

УДК 628.5.17.2:534.83

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСТРАПОЛИРУЮЩИХ ВИРТУАЛЬНЫХ МИКРОФОНОВ

© 2011 А.В. Васильев, В.В. Пимкин

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 14.12.2010

Рассмотрена амплитудно-фазо-частотная коррекция сигналов микрофонов при вычислении виртуального микрофона. Исследована экстраполяция звукового поля в полярных координатах по амплитуде и фазе. Установлено, что на точность экстраполяции оказывает существенное влияние точность представления сигнала в частотной области.

Ключевые слова: машины, установки, низкочастотный звук, активная компенсация

1. ВВЕДЕНИЕ

Снижение уровня звука машин, установок, технологического оборудования в области высоких и средних частот достаточно эффективно осуществляется традиционными средствами: пассивными (реактивными, диссипативными) глушителями и звукоизоляцией. Для снижения как внешнего, так и внутреннего низкочастотного звука (например, для автотранспортных средств) все более широко используется метод активной компенсации. Этот метод развивается за последние десятилетия с появлением высокопроизводительной компактной цифровой вычислительной техники [1-8].

На сегодняшний день системы активной компенсации низкочастотного звука в закрытых объемах (например, кабины и пассажирские салоны автотранспортных средств) функционируют в основном по принципу создания локальных зон тишины вокруг корректирующих микрофонов. Под зонами тишины подразумеваются области, с уровнем снижения шума в 10 и более дБ. Размеры таких зон невелики. В настоящее время ведутся работы в двух направлениях: по расширению зон тишины и по смещению зоны тишины с позиции корректирующего микрофона к позиции наблюдателя. Последнее направление называется техникой виртуальных микрофонов.

Можно выделить несколько современных направлений исследований виртуальных микрофонов [3, 4]:

- устройство и расположение виртуального микрофона;
- использование экстраполирующих микрофонов;

- использование адаптивных виртуальных микрофонов на основе метода наименьших квадратов;
- использование метода фильтрования Калмана;
- использование метода определения стохастически оптимального тонального сигнала и др.

В данной работе рассмотрено использование концепции экстраполирующих виртуальных микрофонов.

2. СУЩНОСТЬ КОНЦЕПЦИИ ЭКСТРАПОЛИРУЮЩИХ ВИРТУАЛЬНЫХ МИКРОФОНОВ

Существует несколько различных методов, позволяющих рассчитать звуковой сигнал в удаленной позиции. Одним из перспективных методов является использование экстраполирующих виртуальных микрофонов с экстраполяцией значений давления с нескольких реальных микрофонов в позицию виртуального. Большой вклад в разработку экстраполирующих виртуальных микрофонов внес Бэн Казолато (Ben Cazzolato) из университета Аделаиды [3].

Данный подход обладает следующими преимуществами:

- Не требуется стадия предварительной идентификации передаточных функций;
- Алгоритм устойчив к изменениям в звуковом поле, которые могут вызвать изменение передаточной функции между громкоговорителями и корректирующими микрофонами;
- Простота вычислений.

С другой стороны, использование экстраполирующих виртуальных микрофонов связано с рядом недостатков:

- Возможность использования только в области низких частот и на небольших расстояниях до виртуальной позиции;
- На точность вычислений существенно влияют фазовые рассогласования и рассогласования

Андрей Витальевич Васильев, доктор технических наук, профессор, директор института химии и инженерной экологии. Email: avassil62@mail.ru
Владимир Владимирович Пимкин, аспирант. Email: NIL9@tlt.su.ru

по чувствительности между микрофонами а также ошибка позиционирования физических микрофонов;

- Чувствительность к коротковолновому внешнему шуму.

Некоторые из этих недостатков могут быть устранены при использовании быстрого преобразования. Несмотря на значительное увеличение числа расчетов и времени задержки в системе активного контроля, можно найти класс алгоритмов активного контроля звука, которые могут быть использованы в той же самой частотной области и иметь следующие преимущества [6]:

- значительное снижение числа вычислений путем использования цифровых фильтров;

- возможность значительного повышения точности вычислений за счёт амплитудно-фазово-частотной коррекции сигналов реальных микрофонов и др.

В данной работе предлагается использовать быстрое преобразование Фурье реальных сигналов микрофонов для отдельной оценки амплитуды и фазы в позиции виртуального микрофона путем экстраполяции и для коррекции амплитудных и фазовых рассогласований между микрофонами.

Делается предположение о получении ряда преимуществ при расчёте микрофонов в частотной области:

1. Увеличение дистанции виртуального микрофона за счёт использования экстраполяции в полярных координатах.

2. Использование совместно с адаптивными фильтрами в частотной области.

Область применения результатов работы: создание локальных зон тишины для автотранспортных средств.

3. РАСЧЕТ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭКСТРАПОЛИРУЮЩИХ МИКРОФОНОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Существующие методы расчета одномерного виртуального микрофона первого порядка [4] предполагают расчет звукового давления p_v в позиции виртуального микрофона x_v на основе данных о величинах звуковых давлений p_1 и p_2 , измеренных реальными микрофонами в позициях x_1 и x_2 с использованием уравнения:

$$p_v = h_1 p_1 + h_2 p_2, \quad (1)$$

где

$$[h_1 \quad h_2] = [x_v \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

Путем учета коэффициента h_i можно оценить искажение чувствительности микрофонов:

$$[h_1 \quad h_2] = [x_v \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где g_i - коэффициент масштабности для соответствующего микрофона.

Алгоритмы активной компенсации в частотной области обрабатывают сигнал блоками и трансформируют каждый блок временной области в частотную путем быстрого преобразования Фурье. Можно записать:

$$p_i \xleftrightarrow{FFT} P_i; \quad (4)$$

$$p_i = [p_i[1] \quad p_i[2] \quad \dots \quad p_i[N]]; \quad (5)$$

Здесь p_i – последовательность отсчета сигналов (база данных); N – размер базы данных; P_i – сигнал в базе данных, преобразованный путем быстрого преобразования Фурье.

На основании принципа линейности и уравнения (1) можно записать следующее уравнение:

$$P_v = h_1 P_1 + h_2 P_2. \quad (6)$$

Скалярные коэффициенты h могут включать коэффициенты экстраполяции и коэффициенты, корректирующие чувствительность микрофонов. Вместо данных скалярных коэффициентов предлагается использовать корректирующий комплексный вектор H , который может включать в себя коэффициенты экстраполяции, комплексную передаточную функцию, корректирующую рассогласование фазовых и амплитудно-частотных характеристик между микрофонами G , низкочастотный полосовой фильтр F . Можно записать следующие уравнения:

$$P_v = H_1 \cdot P_1 + H_2 \cdot P_2, \quad (7)$$

$$H_i = h_i \cdot G_i \cdot F. \quad (8)$$

Комплексные передаточные функции G_i могут быть получены в результате калибровки каждого микрофона относительно контрольного микрофона. Таким путем может быть упрощен подбор микрофонов и повышена точность вычисления виртуального микрофона. Быстрое преобразование Фурье неизбежно добавляет задержку в управляющую систему. Однако адаптивные фильтры, функционирующие в частотной области, обладают хорошей сходимостью и эффективны для проведения вычислений.

Авторами было сделано предположение, что пространственная экстраполяция в частотной области может быть выполнена на больших расстояниях до позиции виртуального микрофона за счёт более равномерного пространственного распределения значений амплитуды и фазы, чем

значений давления (для некоторых видов звуковых полей). Предложена отдельная экстраполяция амплитуды и фазы (рис. 1) вместо экстраполяции в прямоугольных координатах, что повышает точность виртуального микрофона. Для частотной области экстраполяция в прямоугольных координатах соответствует экстраполяции во временной области, экстраполяция в полярных координатах соответствует отдельной экстраполяции по амплитуде и по фазе. Необходимо отметить, что преобразование координат из прямоугольных (как результата быстрого преобразования Фурье) к полярной форме требует дополнительных вычислений.

В результате моделирования экстраполяции в полярных координатах было установлено, что величина ошибки сильно зависит от точности представления сигнала в частотной области. Результаты моделирования экстраполяции в одномерном свободном звуковом поле подтверждают, что изменение частоты колебаний может значительно увеличить ошибку.

Результаты проведенных расчетов показывают, что предложенный метод эффективен, если частота колебаний близка к одной из дискретных частот быстрого преобразования Фурье. Полученные графические зависимости спектра гармонического сигнала в пространстве для различной частоты колебаний показаны на рис. 2.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки сделанных теоретических предположений и проведенных расчетов была создана специальная экспериментальная установка для условий одномерного распространения плоских звуковых волн.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Установка представляет собой два отрезка трубы диаметром 71 мм, соединенные касетой с вмонтированным сверху громкоговорителем. Одна из труб длиной 1000 мм заканчивается касетой со вторым громкоговорителем. Конец другой трубы длиной 1550 мм открыт. Длинный участок трубы содержит отверстия для помещения в трубу микрофонов в разных позициях вдоль трубы. Один из микрофонов вводится в трубу с открытого торца на подвижной линейке, позволяющей перемещать микрофон вдоль оси трубы и фиксировать его положение. Микрофоны и громкоговорители подключены к микроконтроллеру, позволяющему синхронно в реальном времени управлять громкоговорителями и снимать сигнал с микрофонов. Рассогласование по фазе между микрофонами составляло порядка 10-15 градусов. В эксперименте имитировалось одномерное распространение плоских волн.

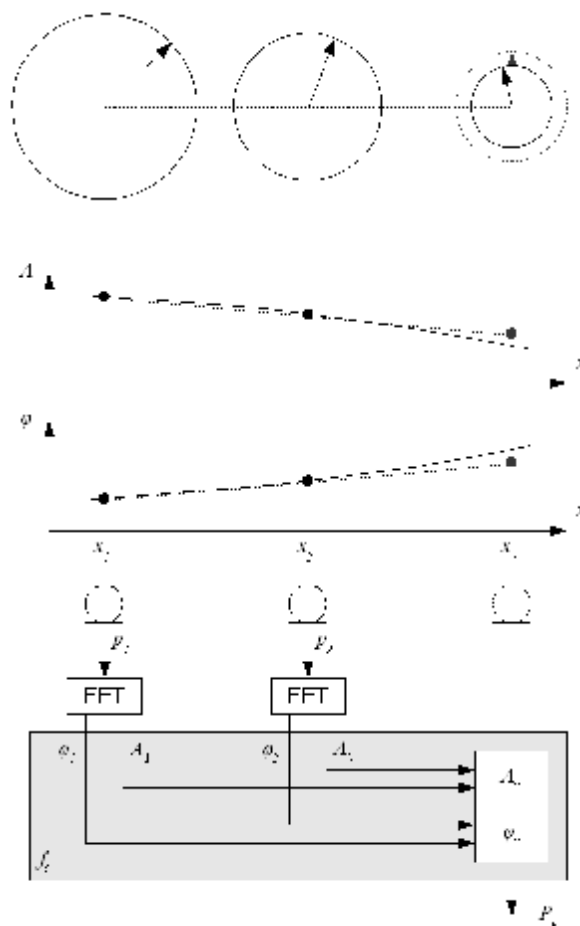
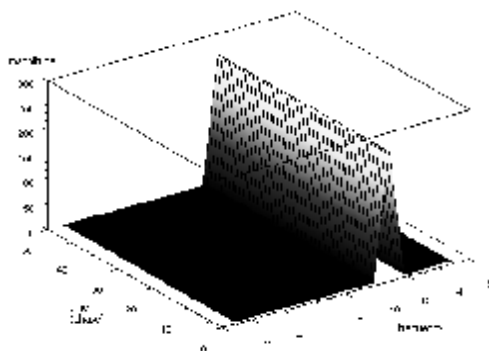


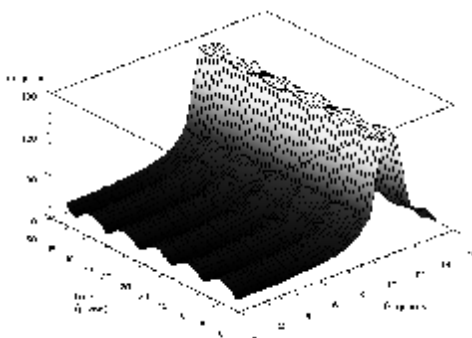
Рис. 1. Использование виртуального микрофона в частотной области с отдельной экстраполяцией амплитуды и фазы

На первом этапе была произведена калибровка микрофонов относительно контрольного. Контрольный микрофон поочередно помещался в позицию каждого микрофона, на громкоговоритель подавался широкополосный шум (в диапазоне ниже частоты, удовлетворяющей условию распространения в волноводе плоских волн), микроконтроллером синхронно записывался сигнал с контрольного микрофона и калибруемого. После чего на персональном компьютере с использованием разработанного программного обеспечения "Scilab" рассчитывались усредненные комплексные передаточные функции между каналами G как среднее отношение комплексных спектров сигналов.

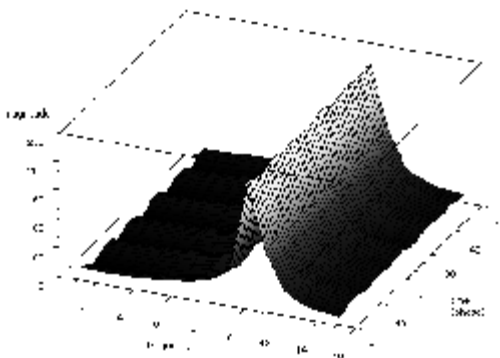
На втором этапе сравнивались методы расчета виртуального микрофона во временной области с корректировкой сигналов единичными весовыми коэффициентами (g_i) и в частотной области с корректировкой сигналов комплексными передаточными функциями (G_i). На громкоговоритель подавался сигнал, состоящий из набора гармоник (различные комбинации 200, 300, 400, 500, 550, 900 Гц). Контрольный микрофон помещался в несколько позиций виртуаль-



а) частота гармонического сигнала коррелируется с одной из дискретных частот Быстрого преобразования Фурье



б) частота гармонического сигнала находится в середине между двумя дискретными частотами Быстрого преобразования Фурье



в) частота гармонического сигнала расположена между дискретными частотами Быстрого преобразования Фурье

Рис. 2. Графические зависимости, показывающие эффект дискретности при быстром преобразовании Фурье

ного микрофона, удаленных от реальных микрофонов на расстояние 50, 100, 150 мм. Производился расчёт сигнала в позиции виртуального микрофона и сравнивался с сигналом реального микрофона в позиции виртуального. Обозначения показаны в табл. 1. Результаты сравнения показаны на рис. 4 и 5.

На третьем этапе производилось сравнение методов полярной экстраполяции (рис. 6, 7):

- в прямоугольных координатах (аналог виртуального микрофона во временной области) –

синяя линия;

- в полярных координатах (экстраполяция амплитуды и фазы) – красная линия.

Характеристики подаваемого сигнала по частотам: 200 Гц - 20 дБ; 300 Гц -30 дБ; 400 Гц - 25 дБ; 500 Гц - 25 дБ; 550 Гц - 25 дБ; расстояние до виртуального микрофона - 100 мм.

Результаты экспериментов подтверждают, что при неточном представлении сигнала в частотной области погрешность полярной экстраполяции возрастает.

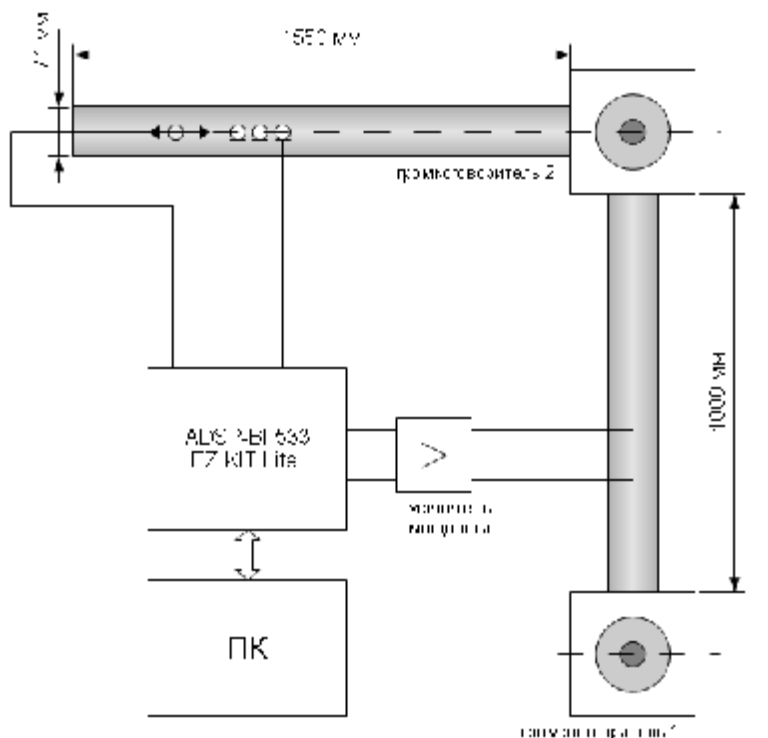


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Таблица 1. Коррекция амплитудно-фазово-частотных характеристик микрофона (обозначения)

-----	Реальный сигнал в позиции виртуального микрофона (черный цвет)
-----	Расхождение между реальным сигналом и рассчитанным сигналом при использовании метода экстраполирующих микрофонов (во временной области, постоянный коэффициент, синий цвет)
-----	Расхождение между реальным сигналом и рассчитанным сигналом при использовании метода экстраполирующих микрофонов (в частотной области, корректирующая передаточная функция, красный цвет)
TD	временная область
FD	частотная область

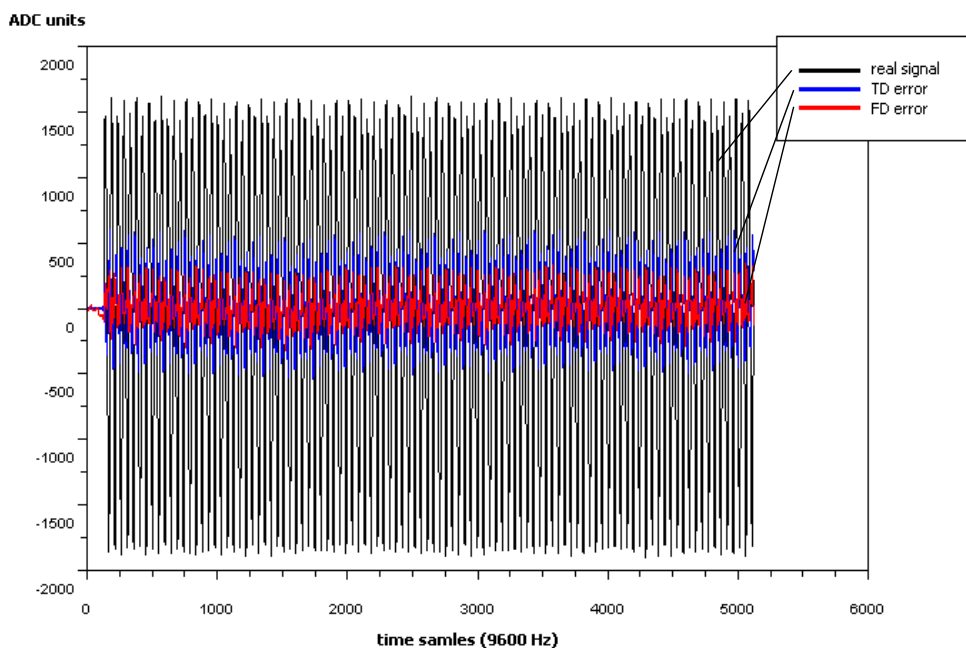


Рис. 4. Виртуальный микрофон первого порядка (линейный)

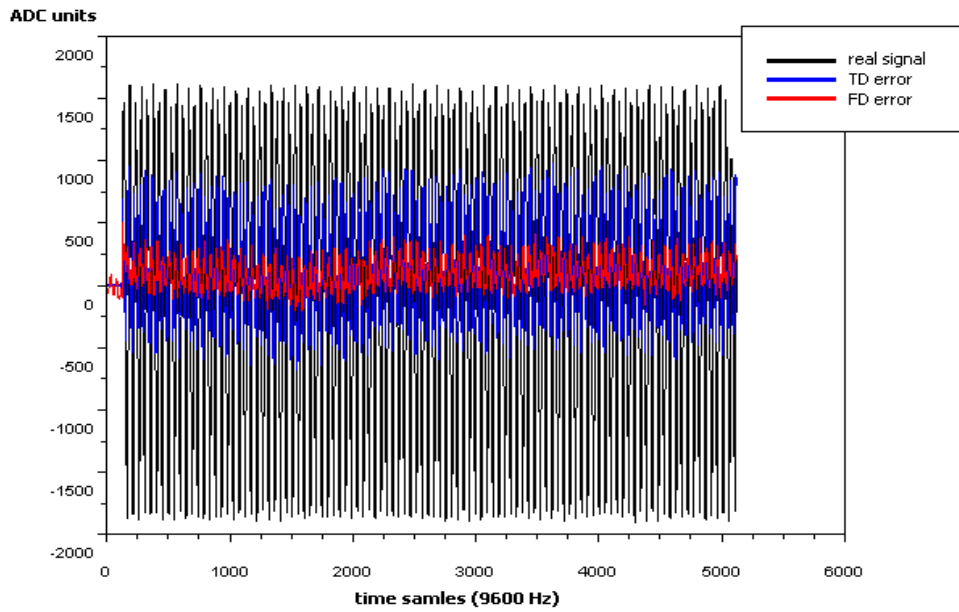


Рис. 5. Виртуальный микрофон второго порядка (квадратичный)

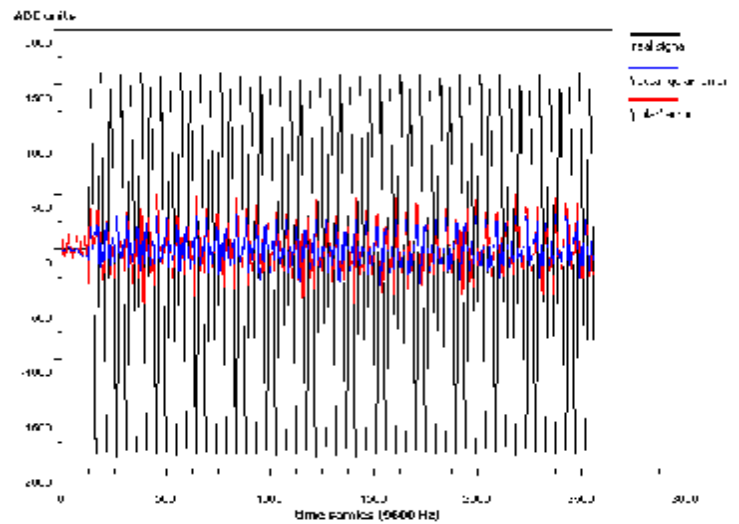


Рис. 6. Результаты полярной экстраполяции при использовании виртуального микрофона первого порядка

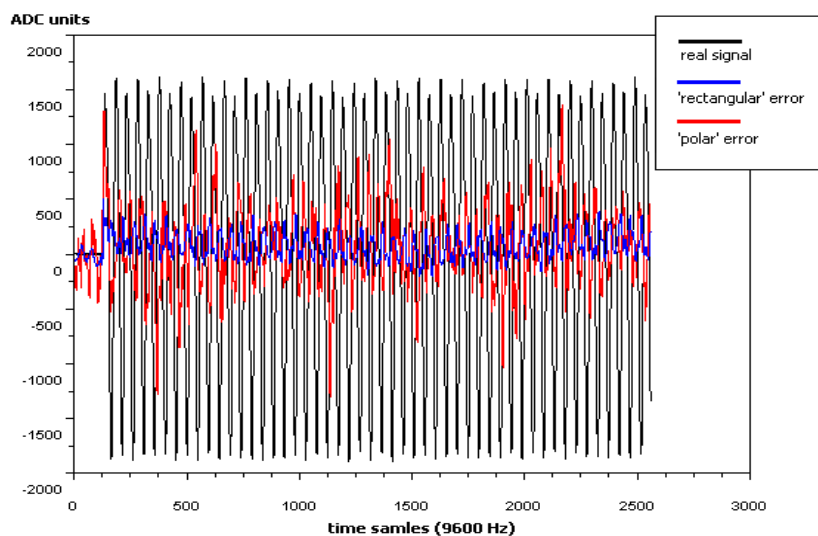


Рис. 7. Результаты полярной экстраполяции при использовании виртуального микрофона второго порядка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено использование экстраполирующих виртуальных микрофонов для снижения низкочастотного звука, проанализированы преимущества и недостатки. Предложена амплитудно-фазо-частотная коррекция сигналов микрофонов при вычислении виртуального микрофона, позволяющая уменьшить число ошибок вычисления виртуального микрофона при значительных фазовых рассогласованиях между реальными микрофонами. Исследована экстраполяция звукового поля в полярных координатах по амплитуде и фазе. Установлено, что на точность такой экстраполяции оказывает существенное влияние точность представления сигнала в частотной области.

Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ за поддержку работы в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» направления 1 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilyev A.V.* Снижение низкочастотного шума и вибрации в газовадах энергетических установок с использованием метода активной компенсации: Монография. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 294 с.
2. *Vasilyev A.V.* Акустическое моделирование и комплексное снижение шума автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Монография. Самара: СамНЦ РАН, 2004. 296 с.
3. *Danielle Moreau, Ben Cazzolato, Anthony Zander, Cornelis Petersen.* A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control, School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, North Terrace, SA, 5005, Australia, Algorithms 2008, 1, 69-99; ISSN 1999-4893. URL: www.mdpi.com/journal/algorithms (дата обращения 5.09.2010)
4. *Daniel Ch. von Grunigen, August N. Kaelin, Alfred Stirnemann.* An Efficient Feedforward Frequency-Domain Adaptive Controller for Periodic Sound Fields. ACTIVE 1995, Newport Beach, CA, USA.
5. *Shen Qun, Spanias Andeas.* Frequency-domain adaptive algorithms for active sound control, 1993.
6. *Munn J.* Virtual sensors for active noise control. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, SA, 5005, 2004.
7. *Vasilyev A.V.* Reduction of Low Frequency Noise of Energetic Plants. Proc. of the 37th International Congress on Noise Control Engineering “Inter-Noise 2008”, Shanghai, China, 26-29 October 2008, P. 19.
8. *Vasilyev A.V., Pimkin V.V.* Forward-difference Frequency Domain Virtual Microphone for Active Noise Control. Proc. of the 8th European Scientific Conference on Noise Control “EURONOISE 2009”. Edinburgh, Scotland, October 26-28 2009, CD, P.9.

ACTIVE COMPENSATION OF LOW FREQUENCY SOUND BY USING OF EXTRAPOLATING VIRTUAL MICROPHONES

© 2011 A.V. Vasilyev, V.V. Pimkin

Togliatti State University

Amplitude-phase-frequency correction of signals of microphones have been considered under calculations of virtual microphone. Amplitude-phase extrapolation of sound field in polar coordinates have been investigated. It is determined that precision of such extrapolation is strongly depend on the precision of signal presentation in frequency domain.

Key words: machines, plants, low frequency sound, active compensation