэффициенты, полученные с применением нулевого и первого фильтров, в противном случае, это приведёт не только к огрублению формы сигнала и сглаживанию шумовой составляющей, но и к внесению в сигнал различных артефактов.

Обнуление коэффициентов, полученных с применением второго и третьего фильтров, приводит только к «огрублению» сигнала, после выполнения обратного преобразования.

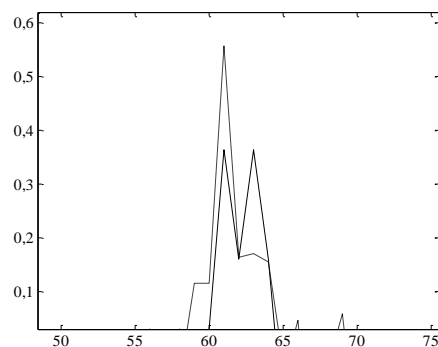


Рис. 4. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1001 (10)

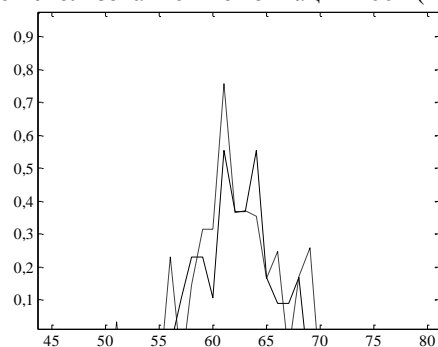


Рис. 5. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1010 (11)

Сравнивая сигналы, полученные после применения 9 и 13, 14 и 15 комбинаций, можно отметить, что для 9 комбинации генерируется более грубый сигнал, чем для других комбинаций.

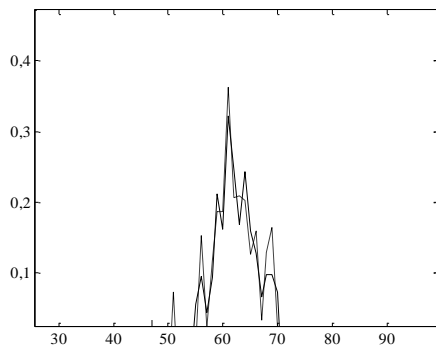


Рис. 6. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1110 (15)

Таким образом, для фильтрации сигнала можно использовать следующие комбинации спектральных коэффициентов: 1000 (9), 1100 (13), 1101 (14), 1110 (15).

Выше проведён анализ результатов обнуления коэффициентов для 4 фильтров. При использовании большего числа фильтров будет доступно больше вариантов комбинаций обнуляемых коэффициентов.

В результате выполнения алгоритма, уровень шума в сигнале S' должен быть меньше уровня шума в исходном сигнале S . Указанный результат достигается за счёт обнуления коэффициентов разложения, несущих информацию о высокочастотной составляющей сигнала, а, следовательно, и о шуме.

Примечания:

1) использование комбинаций, в которых во второй половине находятся единицы не рекомендуется, это приводит к добавлению различных артефактов к «огрублённому» сигналу, указанный эффект особенно заметен при использовании 8 и более фильтров;

2) сравнивая речевые сигналы до и после огрубления, можно отметить разницу между указанными сигналами, заключающуюся в повышении высоты голоса, полученную после огрубления сигнала;

3) результат применения комбинаций 1100 и 11110000 (8 фильтров) эквивалентен, поэтому для повышения производительности рекомендуется использовать меньшее количество фильтров.

2.2. Алгоритм фильтрации 2

Разработанный алгоритм основан на восстановлении сигнала с заданной степенью точности:

1) построение U -представления D сигнала S (формируется один уровень разложения, длина

сегмента – L , $L = P \cdot W$, W – количество используемых фильтров);

2) выполнение обратного преобразования и генерация сигнала S' : меняя длину сегмента L , можно генерировать сигнал S' с различной степенью «огрубления». При $L = W$ сигнал восстанавливается без ошибок, при $L > W$ восстановленный сигнал будет более «грубым» (содержать меньше деталей), чем исходный;

3) интерполяция восстановленного сигнала до размера исходного сигнала.

Длина сегмента L должна быть кратна длине сигнала, в противном случае, восстановленный сигнал будет обрезан по длине. Это является следствием того, что в сигнале будут присутствовать отсчёты, не уложившиеся в целое число сегментов.

В качестве третьего алгоритма фильтрации можно предложить алгоритм, основанный на комбинации первого и второго алгоритмов. В таком алгоритме одновременно будет выполняться обнуление коэффициентов и огрубление сигнала.

Необходимо отметить, что после восстановления сигнала, максимальное значение амплитуды восстановленного сигнала будет меньше амплитуды исходного сигнала. Данное примечание касается и первого алгоритма фильтрации.

3. Эксперимент

Рассмотрим результаты фильтрации сигналов, полученные на основе предложенных алгоритмов и сравним их с результатами, полученными с помощью вейвлет-фильтрации. Исследование алгоритма выполняется на трёх тестовых сигналах (см. рис. 2, рис. 7.а, рис. 7.б). Искажение сигналов проводится с использованием аддитивного нормального и равномерного шума. Параметр q в табл. 1 обозначает долю шума в сигнале.

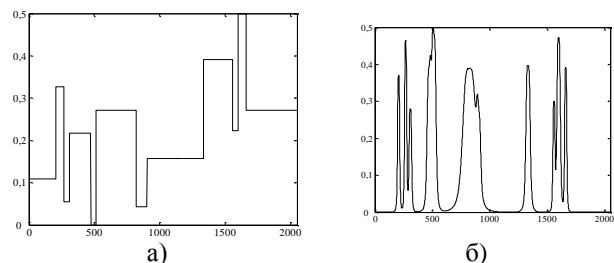


Рис. 7. Тестовые сигналы

В табл. 2 приведена оценка качества искажённых сигналов.

Таблица 2. Оценка степени искажения сигналов

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|---|---|----------------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |

| | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,05 | 24,88 | 21,23 | 24,66 | 20,08 | 16,22 | 20,20 |
| 0,1 | 18,94 | 15,26 | 18,88 | 14,05 | 10,59 | 14,00 |
| 0,2 | 12,77 | 9,29 | 12,78 | 8,11 | 4,31 | 7,92 |

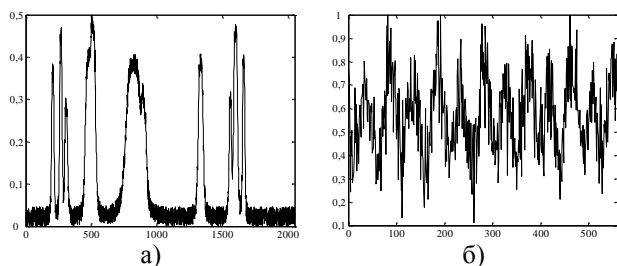


Рис. 8. Искажённые сигналы: а) $q = 0.1$, сигнал – 2;
б) $q = 0.1$, сигнал – 3

3.1. Вейвлет-фильтрация

Алгоритм фильтрации сигнала на основе вейвлет-преобразования [4]:

- 1) формирование N -уровневого вейвлет-разложения;
- 2) пороговая обработка детализирующих коэффициентов;
- 3) восстановление сигнала с использованием старых аппроксимирующих коэффициентов и новых детализирующих.

Таблица 3. Результат восстановления на основе вейвлет-преобразования

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,0 | 24,5 | 27,0 | 29,6 | 21,0 | 19,0 | 22,6 |
| 5 | 1 | 7 | 7 | 3 | 2 | 2 |
| 0,1 | 22,9 | 22,1 | 27,6 | 17,0 | 15,7 | 14,9 |
| | 9 | 6 | 5 | 2 | 1 | 7 |
| 0,2 | 19,8 | 17,2 | 23,5 | 13,3 | 12,8 | 12,4 |
| | 5 | 8 | 3 | 6 | 8 | 9 |

3.2. Разработанные алгоритмы

3.2.1. Алгоритм фильтрации 1

Ниже в таблицах приведены результаты работы алгоритма фильтрации, основанного на обнулении коэффициентов разложения.

Таблица 4. Комбинация 1000 (9)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,05 | 25,61 | 24,08 | 28,44 | 21,84 | 19,17 | 22,65 |
| 0,1 | 24,02 | 21,41 | 27,19 | 17,82 | 16,28 | 15,61 |
| 0,2 | 20,89 | 17,42 | 23,94 | 13,98 | 13,57 | 13,22 |

Таблица 5. Комбинация 1100 (13)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,05 | 27,30 | 28,47 | 32,85 | 23,57 | 21,38 | 25,33 |
| 0,1 | 25,78 | 24,44 | 30,07 | 19,57 | 18,27 | 17,68 |
| 0,2 | 22,61 | 19,71 | 26,01 | 15,80 | 15,48 | 15,13 |

Таблица 6. Комбинация 1101 (14)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,05 | 30,11 | 33,43 | 35,51 | 26,58 | 24,50 | 29,03 |
| 0,1 | 28,75 | 27,98 | 32,80 | 22,59 | 21,15 | 21,77 |
| 0,2 | 25,60 | 23,13 | 28,75 | 19,10 | 18,52 | 18,15 |

Таблица 7. Комбинация 1110 (15)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,05 | 30,52 | 30,16 | 36,23 | 26,60 | 24,31 | 27,75 |
| 0,1 | 28,84 | 27,02 | 33,39 | 22,61 | 21,49 | 19,88 |
| 0,2 | 25,66 | 22,40 | 29,33 | 18,64 | 18,58 | 18,26 |

3.2.2. Алгоритм фильтрации 2

Ниже в таблицах приведены результаты работы алгоритма фильтрации, основанного на восстановлении сигнала с заданной степенью точности.

Таблица 8. $P = 2$ (комбинация 16)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,0 | 27,4 | 27,9 | 31,6 | 23,0 | 20,5 | 24,3 |
| 5 | 1 | 5 | 3 | 2 | 2 | 0 |
| 0,1 | 25,4 | 23,4 | 29,0 | 18,7 | 17,2 | 16,6 |
| | 7 | 8 | 9 | 1 | 4 | 8 |
| 0,2 | 21,8 | 18,7 | 25,0 | 15,0 | 14,4 | 14,0 |
| | 6 | 4 | 0 | 2 | 8 | 4 |

Таблица 9. $P = 4$ (комбинация 16)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,0 | 25,8 | 26,6 | 29,4 | 21,8 | 19,4 | 22,8 |
| 5 | 0 | 7 | 2 | 4 | 3 | 5 |
| 0,1 | 24,0 | 22,3 | 27,7 | 17,5 | 16,1 | 15,2 |
| | 8 | 5 | 3 | 7 | 7 | 9 |
| 0,2 | 20,6 | 17,5 | 23,8 | 13,7 | 13,3 | 12,8 |
| | 6 | 6 | 3 | 1 | 1 | 3 |

3.2.3. Комбинация алгоритмов фильтрации

Рассмотрим результаты, полученные в результате комбинации алгоритмов фильтрации.

Таблица 10. $P = 2$ (комбинация 9)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,05 | 22,03 | 20,10 | 26,50 | 19,99 | 17,62 | 21,53 |
| 0,1 | 21,20 | 18,43 | 25,38 | 16,67 | 15,15 | 14,65 |
| 0,2 | 18,96 | 15,79 | 22,58 | 13,21 | 12,72 | 12,43 |

Таблица 11. $P = 2$ (комбинация 13)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|---|---|----------------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |

| | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,05 | 25,47 | 25,11 | 28,92 | 21,79 | 19,31 | 22,70 |
| 0,1 | 23,92 | 21,78 | 27,31 | 17,67 | 16,18 | 15,42 |
| 0,2 | 20,75 | 17,45 | 23,77 | 13,80 | 13,41 | 12,91 |

Таблица 12. $P = 2$ (комбинация 14)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,0 | 26,1 | 27,1 | 30,3 | 22,3 | 20,0 | 23,4 |
| 5 | 1 | 8 | 7 | 0 | 4 | 5 |
| 0,1 | 24,5 | 22,8 | 28,3 | 18,0 | 16,6 | 16,0 |
| | 7 | 1 | 3 | 7 | 3 | 8 |
| 0,2 | 21,2 | 18,1 | 24,4 | 14,3 | 13,8 | 13,3 |
| | 3 | 4 | 5 | 3 | 9 | 7 |

Таблица 13. $P = 2$ (комбинация 15)

| q | ОСШ, равн. шум | | | ОСШ, норм. шум | | |
|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0,0 | 26,5 | 25,5 | 29,7 | 22,4 | 19,7 | 23,4 |
| 5 | 7 | 1 | 4 | 3 | 0 | 0 |
| 0,1 | 24,6 | 22,2 | 27,8 | 18,2 | 16,7 | 15,9 |
| | 8 | 8 | 9 | 5 | 2 | 0 |
| 0,2 | 21,3 | 17,9 | 24,2 | 14,4 | 13,9 | 13,5 |
| | 1 | 6 | 3 | 1 | 4 | 2 |

Выводы по результатам экспериментов:

1) предложенные алгоритмы фильтрации обеспечивают результат очистки от шума не хуже, чем алгоритм фильтрации, на основе вейвлет-преобразования, а в ряде случаев – показывает лучшие результаты;

2) при применении первого алгоритма фильтрации, наилучший результат обеспечивает использование 14 и 15 комбинаций обнуления коэффициентов;

3) при использовании второго алгоритма фильтрации, при увеличении значения параметра P , качество восстановления сигнала снижается;

4) при использовании для восстановления сигнала комбинации алгоритмов можно отметить, что результаты восстановления на основе такого подхода несколько ниже, чем результаты, полученные на основе только первого или второго алгоритмов;

5) сравнивая предложенную методику с методикой вейвлет-фильтрации можно отметить меньшее число настраиваемых параметров предложенных алгоритмов, по сравнению с вейвлет-алгоритмом. В алгоритме на основе вейвлет-преобразования требуется выбрать: решающее правило, тип порога, метод масштабирования порога, тип вейвлета и уровень разложения, на котором выполняется фильтрация;

6) полученные результаты подтверждают возможность использования обнуления коэффи-

циентов и обнуления сигнала для очистки сигнала от шума (удаления шумовой компоненты).

Заключение

В работе описаны разработанные алгоритмы фильтрации звуковых сигналов, основанные на U -преобразовании. В качестве примеров, рассматривается возможность применения разработанных алгоритмов к фильтрации сигналов, искажённых аддитивным гауссовым и равномерным шумами. Несмотря на то, что данные шумы являются модельными, их использование в исследовании позволяют сравнить эффективность различных алгоритмов фильтрации.

Литература

1. Чучупал В.Я., Чичагов А.С., Маковкин К.А. Цифровая фильтрация зашумлённых речевых сигналов // Вычислительный центр РАН, 1998, М.: 52 с.
2. Утробин В. А. Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, Т. 174, № 10, 2004, С. 1089–1104.
3. Утробин В. А. Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов. Н. Новгород: НГТУ, 2004. – 221 с.
4. Donoho, D.L., I.M. Johnstone Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, Biometrika, 1994, Vol. 81, P. 425–455.