

---

**MULTILAYER PERCEPTRON PARALLEL MODEL CONSTRUCTION**
**Kazakov V.G., Plotnikova N.P., Tesley V.V., Fedosin S.A.**

**This article contains description of multilayer perceptron programming prototype, implemented using functional programming language Erlang. Architecture of this prototype is based on the asynchronous message passing concept and principle «one neuron – one process». In the end of this article the most interesting and important results of MLP performance tests are presented.**

**Keywords:** *neural network, multilayer perceptron, Erlang, asynchronous message processing, RPROP algorithm.*

Казakov Виталий Гайясович, к.т.н., директор Центра дистанционного образования Мордовского государственного университета (МрГУ) им. Н.П. Огарева. Тел. (8-834-2) 48-24-55; 23-39-41. E-mail: vitalykg@mail.ru

Плотникова Наталья Павловна, аспирант Кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» (АСОИУ) МрГУ им. Н.П. Огарева. Тел. (8-834-2) 32-75-67; 29-07-60. E-mail: linsierra.mail@gmail.com

Тесля Валерий Владимирович, врач анестезиолог-реаниматолог Республиканской больницы №1 г. Саранска. Тел. (8-834-2) 24-77-20; 24-69-15. E-mail: valery.tesley@gmail.com

Федосин Сергей Алексеевич, к.т.н., профессор, заведующий Кафедрой АСОИУ МрГУ им. Н.П. Огарева. Тел. (8-834-2) 47-06-64; 47-86-91. E-mail: fedosinsa@mrsu.ru

УДК 534.87

**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 приведен в [1].

**Свойства  $U$ -преобразования**

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

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

- 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,  $i \in [0; J - 1]$ ,  $J$  – число уровней разложения,  $j \in [0; M_i - 1]$ ,  $M_i$  – число элементов на  $i$ -ом уровне разложения.

Предлагаются следующие алгоритмы построения  $U$ -разложения исходного сигнала.

1. Алгоритм формирования  $K$ -ичного дерева разложения сигнала (параметры алгоритма:  $J$  – число уровней разложения,  $K$  – число 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 число сегментов

(параметры алгоритма:  $M$  – число сегментов, на которое разбивается сигнал).

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

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

где  $G'$  – набор фильтров, сгенерированный по фильтрам Уолша,  $W$  – число используемых фильтров,  $H_i = \{H_{i1}, \dots, H_{iM}\}$  – 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 отсчет сегмента.

Обратное  $U$ -преобразование записывается как  $S' = U^{-1}[D]$ , где  $S'$  – сигнал, полученный после выполнения обратного преобразования,  $U^{-1}$  – оператор обратного преобразования. Вычислить обратное преобразование можно следующим образом:

$$H'_{ij}(k) = \sum_{k=0}^{W-1} D_{ij}(k) \cdot G(k),$$

где  $G$  – набор фильтров Уолша системы Хармута (см. рис. 1). Амплитуда анализируемого сигнала для выполнения операции восстановления должна быть нормирована к отрезку  $[0, 1]$  до построения разложения сигнала.

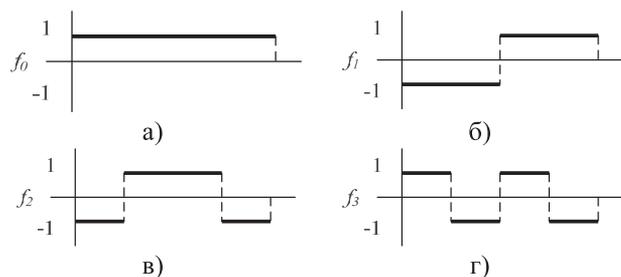


Рис. 1. Фильтры Уолша системы Хармута

### Алгоритмы фильтрации данных

Рассмотрим предлагаемые алгоритмы очистки сигнала от шума. Алгоритм фильтрации №1 основан на обнулении коэффициентов разложения и состоит из следующих шагов.

1. Построение  $U$ -разложения  $D$  сигнала  $S$  (формируется один уровень разложения, длина сегмента –  $L$ ,  $L = W$ ,  $W$  – число используемых фильтров).

2. Модификация разложения  $D$ : обнуление в каждом спектре разложения указанных коэффициентов.

3. Применение к модифицированному разложению  $D$  обратного преобразования: генерация сигнала  $S'$ .

Таблица 1. Варианты обнуления коэффициентов

№	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1
2	0	0	1	1	0	0	1
3	0	1	0	1	0	1	0

8	9	10	11	12	13	14	15
0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0

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

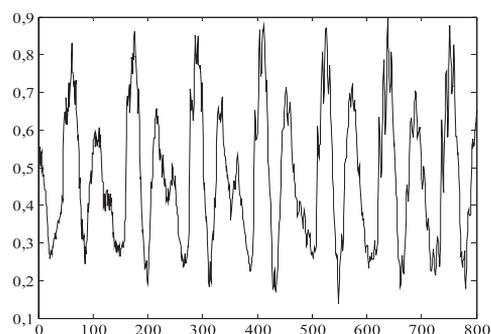


Рис. 2. Исследуемый сигнал

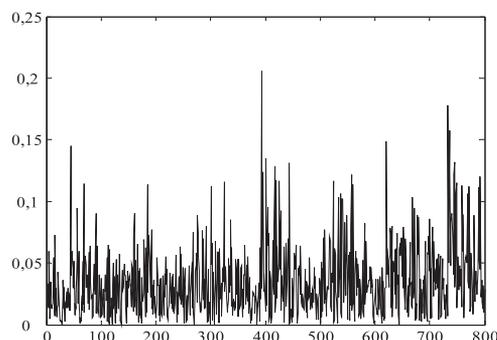


Рис. 3. Результат обнуления нулевого коэффициента

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 фор-

ме сигнала (после обнуления сохраняется только высокочастотная составляющая сигнала).

Таким образом, при решении задачи фильтрации обнулением коэффициентов нельзя использовать комбинации с первой по восьмую (см. таблицу 1). При использовании 10; 11 и 12 комбинаций в получаемые сигналы вносятся артефакты (см. рис. 3 и рис. 4, где сплошной линией показан восстановленный сигнал, пунктирной линией – исходный сигнал, отображается только часть сигнала). В данных комбинациях обнуляется первый спектральный коэффициент (см. рис. 1б).

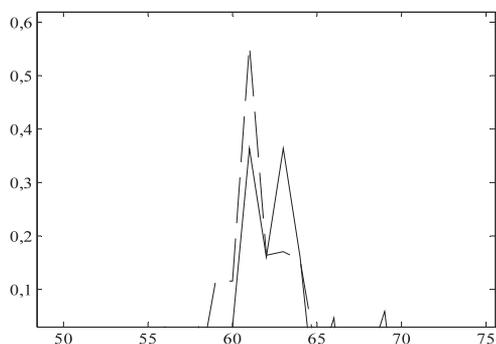


Рис. 4. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1001 (10)

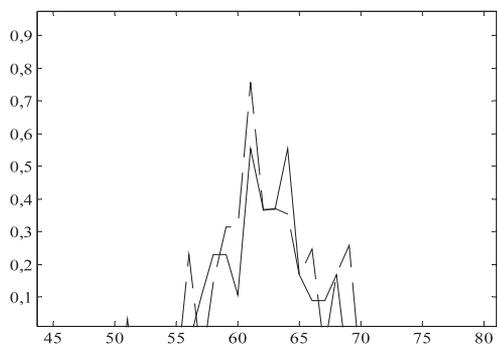


Рис. 5. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1010 (11)

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 приведет 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. 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.

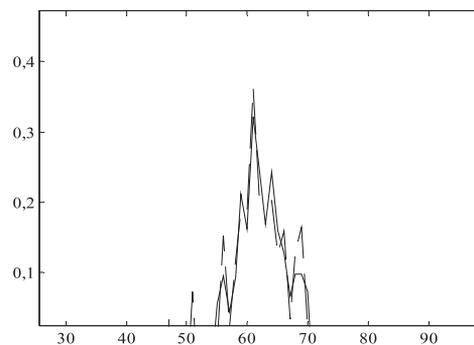


Рис. 6. Результат восстановления сигнала с использованием комбинации 1110 (15)

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

Выше проведен 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 счет обнуления коэффициентов разложения, несущих информацию о высокочастотной составляющей сигнала, а следовательно, и о шуме.

Примечания:

- использование комбинаций, в которых во второй половине находятся единицы, не рекомендуется, это приводит к добавлению различных артефактов к «огрубленному» сигналу, указанный эффект особенно заметен при использовании 8 и более фильтров;
- сравнивая речевые сигналы до и после огрубления, можно отметить разницу между указанными сигналами, заключающуюся в повышении высоты голоса, полученную после огрубления сигнала;
- результат применения комбинаций 1100 и 11110000 (8 фильтров) эквивалентен, поэтому для повышения производительности рекомендуется использовать меньшее количество фильтров.

Алгоритм фильтрации №2, основанный на восстановлении сигнала с заданной степенью точности, предусматривает следующие шаги.

1. Построение  $U$ -представления  $D$  сигнала  $S$  (формируется один уровень разложения, длина сегмента –  $L$ ,  $L = P \cdot W$ ,  $W$  – число 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 отсчеты, 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.

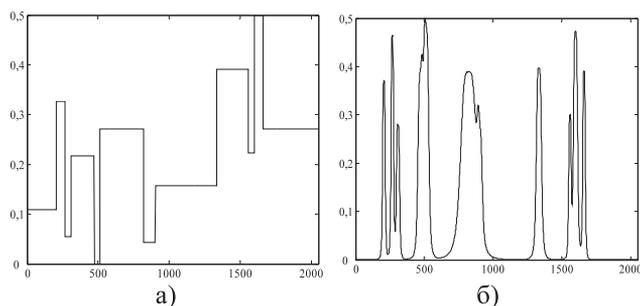


Рис. 7. Тестовые сигналы

### Результаты эксперимента

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

таблице 2 приведена оценка качества искаженных 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

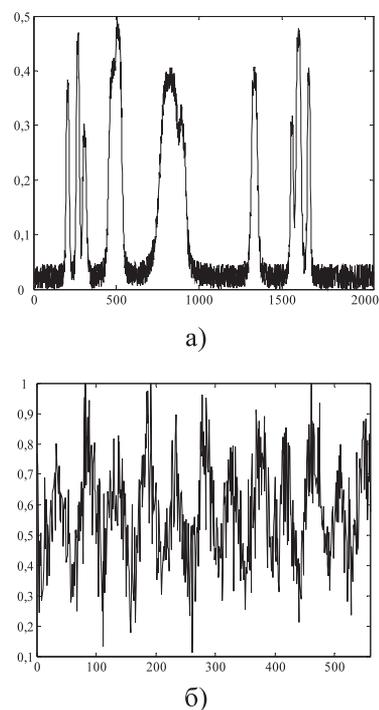


Рис. 8. Искаженные сигналы а)  $q = 0.1$ , сигнал – 2; б)  $q = 0.1$ , сигнал – 3

### Вейвлет-фильтрация

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

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

### Разработанные алгоритмы

Алгоритм фильтрации №1. В таблицах 3-7 представлены результаты работы алгоритма фильтрации, основанного на обнулении коэффициентов разложения.

Таблица 3. Результат восстановления на основе вейвлет-преобразования

$q$	ОСШ, равн. шум			ОСШ, норм. шум		
	1	2	3	1	2	3
0,05	24,51	27,07	29,67	21,03	19,02	22,62
0,1	22,99	22,16	27,65	17,02	15,71	14,97
0,2	19,85	17,28	23,53	13,36	12,88	12,49

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

Алгоритм фильтрации №2. В таблицах 8-9 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
0,05	27,41	27,95	31,63	23,02	20,52	24,30
0,1	25,47	23,48	29,09	18,71	17,24	16,68
0,2	21,86	18,74	25,00	15,02	14,48	14,04

Таблица 9.  $P = 4$  (комбинация 16)

$q$	ОСШ, равн. шум			ОСШ, норм. шум		
	1	2	3	1	2	3
0,05	25,80	26,67	29,42	21,84	19,43	22,85
0,1	24,08	22,35	27,73	17,57	16,17	15,29
0,2	20,66	17,56	23,83	13,71	13,31	12,83

Комбинация алгоритмов фильтрации. Рассмотрим результаты, полученные в результате комбинации алгоритмов фильтрации, которые отражены в таблицах 9-15.

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
0,05	26,11	27,18	30,37	22,30	20,04	23,45
0,1	24,57	22,81	28,33	18,07	16,63	16,08
0,2	21,23	18,14	24,45	14,33	13,89	13,37

Таблица 13.  $P = 2$  (комбинация 15)

$q$	ОСШ, равн. шум			ОСШ, норм. шум		
	1	2	3	1	2	3
0,05	26,57	25,51	29,74	22,43	19,70	23,40
0,1	24,68	22,28	27,89	18,25	16,72	15,90
0,2	21,31	17,96	24,23	14,41	13,94	13,52

Выводы по результатам экспериментов:  
- предложенные алгоритмы фильтрации обеспечивают результат очистки от шума не хуже, чем алгоритм фильтрации на основе вейвлет-преобразования, а в ряде случаев – показывает лучшие результаты;

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

- при использовании второго алгоритма фильтрации, при увеличении значения параметра  $P$  качество восстановления сигнала снижается;

- 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;

- 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;

- полученные результаты подтверждают возможность использования обнуления коэффициентов и округления 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, искаженных аддитивным гауссовым и равномерным шумами. Несмотря на то что данные шумы являются модельными, их использование в исследовании позволяет сравнить эффективность различных алгоритмов фильтрации.

## Литература

1. Чучупал В.Я., Чичагов А.С., Маковкин К.А. Цифровая фильтрация зашумленных речевых сигналов. М.: Изд. ВЦ РАН, 1998. – 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: Изд. НГТУ, 2004. – 221 с.
4. Donoho D.L., Johnstone I.M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // Biometrika. Vol. 81, 1994. – P. 425-455.

## SOUND SIGNAL FILTERING ALGORITHMS BASED ON U-TRANSFORM

Gai V.E.

**Algorithms of filtering sound signals based on integrated-differential (U-conversion) are reviewed. The results indicate the possibility of using the proposed algorithms for solving the task.**

**Keywords:** digital signal processing, Walsh transform, signal filtering.

Гай Василий Евгеньевич, к.т.н., доцент Кафедры «Вычислительные системы и технологии» Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева. Тел. 8-920-022-91-71; (8-831) 436-82-28. E-mail: iamuser@inbox.ru

## ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.372

### МЕТОД СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДРОБНО-ИНТЕРВАЛЬНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ И РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА ЦИФРОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ PLC-СЕТЕЙ И БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Багманов В.Х., Любопытов В.С., Султанов А.Х., Тявлин А.З.

В статье рассматривается метод обработки цифрового сигнала на передающей стороне канала, предусматривающий совместное применение дробно-интервальной коррекции и расширения спектра сигнала. При этом одновременно решаются две основные проблемы обеспечения надежной передачи цифрового сигнала по искажающему каналу с аддитивным шумом, имеющим сосре-

доточенный спектр: предварительная коррекция компенсирует межсимвольную интерференцию, возникающую из-за искажений в канале, а расширение спектра позволяет повысить помехоустойчивость приема. Проанализирована эффективность применения данного метода с точки зрения минимизации вероятности ошибки при приеме и мощности передаваемого сигнала.