

# **АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ - СЛОЖИВШЕЕСЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

**В. И. Джиган**

Государственное унитарное предприятие города Москвы Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы», Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Москва, Россия

Сегодня цифровая обработка сигналов (ЦОС) повсеместно заменяет традиционную аналоговую обработку, базирующуюся на использовании катушек индуктивности, конденсаторов и резисторов, характеристики которых меняются со временем и при изменении температуры. Этих недостатков лишены устройства ЦОС, что делает такие устройства привлекательными на этапах их проектирования, производства и эксплуатации. Адаптивная фильтрация сигналов - это одно из направлений в современной ЦОС, имеющее важное прикладное значение для радиотехники, связи, а также информационных технологий.

Зарождение адаптивной обработки сигналов в современном ее понимании восходит к концу 50-х годов [1], когда Б.Уидроу разработал и предложил для практического использования простейший градиентный алгоритма по критерию наименьшего квадрата (Least Mean Square, LMS), ставший на многие годы «рабочей лошадкой» в области адаптивной фильтрации. Этому событию предшествовали работы в области оптимального оценивания, проводимые в первой половине 20-го столетия Винером, Колмогоровым, Левинсоном, Крейном и рядом других ученых [2]. Их работы, в свою очередь, базировались на достижениях таких ученых как Ньютон (метод касательных), Гаусс (метод наименьших квадратов) и другие.

В основе большинства адаптивных устройств находится адаптивный цифровой фильтр, весовые коэффициенты, которого вычисляются в процессе работы (настройки), на основании чего считается, что такой фильтр приспособливается или адаптируется к условиям своего функционирования. Необходимость использования именно адаптивных фильтров обычно обусловлена либо априорной неопределенностью относительно условий функционирования, либо тем, что эти условия могут меняться.

Примерами широко используемых на практике адаптивных устройств являются адаптивные антенные решетки, компенсаторы эхосигналов,

эквалайзеры (выравниватели) характеристик каналов связи и ряд других устройств. Сегодня эти устройства являются неотъемлемыми элементами оборудования систем связи, радио- и гидролокации, тактико-технические характеристики которых часто недостижимы без использования адаптивной обработки сигналов.

Действительно, как в радиоприемнике подавить помеху, спектр которой перекрывается со спектром полезного сигнала, который в общем случае может не иметь структурных особенностей, позволяющих выделить этот сигнал из смеси с шумом? Такое разделение можно осуществить за счет различий пространственного положения источников полезного сигнала и источников помех, и оно осуществляется с помощью перестраиваемого пространственного фильтра - адаптивной антенной решетки, формирующей провалы в диаграмме направленности в заранее неизвестных направлениях на источники помех [3].

Сигналы акустического эха являются помехами, ухудшающими качество устройств громкоговорящей голосовой связи и оборудования озвучивания помещений (театральные залы, залы совещаний и др.). Эти помехи можно подавлять с помощью адаптивных акустических эхокомпенсаторов. Эхосигналы также возникают в системах проводной связи при разделении двунаправленных сигналов на однонаправленные. Эхосигналы ухудшают качество принимаемой речи или уменьшают предельную скорость приема цифровых данных [4]. Подавление электрических эхосигналов также осуществляется с помощью адаптивных электрических эхокомпенсаторов.

Межсимвольная интерференция является источником помех в каналах связи с ограниченной полосой пропускания. Для достижения высоких скоростей передачи данных в таких каналах эта помеха также должна быть подавлена, что осуществляется с помощью адаптивных эквалайзеров [5].

Перечисленные, а также ряд других адаптивных устройств, продемонстрировавших свою эффективность и незаменимость на практике, а также многолетние теоретические наработки позволяют считать адаптивную фильтрацию или в более широком смысле адаптивную обработку сигналов сложившимся научно-техническим направлением, которое постоянно развивается специалистами во всем мире.

Сегодня результаты этого развития демонстрируются огромным разнообразием радиоэлектронных продуктов, предлагаемых на мировом рынке, в которых используются адаптивные устройства, а также огромным числом научно-технических публикаций (статьи в журналах и трудах конференций, патенты), число которых по разным оценкам уже

превосходит десятки тысяч). Вопросы адаптивной обработки сигналов также рассматриваются в ряде специализированных книг. Некоторые из таких книг в 80-х годах были изданы на русском языке [6-10].

Развитию адаптивной обработки сигналов способствует и то, что она становится одной из преподаваемых технических дисциплин. Как правило, эту дисциплину преподают в тех западных университетах, где ведутся соответствующие научные исследования, т.е. имеются соответствующие специалисты.

В ряде университетов России в рамках курсов по ЦОС также уже частично рассматриваются вопросы адаптивной фильтрации сигналов, а начиная с 2009 года впервые в Московском государственном институте техники (техническом университете) преподается специализированная дисциплина «Адаптивная обработка сигналов». В ее рамках сегодня рассматриваются следующие вопросы:

1. Введение в адаптивную фильтрацию.
2. Оператор комплексного градиента и его применение в теории адаптивной фильтрации.
3. Основы адаптивной фильтрации.
4. Поиск винеровского решения.
5. Градиентные адаптивные алгоритмы и их свойства.
6. Рекурсивная адаптивная фильтрация по критерию наименьших квадратов.
7. Быстрые рекурсивные адаптивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов.

В дальнейшем планируется рассматривать такие вопросы как:

1. Рекурсивная адаптивная фильтрация по критерию наименьших квадратов на базе прямого и обратного QR-разложения.
2. Уменьшение вычислительной сложности рекурсивных алгоритмов адаптивной фильтрации по критерию наименьших квадратов.
3. Линейно-ограниченная адаптивная фильтрация.
4. Лестничные адаптивные фильтры.
5. Многоканальные адаптивные фильтры.
6. Адаптивная фильтрация нестационарных сигналов.
7. Параллельные алгоритмы по критерию наименьших квадратов.
8. Адаптивные алгоритмы аффинных проекций.
9. Слепые алгоритмы адаптивной фильтрации.

Важность освоения адаптивной обработки сигналов современными инженерами осознается и лидирующими компаниями-производителями моделирующего программного обеспечения. Так в известном продукте MATLAB компании Mathworks уже давно используются функции

различных адаптивных фильтров [11], а компания National Instruments в своем продукте LabVIEW 2009 также разработала приложение «LabVIEW Adaptive Filter Toolkit», куда пока входит небольшое число адаптивных фильтров на базе популярных градиентных алгоритмов адаптивной фильтрации и рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов. Демонстрационные приложения, сопутствующие описанию этих фильтров: подавление шума, активная компенсация шума, идентификация неизвестной линейной системы, эхокомпенсация, обратное управление и выравнивание канала связи, - позволяют потенциальным потребителям технологии адаптивной фильтрации «ощутить ее прелесть и незаменимость» [12].

Сегодня адаптивная обработка сигналов также является одним из направлений научно-технической деятельности российского предприятия «ЭЛВИС», г. Москва. Результаты проводимых здесь работ в области адаптивной фильтрации воплощены в постоянно пополняемой прикладной библиотеке [13] для СБИС цифровых сигнальных процессоров отечественной серии «Мультикор» [14]. Эта библиотека сегодня насчитывает несколько сотен математических и программных прототипов различных алгоритмов адаптивной фильтрации и является коммерческим продуктом, пользующимся спросом у потребителей сигнальных процессоров серии «Мультикор».

Таким образом, можно констатировать, что адаптивная обработка сигналов развивается не только в западном мире, но и в российских университетах, а также используется в изделиях, разрабатываемых и выпускаемых промышленными предприятиями России. Это свидетельствует о необходимости преподавания одноименной дисциплины или родственных дисциплин в технических университетах для студентов, специализирующихся в радиотехнике, связи и автоматическом управлении. Освоение этой области знаний позволит инженерам не только применять готовые решения на базе адаптивной обработки сигналов в виде технической продукции, поступающей из-за рубежа, но и развивать данное научно-техническое направление в своей будущей практической деятельности на Родине.

Адаптивная обработка сигналов - это не только уже сложившееся, но и постоянно развивающееся научно-техническое направление. Среди направлений в адаптивной фильтрации, требующих дальнейшего развития можно выделить такие направления как адаптивные фильтры с бесконечной импульсной характеристикой, субполосные адаптивные фильтры, «слепые» адаптивные фильтры, адаптивных фильтры в целочисленной и модулярной арифметиках, устойчивость быстрых

адаптивных фильтров и ряд других. Современная цифровая элементная база, развивающаяся благодаря достижениям микроэлектроники, позволяет создавать компактные высокопроизводительные устройства ЦОС, с помощью которых теоретические решения перечисленных задач в недалеком будущем будут воплощены в радиоэлектронных изделиях, обеспечивающих передачу, прием и хранение всевозрастающих информационных потоков.

### Литература

1. *Widrow, B.* Thinking about thinking: the discovery of the LMS algorithm - DSP history // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22. № 1. P. 100-106.
2. *Sayed, A. H.* Adaptive filters // NJ, Hoboken : John Wiley and Sons, Inc. 2008.
3. *Hudson, J. E.* Adaptive array principles // England, Loughborough: Peter Peregrinus Ltd. 1981.
4. *Messerschmitt, D.* Echo cancellation in speech and data transmission // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1984. Vol. 2. № 2. P. 283-297.
5. *Qureshi, S.* Adaptive equalization // IEEE Communications Magazine. 1982. Vol. 20. № 2. P. 9-16.
6. *Коуэн, К. Ф.* Адаптивные фильтры / Пер. с англ. Н. Н. Лихацкой. М. : Мир, 1988.
7. *Уидроу, Б.* Адаптивная обработка сигналов / Пер. с англ. под ред. В. В. Шахгильдяна. М. : Радио и связь, 1989.
8. *Журавлев, А. К.* Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках / А. К. Журавлев, А. П. Лукошкин, С. С. Поддубный Л. : Издательство Ленинградского университета, 1983.
9. *Монзинго, Р. А.* Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Пер. с англ. В. Г. Челпанова, В. А. Лексаченко. М. : Радио и связь, 1986.
10. *Пистолькорс, А. А.* Введение в теорию адаптивных антенн / А. А. Пистолькорс, О. С. Литвинов. М. : Наука, 1991.
11. *Сергиенко, А. Б.* Алгоритмы адаптивной фильтрации : особенности реализации в MATLAB / Exponenta Pro : математика в приложениях. 2003. № 1. С. 18-28.
12. *Джиган, В. И.* Адаптивные фильтры: теории и практика // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». (Российский университет дружбы народов, 20-21 ноября 2009 г.). Москва, 2009. С. 310-313.
13. *Джиган, В. И.* Прикладная библиотека адаптивных алгоритмов // Электроника : наука, технологии, бизнес. 2006. № 1. С. 60-65.
14. *Солохина, Т.* Сигнальные контроллеры компании «ЭЛВИС» : первая линейка отечественных DSP / Т. Солохина, Ю. Александров, Я. Петричкович // Электроника : наука, технологии, бизнес. 2005. № 7. С. 70-77.
15. *Джиган, В. И.* Адаптивные фильтры и их приложения в радиотехнике и связи // Современная электроника. 2009. № 9. С. 56-63 (часть 1); 2010. № 1. С. 72-77 (часть 2); 2010. № 2. С. 70-77 (часть 3).