

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП подавления эхосигналов

С.Душин, инженер-программист ГК "Натекс" / S.Dushin@inbox.ru,
В.Коршунов, профессор МТУСИ

УДК 621.391 (091), DOI: 10.22184/2070-8963.2017.68.7.58.62

Рассмотрены предпосылки развития и применения теории компенсации эхосигналов; представлен обзор наиболее важных областей применения соответствующей техники; дана картина развития методов адаптивной фильтрации, применяемых в задачах компенсации эхосигналов.

ВСЕ НАЧАЛОСЬ С ТЕЛЕФОНИИ

Начальный этап развития техники компенсации эхосигналов неразрывно связан с телефонией. Это обусловлено тем, что исторически первой проблемой, вызванной негативным влиянием эхосигналов в телекоммуникациях, является мешающее воздействие на абонентов эффекта электрического эха в телефонных каналах связи.

Небезынтересно отметить, что достаточно продолжительное время эффект электрического эха не был существенной проблемой для телефонии. Так, условной отправной точкой истории телефонии можно считать 14 февраля 1876 года – дату патентования первого телефонного аппарата шотландским изобретателем Александром Беллом. При этом проблема эффекта эха остро встала перед исследователями только к 50-м годам 20 века.

На ранних этапах развития телефонной сети отсутствие заметного влияния эффекта электрического эха для абонентов обусловлено тем, что тракты телефонной передачи были пассивными, то есть без промежуточных усилительных элементов. Это, в свою очередь, гарантировало: относительно небольшую задержку в трактах передачи из-за ограничения дальности передачи по затуханию; отсутствие значительного уровня электрических эхосигналов из-за отсутствия переходов между двух- и четырехпроводными участками тракта; затухание эхосигналов, сформированных в акустическом эхотракте. Отдельно важно отметить, что задержка эхосигнала играет

критическую роль в негативном воздействии эха на говорящего абонента. Заметность и мешающее воздействие возрастают по мере роста задержки эхосигнала. Условной границей можно считать значение задержки эхосигнала, равное 50 мс.

Однако к середине 20-го столетия общий процесс развития телефонных сетей и широкое применение достижений усилительной техники в них создают предпосылки для актуализации проблемы эффекта эха. Каковы причины их возникновения?

Во-первых, поскольку усилители являются однонаправленными устройствами, для промежуточного усиления сигналов потребовалось разделить направления передачи сигналов на соответствующих участках сети. Иными словами, участки сети с усилением необходимо было организовать как четырехпроводные каналы связи. Вполне естественно, что эти участки располагались в магистральной части сети между автоматическими коммутационными станциями (АТС), в кабельных системах передачи и т.д. При этом подключаемые к АТС абонентские окончания по экономическим и историческим причинам остались двухпроводными. Это привело к тому, что типовой тракт передачи телефонного сигнала состоит из двух- и четырехпроводных участков, сопряжение которых осуществляется при помощи дифференциальных систем. Эти сопряжения, как известно, по сей день являются основными источниками электрической составляющей эхосигнала в классических телефонных сетях общего пользования (ТфОП).

Во-вторых, вполне естественно, что возможность промежуточного усиления сигнала кардинально увеличила допустимую протяженность тракта передачи телефонных каналов и сняла критически важное ограничение для объединения локальных телефонных сетей в единую сеть. Этот процесс привел к постепенному формированию трактов передачи большой протяженности, в которых может сформироваться значительная для психофизического восприятия человеком задержка эхосигналов. В качестве примера можно привести первый трансатлантический телефонный кабель, который был введен в эксплуатацию в 1956 году и соединил европейскую и североамериканскую телефонные сети.

Эволюция противостояния ЭХОСИГНАЛАМ

Первые попытки решить проблему мешающего воздействия эхосигналов привели к созданию метода загораживания, который начинает свое развитие в 50-е годы 20-го столетия. Относительно простой принцип загораживания поначалу вполне эффективно справлялся с задачей устранения эффекта эха при относительно небольших задержках сигнала, характерных для "наземной" телефонии [9]. Однако успехи в космической отрасли в 50-60-х годах порождают новую амбициозную задачу в мире телекоммуникаций – телефонная передача по спутниковым каналам связи с типовыми задержками эхосигнала порядка 500-700 мс (для геостационарной орбиты). Такие задержки значительно изменяют динамику телефонного разговора, что приводит к проблематичности внедрения принципа эхозагораживания в подобных каналах. Именно эта проблема стала исторически первой мотивацией для разработки и имплементации компенсационных методов подавления эхосигналов [9].

Первая аналоговая реализация эхокомпенсатора была выполнена в 1966 году коллективом инженеров компании Bell Labs. Среди них следует выделить американского исследователя индийского происхождения Мэна Сондхи, чья роль в данной работе была ключевой. Важно также отметить, что в первом эхокомпенсаторе был применен метод наименьших средних квадратов (МНСК) с некоторыми модификациями, которые были продиктованы аналоговой реализацией устройства. Алгоритм МНСК был разработан и исследован в середине 50-х годов американским ученым в области электротехники Бернардом Уидроу [11].

С момента первой практической реализации эхокомпенсатора до настоящего времени техника

компенсации эхосигналов пережила достаточно интенсивный период развития, находя все новые области применения. Знаковым событием в этом процессе является выпуск первого коммерческого эхокомпенсатора компанией COMSAT TeleSystems в начале 80-х годов. Это событие открыло эру коммерческого производства эхокомпенсаторов.

Бурное развитие телекоммуникационных технологий в период 80-90-х годов 20 века породило целый ряд масштабных задач для техники подавления эхосигналов. Так, развитие сотовой связи и ее последующая конвергенция с сетями ТФОП приводит к проблеме мешающего воздействия эффекта эха при организации соединения между мобильными и стационарными абонентами. Используемые в стандарте GSM алгоритмы кодирования речи вносят значительную задержку (концевая задержка для эхосигнала в сетях GSM может достигать значений более 200 мс), что делает возможные эхосигналы в сети ТФОП заметными для абонентов. Поэтому в такого рода соединениях применение средств подавления эхосигналов является обязательным.

С конца 90-х годов перед техникой подавления эхосигналов стоит задача подавления эффекта электрического эха при передаче речевого сигнала по сетям пакетной коммутации (технологии VoEth, VoIP и т.д.). В случае VoIP-телефонии концевая задержка эхосигнала составляет от 50 до 300 мс при внутрисетевом соединении и может достигать 800 мс при соединении между сетями. Так же, как и в мобильных сетях, в технологии VoIP отсутствуют главные источники электрического эха – дифференциальные системы, а сам канал является логически четырехпроводным. Однако проблема электрического эха возникает при подключении к сети двухпроводных телефонных аппаратов, предназначенных для работы в сетях ТФОП через конвертеры интерфейсов FXS-Eth (FXS-IP) или при установлении соединения с абонентами в сетях ТФОП через VoIP-шлюз. Более того, в VoIP-телефонии важную роль играет проблема акустического эха, поскольку абоненты зачастую используют для общения звуковые колонки и микрофоны, то есть, фактически, режим громкой связи. По состоянию на сегодня проблема эха в VoIP-телефонии вполне успешно решается при помощи встроенных в оборудование эхокомпенсаторов, зачастую реализованных исключительно программными средствами.

Начиная с 90-х годов техника компенсации эхосигналов начала находить применение для компенсации эхосигналов при передаче неречевых

сигналов. Пожалуй, первым таким масштабным применением можно считать симметричные варианты технологии DSL (HDSL, SDSL, G.SHDSL и т.д.). Эти варианты семейства DSL реализуют полнодуплексный режим по двухпроводной линии с разделением сигналов встречных направлений при помощи эхокомпенсатора. В этой конструкции эхокомпенсатор удаляет отраженные эхосигналы, адаптивно настраиваясь на конкретную линию, и играет ключевую роль для обеспечения приемлемого разделения принимаемого и передаваемого сигналов. Появление первого разработанного ANSI стандарта симметричной технологии DSL (HDSL) датируется 1994 годом.

Следующим важным применением компенсационного принципа подавления эхосигналов является подавление отраженных в линии сигналов в "медной" версии стандарта Gigabit Ethernet (1000 Base-T). Стандарт был официально принят в 1999 году. Интересно, что в Ethernet эхокомпенсация используется не только для борьбы с непосредственно отраженным сигналом от неоднородностей в витой паре, но также для борьбы с переходными помехами между витыми парами (в данном случае на ближний конец, NEXT). С этого момента эхокомпенсаторы стали обязательным элементом для трансиверов всех последующих "медных" версий технологии Ethernet. Они также применяются в стандарте 10GBASE-T (IEEE 802.3 an-2006), обеспечивающем передачу потока с линейной скоростью 10 Гбит/с по кабелю категории 6A, а также в новейших вариантах стандарта 2,5 и 5 Гбит/с Ethernet, увидевших свет в ноябре 2016 года.

ТЕХНИКА КОМПЕНСАЦИИ И ЕЕ АЛГОРИТМЫ

Помимо истории проблемы эффекта эха в телекоммуникационных сетях и применения компенсационного принципа подавления эхосигналов, важно также рассмотреть вопрос развития внутреннего содержания техники компенсации эхосигналов, создания и развития ее алгоритмов и методов. Здесь важно обратить внимание на тот факт, что задача компенсации эхосигналов по своей сути является частной задачей теории адаптивной фильтрации (обработки) сигналов. В этой связи логично рассматривать историю развития методов компенсации эхосигналов в контексте развития методов адаптивной фильтрации (при этом учитывая более узкий характер задачи компенсации эхосигналов), а также связанных с ней областей математической науки, таких как оптимальное оценивание, теория случайных

процессов, других областей теории вероятности и математической статистики.

Одним из наиболее важных для техники компенсации эхосигналов математических методов является метод наименьших квадратов (МНК). МНК был открыт независимо немецким математиком Карлом Гауссом (опубликован в 1795 году) и французским математиком Адриеном Лежандром (опубликован в 1805 году). Рекурсивный вариант метода наименьших квадратов (РНК), предложенный Гауссом в 1821 году, на сегодня является одним из основных методов (алгоритмов) адаптивной фильтрации. Интересно, что рекурсивный МНК, в отличие от нерекурсивного МНК, не был востребован до начала 50-х годов 20 века, то есть на протяжении почти полутора веков [10]. Начало современной истории алгоритма РНК связано с именем британского статистика Робина Плакетта, который описал алгоритм в более современной векторно-матричной форме в начале 50-х годов. Спустя несколько десятилетий, благодаря развитию вычислительной техники, метод начал применяться для решения множества прикладных задач, в том числе и в задачах компенсации эхосигналов.

Обращаясь к вопросу вариаций алгоритма РНК, следует отметить, что в качестве основной модификации алгоритма на сегодня можно рассматривать взвешенный РНК. Среди прочих вариаций наибольший интерес представляет QR-РНК [5], в котором используется альтернативный лемме об обращении матриц (формула Вудбери) подход к рекурсивному вычислению автокорреляционной матрицы активного сигнала. Собственно для этого в QR-РНК используется алгоритм, основанный на QR-разложении матриц. Метод QR-разложения был разработан в 50-е годы советским математиком Верой Николаевной Кублановской и, независимо от нее, в начале 60-х годов – английским ученым в области информатики Джоном Френсисом.

Несмотря на почти уже двухвековую историю РНК, первым примененным на практике для решения задачи компенсации эхосигналов алгоритмом стал метод наименьших средних квадратов (МНСК). Как ранее отмечалось, разработка этого метода связана с именем американского ученого в области электротехники Бернарда Уидроу, разработавшего и исследовавшего его в середине 50-х годов 20 века. Низкая вычислительная сложность и приемлемые для многих задач функциональные характеристики этого метода определили его широкое применение в течение многих лет.

Интерес исследователей к МНСК привел к появлению множества вариаций этого алгоритма, которые на сегодня составляют целый класс. Вот лишь некоторые из них: нормализованный МНСК (НМНСК), пропорционально нормализованный МНСК, блочный МНСК, многополосный МНСК. При этом НМНСК по сей день является, пожалуй, наиболее применяемым на практике алгоритмом в задачах эхокомпенсации.

Заклячая обзор истории алгоритмов класса МНСК, необходимо выделить, что они являются градиентными: они математически связаны с численными методами градиентного поиска экстремумов функций (метод наискорейшего спуска и т.д.), а также с численными методами поиска нулей функций (метод Ньютона, метод хорд и касательных и т.д.). При этом история некоторых из них насчитывает уже несколько веков. Например, весьма важный для адаптивной фильтрации метод Ньютона был изложен в математической работе о бесконечных рядах Исаака Ньютона, написание которой восходит к 1669 году (опубликована только в 1711 году).

Как видно из представленного выше обзора, 50–60-е годы 20-го столетия в некотором смысле стали переломными для техники компенсации экхосигналов. Именно в этот период разрабатываются МНСК, находят применение РНК, МНСК и начинают исследоваться основные рекурсивные алгоритмы адаптивной фильтрации.

Однако необходимо вернуться приблизительно в 20–30-е годы 20-го века и рассмотреть важнейший этап развития теории адаптивной фильтрации. Тогда американский математик Норберт Винер и немецкий математик Эберхард Хопф, работая совместно, получают уравнение Винера – Хопфа. Первая публикация уравнения датируется 1934 годом. Уравнение Винера – Хопфа широко применяется во многих областях науки, например в кибернетике и экономике, а его важность для адаптивной фильтрации и теории оценивания трудно завысить. Собственно, его важность для адаптивной фильтрации заключается в том, что в применении к задачам идентификации неизвестных линейных систем это уравнение математически описывает взаимосвязь между входным сигналом, выходным сигналом и характеристиками априорно неизвестной исследуемой системы (в общем виде стационарной линейной инерционной цепи). Таким образом, описывая наиболее общие взаимосвязи, уравнение Винера – Хопфа является фундаментом важнейшей для адаптивной фильтрации области

математики – теории оптимального оценивания – и соединяет в единую логически стройную структуру методы адаптивной фильтрации. Так, многие общеизвестные рекурсивные (РНК, МНСК, корреляционный алгоритм) и нерекурсивные (МНК, фильтр Винера) алгоритмы адаптивной фильтрации могут быть получены из этого уравнения посредством математических преобразований или упрощений. Однако важно заметить, что это уравнение исходит из предположения стационарности исследуемой системы и не учитывает такие возможные процедуры, как линейное предсказание. Поэтому сказанное выше не справедливо для некоторых алгоритмов адаптивной фильтрации. Яркий пример этому – широко известный фильтр Калмана – Стратановича, в основе которого лежит модель динамической системы и линейное предсказание, хотя в нем и используются подходы, близкие к МНК. Справедливости ради следует отметить, что фильтр Калмана – Стратановича используется для фильтрации зашумленных сигналов и для задач компенсации экхосигналов не применяется.

Предложенный Норбертом Винером в 1940 году и опубликованный в 1949 году нерекурсивный фильтр Винера (реализует прямое решение уравнения Винера – Хопфа) является важнейшей частью теории адаптивной фильтрации. Следует подчеркнуть, что математическое выражение для фильтра Винера практически полностью совпадает с выражением для нерекурсивного МНК, но описывает процесс в терминах современной теории вероятности. Таким образом, прослеживается математическая связь между уравнением Винера – Хопфа и методом наименьших квадратов. В связи с рассмотрением этого фильтра следует выделить вклад Андрея Николаевича Колмогорова в развитие теории оценивания, который независимо от Норберта Винера в 1941 году предложил метод, эквивалентный фильтру Винера. В связи с этим теорию оптимального оценивания часто называют теорией Винера – Колмогорова.

Помимо рассмотренных выше алгоритмов класса МНК и МНСК, к настоящему моменту теория адаптивной фильтрации обогатилась еще одним весьма интересным и оригинальным методом, который кардинально отличается от них подходом к задаче аппроксимации уравнения Винера – Хопфа. А именно корреляционным алгоритмом, первые сведения о котором датируются 1991 годом [2]. Ключевая роль в разработке этого алгоритма принадлежит российскому ученому в области информатики Сергею Сергеевичу

Шаврину. Несмотря на отдельные посвященные корреляционному алгоритму публикации, в настоящий момент общедоступная литература по адаптивной фильтрации таких признанных российских и зарубежных авторов в этой научной области, как В.И. Джиган, М. Сондхи, Э. Айфитчер, Б. Уидроу, не содержит информации об этом алгоритме. В связи с этим можно сделать вывод, что на настоящий момент этот алгоритм не имеет широкого распространения и в целом неизвестен широкой научной общественности.

В ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении всего времени существования техники компенсации эхосигналов область ее применения постепенно расширялась. Изначально разработанные для низкоскоростных трактов передачи немодулированных речевых сигналов эхокомпенсаторы нашли широкое применение в современных скоростных цифровых интерфейсах и успешно работают с их линейными сигналами (РАМ, САР и т.д.). Например, в Gigabit Ethernet эхокомпенсатор работает с отсчетами сигнала, которые следуют с частотой 125 МГц. Тенденция расширения сферы применения техники компенсации эхосигналов продолжает сохраняться в настоящее время. Среди перспективных направлений можно выделить корреляционное разделение сигналов (технология carrier-in-carrier), применение эхокомпенсаторов для интегральной оценки качества телефонных каналов [6] и подавления эхосигналов в радиоканалах связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айфитчер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. 992 с.
2. Вайксельбаум Ш., Шаврин С.С. Современные методы и тенденции развития средств цифровой эхокомпенсации. – М.: Деп. в ЦНТИ "Информсвязь", 1991. № 1967 св.
3. Грант П.М., Коуэн К.Ф. (ред.) Адаптивная фильтрация / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. 392 с.
4. Джиган В.И. История, теория и практика адаптивной обработки сигналов. – М.: МЭС-2012 ИППМ РАН, 2012.
5. Джиган В.И. Адаптивные фильтры: современные средства моделирования и примеры реализации // Радиотехника. 2012. №7. С. 106–125.
6. Капустин С.В. Исследование принципов и разработка методов косвенной интегральной оценки качества телефонной передачи: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МТУСИ, 2009. 19 с.
7. Уидроу Б., Стриз С. Адаптивная обработка / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
8. Шаврин С.С. Развитие теории и техники подавления эффекта электрического эха в телекоммуникациях: Автореф. дис. докт. техн. наук. – М.: МТУСИ, 2009. 33 с.
9. Sondhi M.M. The History of Echo Cancellation. – IEEE signal processing magazine, 2006. P. 95–102.
10. Young P. Recursive estimation and time-series analysis, 1984.
11. Widrow B. Thinking about Thinking: The discovery of the LMS Algorithm. – IEEE signal processing magazine, 2005. P. 100–105.

"Саранскабель-Оптика" представил продукцию белорусским специалистам

С 10 по 13 октября завод по производству оптического кабеля "Саранскабель-Оптика" (СКО), совместно с коллегами по холдингу "Оптикэнерго" и официальным представителем предприятия на территории Республики Беларусь – ООО "ЭлектроКабельКомплект" – презентовали свою продукцию на XXII Международной специализированной выставке ENERGY EXPO-2017, проходившей в г. Минске в рамках XXII Белорусского энергетического и экологического конгресса.

Выставка была посвящена современным достижениям науки, техники и технологий в сфере энергетики, энергосбережения, автоматизации, электроники, защиты окружающей среды, использования возобновляемых источников энергии. В событии приняло уча-

стие более 300 компаний и организаций из 14 стран мира.

В рамках конгресса специалистами СКО впервые в Беларуси был организован технический семинар по кабельной продукции для специалистов энергетической и телекоммуникационной отраслей, в том числе для инженеров и работников ведущих проектных институтов Республики: Белэнергосетьпроект, Минскинжпроект, Могилевгражданпроект, Трансэлектропроект, Электросистемтехпроект. Семинар в Минске был анонсирован еще в феврале текущего года на ежегодной научно-технической конференции СКО в Саранске, в которой приняло участие 14 специалистов из Республики Беларусь. Более 70 участников из 30 ком-

паний и организаций стали не просто слушателями, но активными собеседниками на семинаре.

В своих выступлениях специалисты технической и маркетинговой служб ООО "Саранскабель-Оптика" постарались не только рассказать о продукции ГК "Оптикэнерго" и предоставляемых услугах, но и заранее подготовили ответы на вопросы, которые интересовали потенциальных участников семинара в ходе подготовки к мероприятию. Результаты анкетирования участников показали, что 100% опрошенных выразили желание посетить подобное мероприятие в будущем году.

По информации
ООО "Саранскабель-Оптика"