

Радиооптика

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2016. № 05. С. 11–25.

DOI: **10.7463/rdopt.0516.0848125**

Представлена в редакцию: 03.08.2016

Исправлена: 17.08.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.391

Моделирование помехозащищенных речевых каналов для технических систем управления

Бычков Б. И.^{1,*}, Романовский А. С.¹,

[*b102009@yandex.ru](mailto:b102009@yandex.ru)

Хартов В. Я.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена применению адаптивной цифровой фильтрации для подавления помех в речевых каналах систем управления. Проведен сравнительный анализ алгоритмов адаптации по следующим критериям: качество подавления помехи, скорость сходимости к установившемуся режиму, вычислительная сложность. Рассмотренные алгоритмы: LMS, NLMS, RLS. Проведено моделирование работы алгоритмов в среде MATLAB с использованием различных шумов. Показано, что качество подавления помехи наивысшее у алгоритма RLS, скорость сходимости наибольшая у алгоритма NLMS. Исследовано влияние ряда факторов на процесс адаптации. Алгоритм NLMS рекомендован для систем реального времени, а RLS – для обработки записей речевых сигналов. Рассмотренные алгоритмы могут быть реализованы на цифровом сигнальном процессоре.

Ключевые слова: речевой канал, система управления, адаптивный фильтр, подавление помех, алгоритм адаптации, MATLAB

Введение

Проблема помехозащищенности речевых каналов актуальна для современных технических систем, таких как системы связи и управления. Под речевым каналом понимают совокупность приемного и передающего устройств, а также линии связи, работающих с речевыми сигналами. Сбор речи, как правило, сопряжен с попаданием в канал нежелательных помех. Говорящий может находиться в цехе с работающим оборудованием, в транспорте, вблизи шумящих природных объектов – во всех этих случаях на вход передающего устройства поступает не только полезный сигнал, но и шумовая составляющая. Поскольку такая помеха возникает в точке передачи и не связана с качеством линии связи, подсистему подавления целесообразно размещать внутри передающего устройства. Характеристики помехи заранее неизвестны, поэтому в подсистеме подавления может быть использована адаптивная цифровая фильтрация.

Адаптивный цифровой фильтр имеет переменные параметры, которые перестраиваются под действием входных сигналов. Область применения адаптивных фильтров до-

вольно обширна и включает в себя адаптивное моделирование и управление, шумоподавление, адаптивные антенные решетки. Данная работа посвящена применению адаптивной фильтрации для обеспечения помехозащищенности речевых каналов.

Составной частью адаптивного фильтра, которая отвечает за изменение его параметров, является применяемый алгоритм адаптации. Существует множество алгоритмов, различающихся быстротой сходимости и вычислительной сложностью. Целью работы стал сравнительный анализ трех алгоритмов: LMS, NLMS, RLS, а также выявление зависимости результата фильтрации от ряда факторов. В качестве критериев сравнения были выбраны коэффициент подавления помехи, скорость сходимости к установившемуся режиму и вычислительная сложность. По результатам сравнительного анализа можно сформулировать рекомендации по выбору алгоритма адаптации для системы управления, использующей речевые сигналы.

1. Математическая модель адаптивного фильтра

Цифровой адаптивный фильтр – это фильтр с переменными параметрами (весовыми коэффициентами – ВК), значения которых в каждый момент времени зависят от входных сигналов. Принцип адаптивного подавления помех описан в [1], а его реализация представлена на рис. 1.

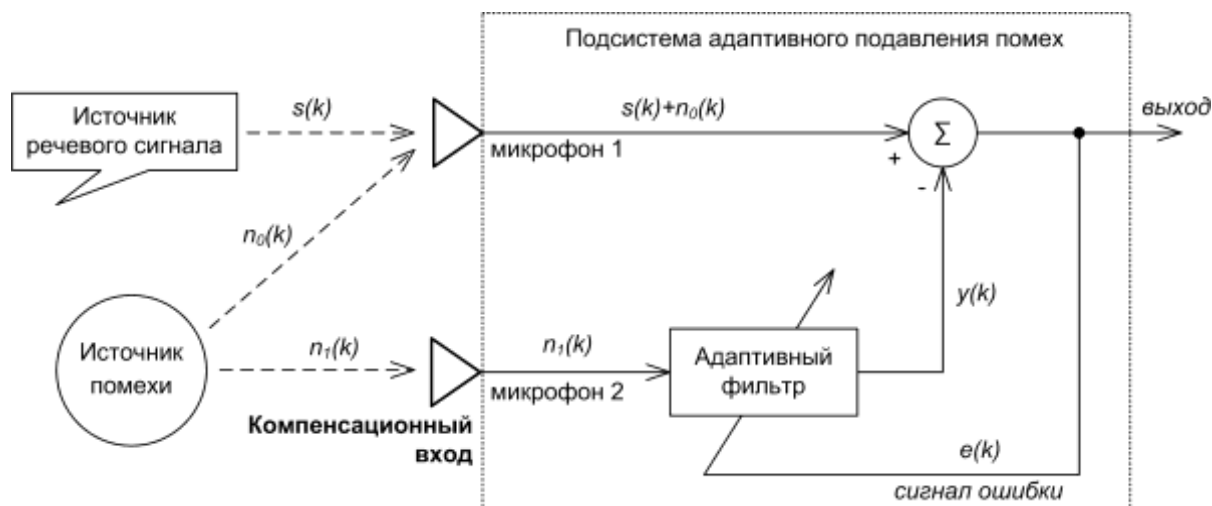


Рис. 1. Принцип адаптивного подавления помех

Подсистема подавления помех, работающая в речевом канале, принимает сигналы с двух микрофонов. На первый микрофон поступает полезный речевой сигнал $s(k)$ и аддитивная помеха $n_0(k)$. Второй микрофон (далее – компенсационный) нужен для регистрации образца помехи $n_1(k)$. Помеховые сигналы не коррелированы с речевым сигналом, но коррелированы между собой, так как получены из одного источника. Таким образом, входным сигналом адаптивного фильтра является $x(k) = n_1(k)$, а требуемым – смесь $d(k) = s(k) + n_0(k)$. Адаптивный фильтр обрабатывает $n_1(k)$ так, чтобы получить сигнал

$y(k) \approx n_0(k)$. Вычитание этого результата из требуемого сигнала дает выходной сигнал системы, в той или иной степени очищенный от помехи:

$$e(k) = d(k) - y(k) = s(k) + n_0(k) - y(k). \quad (1)$$

Сигнал (1) также служит сигналом ошибки, по которому перестраивается фильтр.

В данном случае адаптивный фильтр трансверсальный, его выходной сигнал определяют как

$$y(k) = \sum_{n=1}^N h_n(k-1)x(k-n+1) = \mathbf{h}_N^T(k-1)\mathbf{x}_N(k),$$

где N – число ВК фильтра, k – номер дискретного момента времени,

$$\mathbf{x}_N(k) = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-n+1) \ \dots \ x(k-N+1)]^T,$$

$$\mathbf{h}_N(k-1) = [h_1(k-1) \ h_2(k-1) \ \dots \ h_n(k-1) \ \dots \ h_N(k-1)]^T -$$

вектор отсчетов входного сигнала и вектор ВК соответственно.

Оптимальное винеровское оценивание, описанное в [2], основано на минимизации целевой функции среднеквадратической ошибки

$$\xi = E\{|e(k)|^2\},$$

где $E\{\}$ обозначает операцию усреднения по реализациям, т.е. вычисление математического ожидания. Значение вектора ВК, соответствующее минимуму ξ , находят согласно уравнению Винера-Хопфа:

$$\mathbf{h}_N^* = \mathbf{R}_N^{-1}\mathbf{r}_N,$$

где \mathbf{R}_N – автокорреляционная матрица входного сигнала, каждый элемент которой представляет собой произведение двух его отсчетов [3]:

$$\mathbf{R}_N = E\{\mathbf{x}_N(k)\mathbf{x}_N^T(k)\} = E\left\{\begin{bmatrix} |x(k)|^2 & x(k)x(k-1) & \dots & x(k)x(k-N+1) \\ x(k-1)x(k) & |x(k-1)|^2 & \dots & x(k-1)x(k-N+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(k-N+1)x(k) & x(k-N+1)x(k-1) & \dots & |x(k-N+1)|^2 \end{bmatrix}\right\}, \quad (2)$$

\mathbf{r}_N – корреляционный вектор требуемого и входного сигналов, каждый элемент которого представляет собой произведение текущего отсчета сигнала $d(k)$ и одного из элементов $\mathbf{x}_N(k)$:

$$\mathbf{r}_N = E\{[d(k)x(k) \ d(k)x(k-1) \ \dots \ d(k)x(k-N+1)]^T\}. \quad (3)$$

На практике точные значения параметров \mathbf{R}_N , \mathbf{r}_N определить невозможно, поэтому используют их оценки и упрощенные целевые функции.

При винеровском оценивании необходимо принять речевой и помеховый сигналы стационарными.

За многие годы теоретических исследований и практического применения адаптивной фильтрации выведено множество адаптивных алгоритмов. В данной работе рассмот-

рены три из них. Они опираются на оптимальное винеровское решение, но используют разные целевые функции и представляют собой итерационные процедуры [4].

2. Оценка алгоритмов адаптации

Критерии оценки

Прежде чем рассматривать конкретные алгоритмы адаптации, выделим критерии, по которым можно сравнить алгоритмы. Критерии должны учитывать как качество подавления помехи, так и сложность реализации алгоритма в реальной системе.

Критерием качества работы адаптивного алгоритма может служить *коэффициент подавления помехи*. Его определяют как разность отношений сигнал-шум (ОСШ) на выходе фильтра в установившемся режиме и на его входе, измеряя в децибелах (дБ):

$$\rho = \text{ОСШ}_{\text{вых}} - \text{ОСШ}_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Отношение сигнал-шум, также измеряя в децибелах, определяют как:

$$\text{ОСШ} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{сигнал, ср}}}{P_{\text{шум, ср}}} \right), \quad (5)$$

где $P_{\text{сигнал, ср}}$ и $P_{\text{шум, ср}}$ – средние мощности сигнала и шума в сигнально-шумовой смеси.

Вторым критерием примем *скорость сходимости* алгоритма адаптации к наилучшему вектору ВК, определяемую числом итераций $K_{\text{уст}}$ вычисления ВК до наступления установившегося режима. Этот критерий показывает, как быстро адаптивный алгоритм приспособливается к заданным условиям.

В качестве третьего критерия, связанного с реализацией адаптивного алгоритма в реальной системе, используем его *вычислительную сложность*. Чтобы данная оценка не зависела от конкретной программной или аппаратной реализации алгоритма, можно определить ее следующим образом. Проводится подсчет только векторных операций сложения и умножения, количество которых пропорционально размерности матриц и векторов. Одиночные операции сложения и умножения между парами чисел не учитываются. Более сложные операции подсчитываются отдельно. Операции считают для одной итерации алгоритма.

При сравнении алгоритмов адаптации важно учитывать эти критерии совокупно, что не всегда делается. Например, в [5] алгоритмы сравниваются по качеству их работы без учета скорости сходимости, в [6] не рассматривается вычислительная сложность.

Решая задачу подавления помех в речевых каналах систем управления, проведем сравнительный анализ алгоритмов LMS, NLMS, RLS с точки зрения возможности их применения. При этом исследуем зависимость результатов адаптивной фильтрации от следующих факторов:

- характера помехи,
- числа весовых коэффициентов фильтра,
- входного отношения сигнал-шум,
- попадания речевого сигнала на компенсационный вход подсистемы подавления.

LMS-, NLMS- и RLS- алгоритмы

В основе наиболее популярного адаптивного алгоритма – LMS (*Least Mean Square* – наименьший средний квадрат) – лежит целевая функция квадрата мгновенной ошибки $\xi = |e(k)|^2$. Ее относительная простота позволяет получить вычислительную процедуру, представленную в табл. 1. Приведенная в таблице оценка вычислительной сложности получена следующим образом. В первом действии процедуры имеет место умножение вектора-строки $\mathbf{h}_N^T(k-1)$ на вектор-столбец $\mathbf{x}_N(k)$ той же размерности, что требует N сложений и N умножений. Действие умножение вектора $\mathbf{x}_N(k)$ на число добавляет N умножений, а прибавление результата к вектору $\mathbf{h}_N(k-1)$ – еще N сложений. Одиночные операции не учитывались.

NLMS (*Normalized LMS*) – одна из разновидностей LMS-алгоритма. Характеристики алгоритма NLMS (процедура и вычислительная сложность) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики алгоритмов LMS, NLMS, RLS

Алгоритм	Вычислительная процедура (K – число итераций)	Вычислительная сложность
LMS	$e(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^T(k-1)\mathbf{x}_N(k),$ $\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + 2\mu \mathbf{x}_N(k) e(k),$ <p style="text-align: center;">где $k = 1, 2, \dots, K$, μ – шаг сходимости</p>	<p>2N сложений, 2N умножений</p>
NLMS	$e(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^T(k-1)\mathbf{x}_N(k),$ $\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \frac{2\mu}{\mathbf{x}_N^T(k)\mathbf{x}_N(k)} \mathbf{x}_N(k) e(k),$ <p style="text-align: center;">где $k = 1, 2, \dots, K$</p>	<p>3N сложений, 3N умножений, деление</p>
RLS	$\mathbf{g}_N(k) = \frac{\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)\mathbf{x}_N(k)}{\lambda + \mathbf{x}_N^T(k)\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)\mathbf{x}_N(k)},$ $\mathbf{R}_N^{-1}(k) = \lambda^{-1} [\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) - \mathbf{g}_N(k)\mathbf{x}_N^T(k)\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)],$ $e(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^T(k-1)\mathbf{x}_N(k),$ $\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mathbf{g}_N(k) e(k),$ <p style="text-align: center;">где $k = 1, 2, \dots, K$</p>	<p>2N² + 3N сложений, 3N² + 3N умножений, 1 деление</p>

В вычислительной процедуре этого алгоритма шаг сходимости переменный и параметр μ правильнее называть масштабирующим множителем. Как показано в [7], выбор оптимального μ зависит от числа итераций.

Алгоритм RLS (*Recursive Least Squares* – рекурсивные наименьшие квадраты) основан на минимизации целевой функции вида

$$\xi(k) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} |e(i)|^2, \quad (6)$$

где $e(i) = d(i) - y(i) = d(i) - \mathbf{h}_N^T(i)\mathbf{x}_N(i)$ – сигнал ошибки, а λ – коэффициент забывания. В отличие от винеровского подхода, где оценки параметров (2), (3) являются средними по реализациям, здесь процесс усредняют по времени, то есть, согласно (6), на каждой итерации алгоритма учитывают значения ошибок, полученные на всех k итерациях, включая текущую. Коэффициент забывания позволяет регулировать вклад предыдущих составляющих в оценку на текущей итерации [8]. Характеристики алгоритма представлены в табл. 1. В выражении вычислительной процедуры $\mathbf{R}_N^{-1}(k)$ – матрица, вычисляемая рекурсивно на каждой итерации, $\mathbf{g}_N(k)$ – вектор коэффициентов Калмана, являющийся по существу набором переменных шагов сходимости для каждого ВК.

В указанной оценке вычислительной сложности учтено, что произведение

$$\mathbf{x}_N^T(k)\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) = [\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)\mathbf{x}_N(k)]^T$$

и для его вычисления не требуются дополнительные арифметические операции. Более того, вычислительную сложность можно понизить до $1.5N^2 + 3,5N$ сложений, $2N^2 + 4N$ умножений и одного деления. Для этого можно воспользоваться свойством симметричности $\mathbf{R}_N^{-1}(k)$ и вычислять только элементы на ее главной диагонали и под или над ней.

3. Моделирование работы алгоритмов адаптации

Для моделирования работы адаптивных алгоритмов в речевом канале был использован пакет программ MATLAB 8.0 от компании MathWorks. В качестве речевого сигнала взят входящий в пакет файл *mtlb.mat* [9]. Данный сигнал был удлинен повторением, затем добавлена помеха. Полученная смесь пропущена через адаптивные фильтры, работающие с различными алгоритмами адаптации.

В качестве помехи были использованы модели четырех сигналов:

- белый шум;
- розовый шум;
- синусоидальный сигнал;
- нестационарный сигнал.

Последний сигнал – модель нестационарного процесса, предложенная в [10]. Она состоит, в частности, из синусоиды с переменной частотой и амплитудой. Для получения коррелированных $n_0(k)$ и $n_1(k)$ помеха пропущена через дополнительный фильтр первого порядка, как описано в [11].

Здесь и далее при моделировании (если не оговорено отдельно) число ВК $N = 16$, шаг сходимости LMS-алгоритма $\mu = 0.01$, NLMS-алгоритма – $\mu = 0.1$, коэффициент забывания в RLS-алгоритме $\lambda = 1$, начальные значения векторов нулевые. Помеха моделировалась как отдельный сигнал, поэтому попадание полезной составляющей на компенсационный вход исключено.

Были рассчитаны ОСШ и коэффициент подавления помехи согласно формулам (5) и (4). Построены зависимости ОСШ на выходе адаптивного фильтра от номера итерации алгоритмов, которые можно использовать для качественной оценки работы фильтров. Количественной оценкой является число итераций до перехода в установившийся режим $K_{уст}$ и коэффициент подавления помехи ρ . Началом установившегося режима считается момент, когда разность средних значений последней и предпоследней сотни отсчетов выходного ОСШ становится меньше, чем 10^{-5} дБ. На рис. 2 показаны зависимости ОСШ для трех алгоритмов при белом шуме на входе фильтра. Как видно, все алгоритмы сходятся почти с одинаковой скоростью, но LMS и NLMS примерно к одному и тому же значению, а RLS – к большему. Это доказывает лучшее качество подавления помех последним алгоритмом.

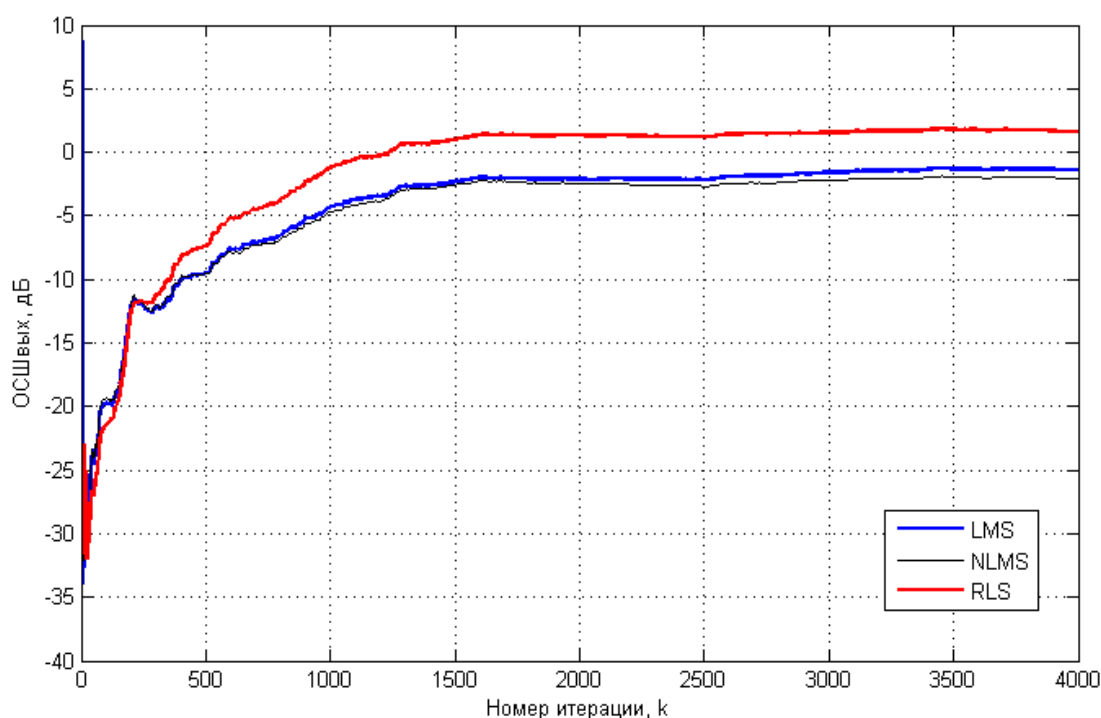


Рис. 2. Зависимость выходного ОСШ от номера итерации при белом шуме на входе

Количественные результаты по белому и остальным входным шумам сведены в табл. 2. Здесь указаны скорость сходимости и коэффициент подавления помехи в установившемся режиме. Значения для белого и розового шумов получены усреднением по десяти опытам.

LMS показывает большую скорость сходимости на белом шуме, NLMS – на остальных. Наивысший коэффициент подавления – у алгоритма RLS при первых трех шумах на входе. Этот же алгоритм показывает самую медленную сходимость, что отмечено и в [12]. Качество подавления у LMS- и NLMS-алгоритмов примерно одинаково. Также из табл. 2 видно, что наибольший коэффициент подавления соответствует синусоидальной помехе, а наибольшая скорость сходимости – розовому шуму.

Таблица 2. Результаты моделирования адаптивных алгоритмов

Помеха	LMS-алгоритм		NLMS-алгоритм		RLS-алгоритм	
	$K_{уст}, \text{итер.}$	$\rho, \text{дБ}$	$K_{уст}, \text{итер.}$	$\rho, \text{дБ}$	$K_{уст}, \text{итер.}$	$\rho, \text{дБ}$
Белый шум	5701	6,12	6463	6,23	8897	8,81
Розовый шум	5670	1,23	3679	1,44	7423	1,62
Синусоидальный сигнал	7673	21,91	3327	19,76	более 20000	37,51
Нестационарный сигнал	более 20000	23,94	8183	15,78	-	-

В целом значения в таблице говорят о невысоком подавлении помехи. Это связано со способом формирования $n_0(k)$ и $n_1(k)$ в данном эксперименте. Согласно [13], коэффициент корреляции между шумовой составляющей $n_0(k)$ и образцом шума $n_1(k)$ должен быть не менее 0,75 для качественной фильтрации.

Особый интерес представляет реакция алгоритмов на нестационарный сигнал. Как видно на рис. 3, в этом случае RLS-алгоритм расходится и не достигает установившегося режима. LMS-алгоритм сходится, но медленнее, чем NLMS.

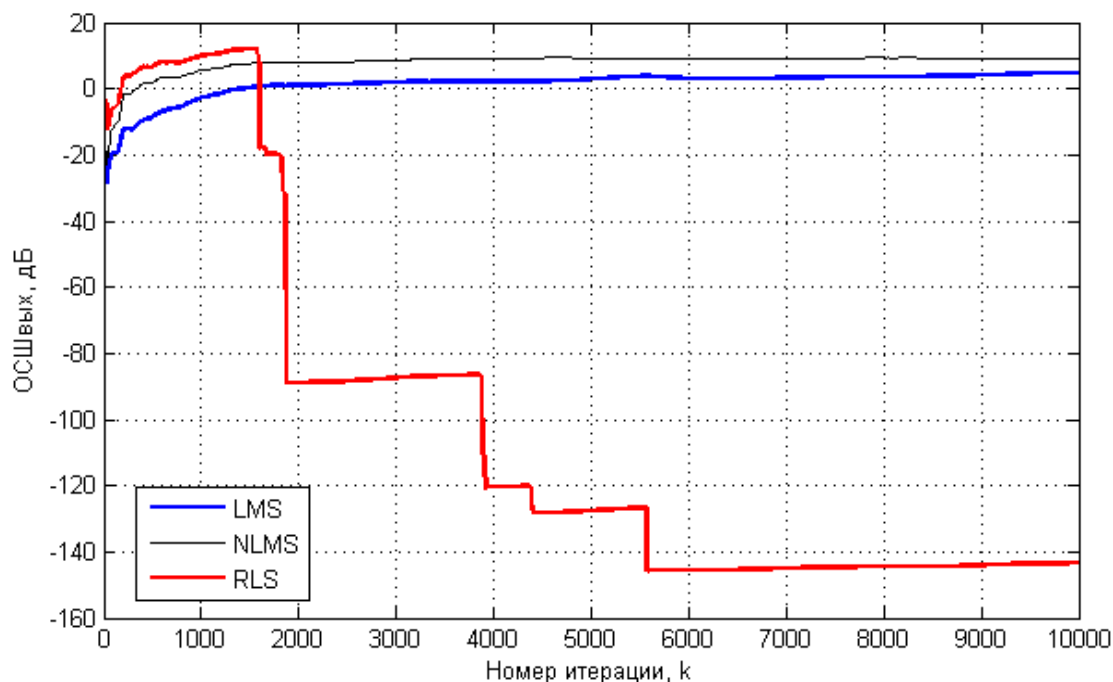


Рис. 3. Зависимость выходного ОСШ от номера итерации при нестационарном сигнале на входе

Чтобы выяснить, как количество ВК фильтра влияет на процесс адаптации, построим зависимости выходного ОСШ для RLS-алгоритма с разным числом ВК и белым шумом на входе. Полученные графики представлены на рис. 4. Видно, что с увеличением количества

ВК улучшается качество подавления помехи, однако также хорошо заметно, что начиная с $N = 32$ скорость сходимости падает. Следовательно, выбор фильтра с большим числом ВК не всегда оправдан. Следует учитывать и ресурсы платформы, на которой реализуется фильтр, как это сделано в [14].

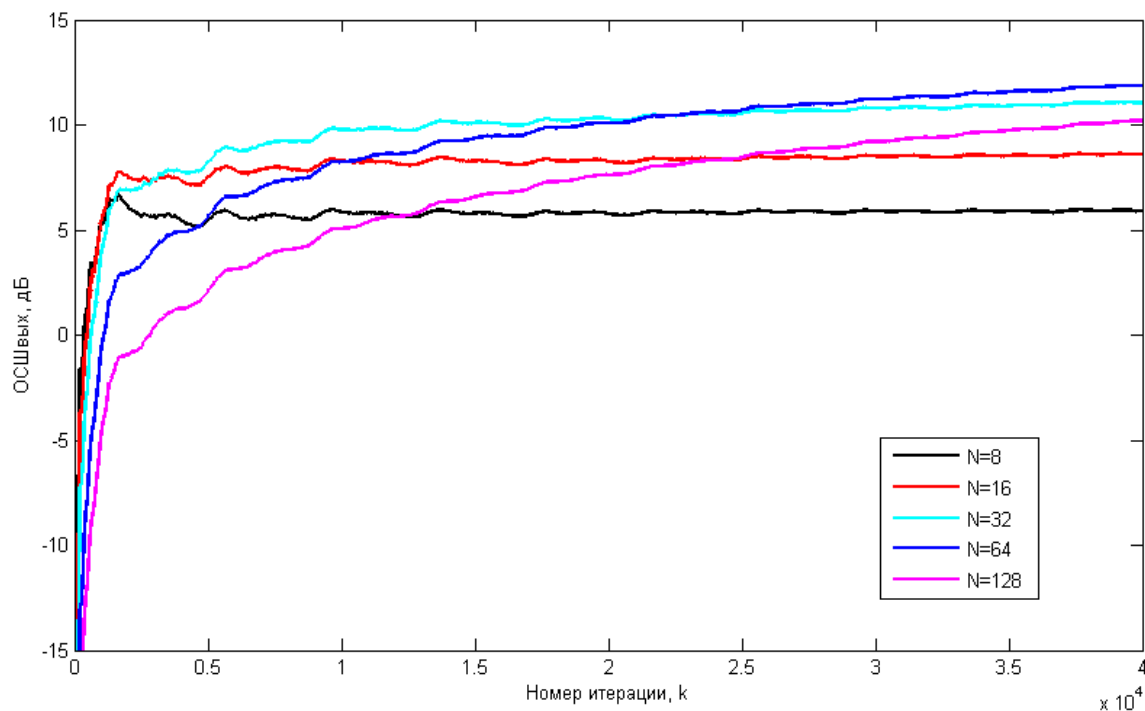


Рис. 4. Процесс адаптации при разном числе ВК на примере RLS-алгоритма

Теперь получим зависимость коэффициента подавления помехи от ОСШ во входной сигнально-шумовой смеси. Результаты такого моделирования для алгоритма LMS и белого шума представлены на рис. 5. Видно, что коэффициент подавления падает с ростом входного ОСШ. Это явление естественно, так как подавление малой помехи дает малое изменение ОСШ. Качество подавления также понижается и при росте шумовой составляющей. Анализ графика показывает, что наибольшее подавление происходит, если средние мощности речи и шума сравнимы.

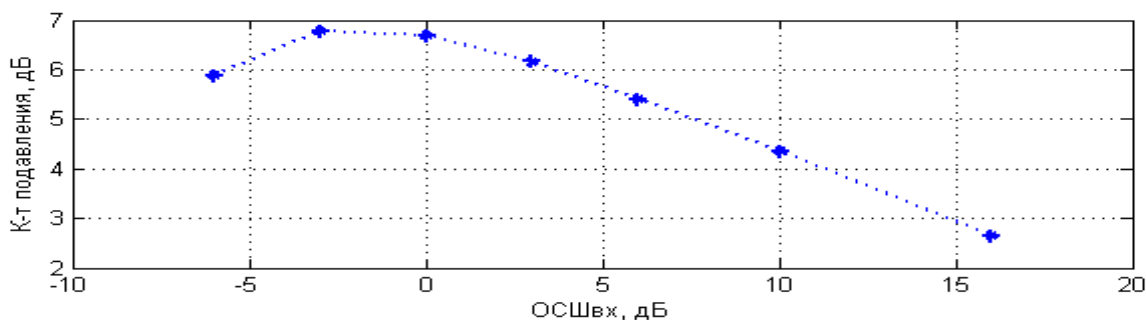


Рис. 5. Зависимость коэффициента подавления помехи от входного ОСШ на примере LMS-алгоритма

В реальной технической системе очень сложно исключить примесь речевого сигнала в образце помехи, поэтому полезная составляющая может быть несколько подавлена адаптивным фильтром. Было рассмотрено попадание речевой составляющей на компенсационный вход фильтра. Для этого образец шума был смешан с пропущенным через фильтр низких частот и приглушенным речевым сигналом. На рис. 6 показаны три графика выходного ОСШ для NLMS-алгоритма с различным ОСШ на компенсационном входе – $ОСШ_{обр}$. Здесь под сигналом понимается речевой сигнал, под шумом – образец помехи. Наилучший результат фильтрации получен при отсутствии речи на компенсационном входе (верхний график). С ростом $ОСШ_{обр}$ качество подавления падает.

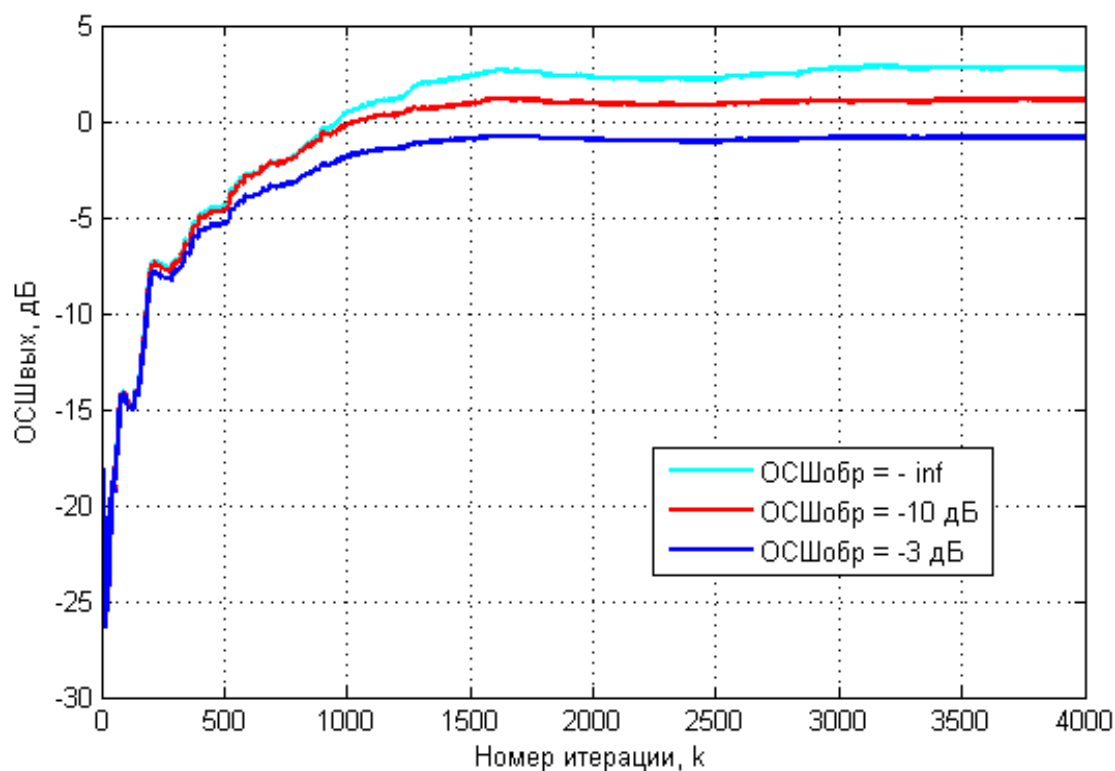


Рис. 6. Влияние речи на компенсационном входе на выходное ОСШ на примере NLMS-алгоритма

На графиках также видно, что появление речевого сигнала на компенсационном входе не влияет на скорость сходимости алгоритма.

Рассмотренный принцип шумоподавления, использующий исследованные адаптивные алгоритмы, может быть успешно реализован на современных микроконтроллерных платформах. Для этого требуются следующие устройства: цифровой сигнальный процессор, на котором будет выполняться программа адаптивной фильтрации, аналого-цифровой преобразователь или специальный аудиокодек, а также микрофоны как устройства захвата звука. Наличие в микропроцессоре контроллера прямого доступа к памяти позволит организовать параллельное выполнение пересылки блоков данных и их обработки, что необходимо для работы в реальном времени. Примером такой платформы может служить модуль TMS320C6416 DSK фирмы Texas Instruments, ядром которого является микропроцес-

сор TMS320C6416T. Проведенные с данным модулем эксперименты показали возможность его применения в качестве аппаратной части подсистемы подавления помех в речевых каналах технических систем.

Заключение

Проведенное моделирование работы трех алгоритмов адаптации в среде MATLAB с использованием моделей различных шумов, в том числе нестационарного, позволяет сделать следующие выводы:

- RLS достигает наибольшего коэффициента подавления стационарной помехи из трех рассмотренных выше алгоритмов, однако он обладает и наихудшей скоростью сходимости;
- алгоритм NLMS показывает лучшую сходимость по сравнению с LMS и схожее качество подавления помехи;
- LMS и NLMS лучше адаптируются к нестационарному шумовому сигналу, чем RLS;
- синусоидальная помеха подавляется качественнее, но медленнее, чем белый и розовый шум;
- увеличение количества ВК в адаптивном фильтре улучшает коэффициент подавления, но отрицательно влияет на скорость сходимости;
- коэффициент подавления уменьшается как с ростом ОСШ для входной сигнално-шумовой смеси, так и с его снижением, причем наибольшее подавление наблюдается при близких к нулю значениях входного ОСШ;
- попадание речевого сигнала на компенсационный вход снижает качество шумоподавления, но не влияет на скорость сходимости алгоритма.

Таким образом, результаты исследований демонстрируют общую тенденцию: ускорение сходимости алгоритма приводит к снижению его качества, и наоборот, повышение качества фильтрации влечет за собой замедление перехода в установившийся режим. При выборе алгоритма адаптации нужно выяснить, что приоритетнее – скорость или качество работы. В первом случае предпочтение следует отдать алгоритму NLMS, во втором – RLS. Также нужно помнить, что вычислительная сложность первого является линейной, а второго – квадратичной функцией числа ВК.

По результатам моделирования алгоритм NLMS можно рекомендовать к применению в технических системах управления, работающих в реальном времени, где скорость обработки сигнала имеет приоритет над качеством. Алгоритм RLS более подходит для систем, оперирующих записями звуковых сигналов. Подобные алгоритмы можно реализовать на платформах, содержащих микроконтроллеры с развитой архитектурой.

Список литературы

1. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
2. Адаптивные фильтры: пер. с англ. / ред. К.Ф.Н. Коуэн, П.М. Грант. М.: Мир, 1988. 392 с.
3. Сюзев В.В. Основы теории цифровой обработки сигналов: учебное пособие. М.: Издательство «РТСофт», 2014. 752 с.
4. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
5. Chinaboina R., Ramkiran D.S., Khan H., Usha M., Madhav B.T.P., Srinivas K.P., Ganesh G.V. Adaptive algorithms for acoustic echo cancellation in speech processing. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2011. Vol. 7(1). P. 38–42.
6. Kelebekler E., Inal M. White and color noise cancellation of speech signal by adaptive filtering and soft computing algorithms. *19th Australian joint conference on artificial intelligence (Hobart, Australia, December 2006): Proceedings*. Springer, 2006. P. 970–975.
7. Jagannaveen V., Prabakar T., Venkata Suman J., Devi Pradeep P. Noise suppression in speech signals using adaptive algorithms. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2010. Vol. 3, no. 3. P. 87–96.
8. Sahu A.K., Hiradhar A. Noise cancellation using adaptive filters of speech signals by RLS algorithm in Matlab. *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4, iss. 10. P. 1917–1920.
9. MATLAB Documentation. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/matlab> (дата обращения: 01.07.2016).
10. Дьяконов В. MATLAB R2011b в обработке сигналов и моделировании электронных устройств // Компоненты и технологии. 2012. №2. С. 111–120.
11. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
12. Полтавцева Е.В. Применение алгоритмов адаптивной фильтрации для обработки данных скважинных геоакустических измерений // Материалы 8-й региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки» (Петропавловск-Камчатский, 15 апреля 2014 г.). Петропавловск-Камчатский, 2014. С. 143–157.
13. Цуриков В.С. Корреляционный критерий сходимости адаптивных RLS и LMS алгоритмов для выделения на фоне помех сигналов с конечным спектром // Электрон. физико-технический журн. 2007. Т. 2. Режим доступа: <http://eftj.secna.ru/vol2/070204.pdf> (дата обращения: 01.07.2016).
14. Stasionis L., Serackis A. Selection of an optimal adaptive filter for speech signal noise cancellation using C6455 DSP. *Electronics and electrical engineering*. 2011, no. 9(115). P. 101–104. DOI: [10.5755/j01.eee.115.9.759](https://doi.org/10.5755/j01.eee.115.9.759)

Noise-Free Speech Channel Modeling for Technical Control Systems

B.I. Bychkov^{1,*}, A.S. Romanovskii¹,
V. Ya. Khartov¹

[*b102009@yandex.ru](mailto:b102009@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: speech channel, control system, adaptive filter, noise suppression, adaptation algorithm, MATLAB

The paper focuses on the application of digital adaptive filtering to ensure the noise-free speech channels of control systems. Noise is an extraneous signal, which enters the channel device input together with the speech. The article conducts a comparative analysis of the three adaptation algorithms (LMS, NLMS, RLS) to be useful for noise suppression. At the same time, an adaptive suppression mechanism with two microphones on the speech channel is used.

The related publications compared the algorithms by one or two criteria. This paper offers three comparison criteria: computational complexity, quality of noise suppression, and rate of convergence to the steady-state condition. The number of vector operations in algorithm procedures estimates temporary computational complexity.

To compare algorithms by the other two criteria, their implementation was simulated in MATLAB. As the noise, were used the white and pink noise, a sine wave, and a model of the non-stationary signal as well. The noise suppression coefficient and the number of iterations before transition to the steady-state condition have been obtained. The algorithm RLS showed the best quality of suppression while the NLMS algorithm revealed the highest rate of convergence. Experiments have shown that the white noise is suppressed worse, but faster than the sine one.

The paper explores influence of some factors on the process of adaptation. It is shown that increase in filter dimension leads to improving quality of adaptation and its speed-down. From simulation results it follows that the noise suppression coefficient has the highest values when at the filter input there are approximately equal signal and noise powers.

The results allow us to make commendation to use the NLMS algorithm for real-time systems, and the RLS one for technical systems aimed at recordings of speech signals. The above algorithms can be successfully implemented on modern technology platforms, comprising high-performance digital signal processors and associated peripherals.

References

1. Widrow B., Stearns S. Adaptive signal processing. *Prentice Hall*, 1985. (Russ. ed.: Uidrou B., Stirnz S. Adaptivnaia obrabotka signalov. Moscow, *Radio I sviaz' = Radio and Communications*, 1989. 440 p). [In Russian]
2. Adaptive filters / ed. C.F.N. Cowan, P.M. Grant. *Prentice Hall*, 1985. (Russ. ed.: Adaptivnyie fil'try / ed. C.F.N. Cowan, P.M. Grant. *Mir*. Moscow, 1988. 392 p.)
3. Syuzev V.V. Osnovy teorii tsifrovoi obrabotki signalov [Digital signal processing theory fundamentals]. *RTSoft Publ.* Moscow, 2014. 752 p. [In Russian]
4. Djigan V.I. Adaptivnaia filtratsiia signalov: teoria i algoritmy [Adaptive signal filtering: theory and algorithms]. *Tekhnosfera*. Moscow, 2013. 528 p. [In Russian]
5. Chinaboina R., Ramkiran D.S., Khan H., Usha M., Madhav B.T.P., Srinivas K.P., Ganesh G.V. Adaptive algorithms for acoustic echo cancellation in speech processing. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2011. Vol. 7(1). pp. 38–42.
6. Kelebekler E., Inal M. White and color noise cancellation of speech signal by adaptive filtering and soft computing algorithms. *19th Australian joint conference on artificial intelligence (Hobart, Australia, December 2006): Proceedings*. Springer, 2006. pp. 970–975.
7. Jagannaveen V., Prabakar T., Venkata Suman J., Devi Pradeep P. Noise suppression in speech signals using adaptive algorithms. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2010. Vol. 3, no. 3. P. 87–96.
8. Sahu A.K., Hiradhar A. Noise cancellation using adaptive filters of speech signals by RLS algorithm in Matlab. *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4, iss. 10. P. 1917–1920.
9. MATLAB Documentation. Available at: <http://www.mathworks.com/help/matlab>, accessed 19.10.2016.
10. D'iakonov V. MATLAB R2011b v obrabotke signalov i modelirovanii elektronnyh ustroystv [MATLAB R2011b in signal processing and electronic device modeling]. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2012, no. 2. pp. 111–120. [In Russian]
11. Sergienko A.B. Tsifrovaia obrabotka signalov [Digital signal processing]. 3rd ed. *BHV-Peterburg*. St. Petersburg, 2011. 768 p. [In Russian]
12. Poltavtseva E.V. The appliance of adaptive filtration algorithms for processing of the borehole geoaoustic measurements data. *Materialy 8 regional'noi molodiezhnoi nauchnoi konferentsii «Prirodnaia sreda Kamchatki» [Proceedings of the 8th regional youth conference "The natural environment of Kamchatka"] (Petropavlovsk-Kamchatsky, 15 April 2014)*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2014. pp. 143–157. [In Russian].
13. Tsurikov V.S. Korreliatsionnyi kriteriy skhodimosti adaptivnyh RLS i LMS algoritmov dlia vydeleniia na fone pomeh signalov s konechnym spektrom [Correlation convergence criterion of adaptive RLS and LMS algorithms for finite spectrum signal selection at a noise back-

ground]. *Elektronnyi fiziko-tekhnicheskiy zhurnal = Electronic physicotechnical journal*. 2007. Vol. 2. Available at: <http://eftj.secna.ru/vol2/070204.pdf>, accessed 19.10.2016. [In Russian]

14. Stasionis L., Serackis A. Selection of an optimal adaptive filter for speech signal noise cancellation using C6455 DSP. *Electronics and electrical engineering*. 2011, no. 9(115). P. 101–104. DOI: [10.5755/j01.eee.115.9.759](https://doi.org/10.5755/j01.eee.115.9.759)