

УДК 519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ВТОРИЧНОГО КАНАЛА СИСТЕМ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ШУМА

С. Г. Семенцов,

канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Кратко рассмотрены методы моделирования передаточных функций вторичного канала для систем активного гашения шума. Проведен анализ влияния параметров цифрового фильтра, аппроксимирующего передаточную функцию, и используемых для процедуры идентификации алгоритмов на адекватность получаемой модели.

Ключевые слова – активное гашение шума, передаточная функция вторичного канала, адаптивные алгоритмы.

Создание эффективной системы активного гашения (САГ) шума требует решения двух задач — физической (акустической) и технической. В результате решения акустической задачи определяется необходимое число электроакустических преобразователей системы, а также места их оптимального расположения. Техническая задача заключается в разработке алгоритма управления системой, исходя из характеристик сигналов первичных источников и характеристик передаточной функции (ПФ) объекта управления. Руководствуясь этими требованиями, для гашения акустических полей чаще всего используют классические, оптимальные или адаптивные САГ [1].

В классических системах с управлением по возмущению и отклонению параметры блока управления рассчитываются на основе априорной информации о характеристиках объекта управления. При наличии достаточно адекватной модели ПФ объекта управления, а также при выполнении следующих условий:

- неизменности ПФ объекта управления;
- высокой пространственной однородности ПФ;
- неизменности и стационарности входного воздействия

— эффективные САГ могут быть реализованы и по неадаптивной схеме. Для реальных объектов эти требования выполняются лишь для узкого класса систем, например для САГ шума трансформаторов.

В более совершенных оптимальных системах на основе априорной информации о характеристиках объекта управления, сигналах возбуждения и сигналах исходного поля в точках контроля вычисляются такие параметры, которые минимизируют некоторый выбранный критерий управления, например мощность остаточного поля. Априорная информация здесь более полна, поэтому оптимальные системы превосходят по эффективности классические.

Если в процессе работы характеристики объекта управления изменяются в широких пределах, то классические и оптимальные системы становятся малоэффективными. Одним из путей преодоления неполноты априорной информации является применение принципа адаптации. При этом в системе автоматически в ходе ее работы происходит накопление текущей информации об изменяющихся характеристиках объекта управления и возмущающих воздействиях и соответствующая перестройка параметров устройства управления в целях постоянного поддержания в системе максимальной эффективности компенсации.

По сути, в процессе адаптации происходит непрерывная идентификация ПФ объекта управления для заданного входного воздействия. В зарубежной литературе чаще используется определение ПФ вторичного канала (Secondary Path Transfer Function), включающей в себя помимо ПФ

среды распространения также и параметры используемых в системе излучателей и приемников [2].

Для САГ шума в помещениях определение ПФ объекта управления позволяет значительно повысить эффективность гашения. Во-первых, за счет задания массива ненулевых начальных значений перестраиваемого адаптивного фильтра позволяет существенно сократить время адаптации. Во-вторых, дает возможность реализовать ПФ в виде неперестраиваемого цифрового фильтра, соединенного последовательно с коротким адаптивным фильтром, отслеживающим только изменения ПФ и входного воздействия. Такой подход реализован в модифицированном алгоритме наименьших средних квадратов, называемом *filtered-x LMS (FXLMS)* алгоритм и широко используемом при построении САГ шума в помещениях [2].

Передаточная функция в частотной области для заданного расположения пары источник/приемник в произвольном помещении в общем случае может быть получена двумя путями: численным моделированием, например методами конечно-элементного и гранично-элементного анализа, и экспериментально в процессе идентификации объекта управления при случайном входном воздействии методами онлайн- и оффлайн-моделирования [3].

В оффлайн-режиме необходимо экспериментальное определение реакции объекта управления $y(n)$ на случайное входное воздействие $x(n)$ при заданном расположении пары источник/приемник. Далее для сигналов $x(n)$ и $y(n)$ может быть проведена процедура идентификации ПФ, при которой обычно используется адаптивный алгоритм наименьших средних квадратов (НСК) (рис. 1).

В данной модели в процессе настройки адаптивного алгоритма формируется модель ПФ, ре-

ализованная в виде цифрового фильтра (блок *Digital Filter*).

Вместе с тем ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не приводятся результаты анализа влияния размерности цифрового фильтра, аппроксимирующего ПФ помещения, и адаптивного алгоритма, используемого в процедуре идентификации, на адекватность получаемой модели.

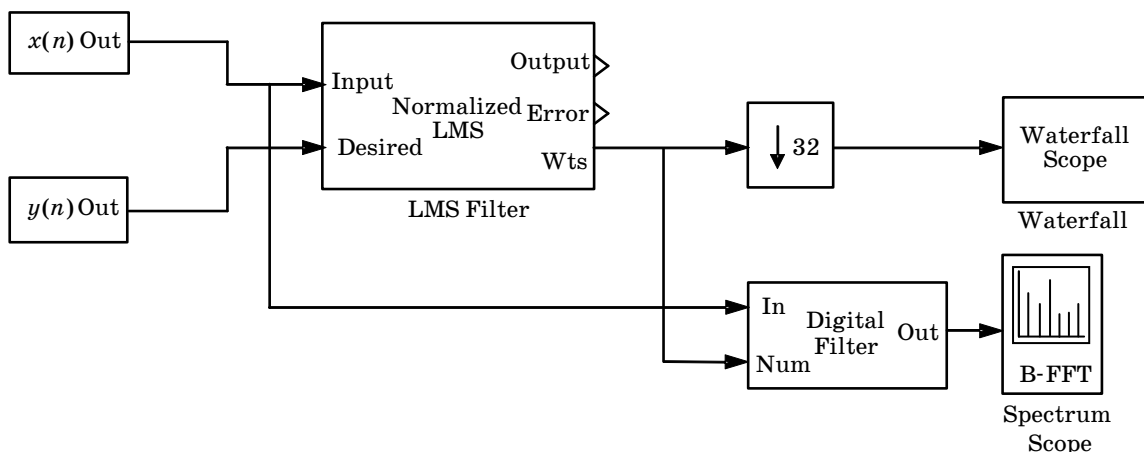
При анализе размерности цифрового фильтра необходимо учитывать некоторые принципиальные ограничения, накладываемые характером работы САГ в целом. Например, частотный диапазон работы САГ в помещении, как правило, находится в пределах так называемой модальной зоны. В модальной зоне от первой аксиальной

моды $f_1 = \frac{340}{2l}$ до $f_2 \approx 2160 \sqrt{\frac{RT60}{V}}$ ПФ вторично-

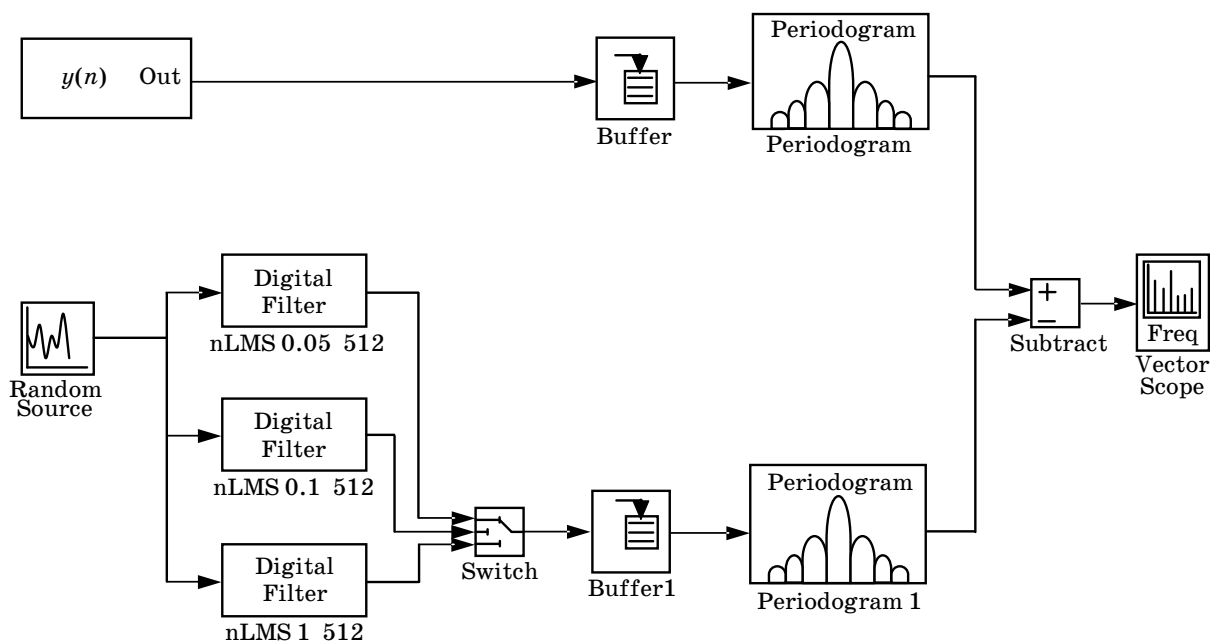
го канала определяется собственными модами помещения и описывается с помощью модального анализа. Частота f_2 , называемая частотой Шредера, определяет максимальную частоту, которая может быть адекватно описана с помощью модального анализа [4]. Выше этой частоты модальная плотность настолько велика, что спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала $y(n)$ становится практически равномерной.

Таким образом, модель вторичного канала должна адекватно описывать ПФ в пределах частотного диапазона от f_1 до f_2 , что позволяет существенно сократить порядок фильтра, аппроксимирующего модель, за счет снижения его тактовой частоты до $2f_2$.

Для определения необходимого порядка фильтра и шага адаптации в помещении объемом 100 м^3 для произвольной точки были экспериментально получены сигналы $x(n)$ и $y(n)$ и далее проведена процедура идентификации с использованием *nLMS*-, *LMS*- и *RLS*-алгоритмов. Исходя из



■ Рис. 1. Модель в среде MATLAB для идентификации ПФ



■ Рис. 2. Модель в среде MATLAB для оценки адекватности синтезированных моделей в частотной области

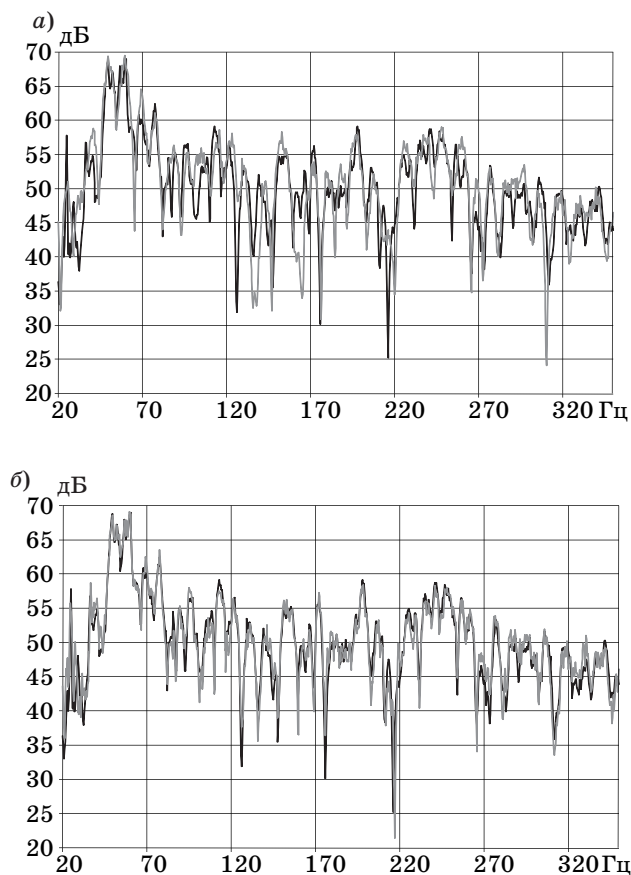
приведенных выше соображений для данного помещения тактовая частота адаптивных фильтров была выбрана равной 800 Гц.

Для проведения сравнительного анализа адекватности формируемых моделей порядок адаптивных фильтров варьировался в пределах от 128 до 1024 коэффициентов в диапазоне значений шага адаптации μ от 1 до 0,05 для nLMS-алгоритма и диапазоне оценки дисперсии входного сигнала (initial input variance estimate) $\hat{\sigma}^2$ от 0,05 до 1 для RLS-алгоритма. При использовании LMS-алгоритма без нормализации сходимость сохраняется при $\mu < 0,2$, поэтому моделирование проводилось для значений $\mu = 0,05$ и $\mu = 0,1$.

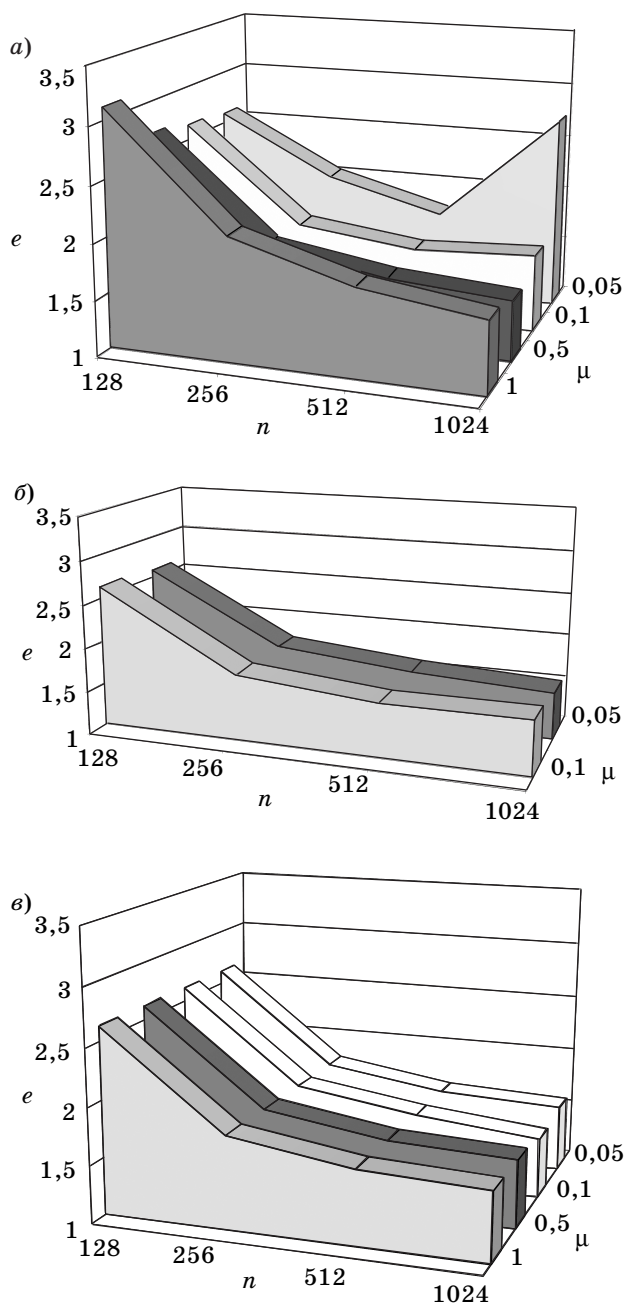
На первом этапе оценивалась максимальная неравномерность СПМ сигнала ошибки $e(n)$ (выход Error адаптивного фильтра на рис. 1). В данном случае неравномерность СПМ ошибки варьируется в пределах от 5 до 25 дБ, что является неприемлемым результатом для формирования адекватной модели вторичного канала. Однако, как показали дальнейшие исследования, неравномерность СПМ сигнала ошибки $e(n)$ не является определяющей при оценке адекватности формируемых моделей.

На втором этапе была разработана модель в среде MATLAB, позволяющая непосредственно оценить ошибку между полученным экспериментально сигналом $y(n)$ и откликом синтезированной модели в частотной области (рис. 2).

Сравнение модели вторичного канала, полученной с помощью nLMS-алгоритма и описываемой цифровым фильтром длиной 128 коэффици-



■ Рис. 3. Оценка адекватности модели, полученной с помощью: а — nLMS-алгоритма при $\mu = 1$ и $n = 128$; б — nLMS-алгоритма при $\mu = 1$ и $n = 1024$; — — — — отклик помещения; - - - - отклик модели



■ **Рис. 4.** Обобщенная зависимость усредненной амплитуды сигнала ошибки от величины μ и порядка n адаптивного n LMS-фильтра (а), LMS-фильтра (б) и RLS-фильтра (в)

ентов, с сигналом $y(n)$ приведено на рис. 3, а. При длине фильтра в 128 коэффициентов точность моделирования явно недостаточна. Частотная характеристика носит упрощенный характер, амплитуды частотных компонент переданы со значительными ошибками. Ошибка по амплитуде достигает 10 дБ, а по частоте — 10 Гц.

При увеличении порядка аппроксимирующего фильтра до 1024 коэффициентов получаемая модель вполне адекватна, ошибки по амплитуде не превышают 4 дБ и 1 Гц по частоте (рис. 3, б).

Минимальная амплитуда ошибки достигается при величине $0,7 < \mu < 0,5$ и порядках n LMS-фильтра в диапазоне от 256 до 1024 коэффициентов (рис. 4, а).

Для LMS-алгоритма без нормализации полученная зависимость практически идентична n LMS-алгоритму с $\mu = 0,5$ (рис. 4, б). Проведенный анализ адекватности моделей, полученных с помощью RLS-алгоритма, показал, что амплитуда ошибки не зависит от величины $\hat{\sigma}^2$ и определяется лишь длиной аппроксимирующего фильтра (рис. 4, в).

Исходя из полученных данных и ограничений, возникающих при практической реализации фильтров высоких порядков в системах цифровой обработки реального времени, можно сделать следующие выводы:

- для формирования адекватной модели вторичного канала необходим адаптивный цифровой фильтр длиной 256–512 коэффициентов. Применение фильтра длиной 256 коэффициентов является более предпочтительным, поскольку при незначительном увеличении ошибки позволяет существенно снизить требования к аппаратному обеспечению системы;
- для проведения процедуры идентификации могут быть использованы LMS- и RLS-алгоритмы при одинаковой адекватности получаемых моделей. Применимость n LMS-алгоритма сильно зависит от величины μ и требует для получения достоверных результатов проведения нескольких итераций.

Литература

1. Семенцов С. Г., Шахнов В. А., Власов А. И. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 4. С. 3–23.
2. Elliott S. Signal Processing for Active Control. Academic Press, 2000. 511 p.
3. Семенцов С. Г. Моделирование передаточной функции вторичного канала систем активного гашения шума // Информационно-управляющие системы. 2008. № 4. С. 18–22.
4. Everest F. A. Master Handbook of Acoustics. Fourth Edition. McGraw-Hill, 2000. 592 p.