

Реализация алгоритма адаптивной фильтрации на специализированной отладочной плате с цифровым сигнальным процессором

77-48211/529238

01, январь 2013

Бабкин П. С., Оганов В. И.

УДК. 004.422.833

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

pavel.babkin@mail.ru

oganov@bmstu.ru

Один из методов компенсации помех, или, другими словами, выделения полезных сигналов на фоне аддитивных помех заключается в пропуске смеси сигнала и помехи через фильтр, в котором помеха подавляется, а сигнал практически не изменяется. Проектирование таких фильтров является задачей оптимальной фильтрации, основоположником которой был Винер.

Фильтры, используемые для решения задачи выделения сигнала, могут иметь постоянные параметры либо быть адаптивными. Расчёт фильтров с постоянными параметрами основывается на априорном знании характеристик, как сигнала, так и помехи. Параметры адаптивных фильтров, напротив, могут автоматически перестраиваться, поэтому для построения таких фильтров достаточна лишь минимальная априорная информация о характеристиках сигнала и помехи. Однако для того чтобы адаптивный фильтр решал на практике задачу оптимальной винеровской фильтрации необходимо, чтобы сигналы на его опорных входах содержали информацию о помехе и не содержали информацию о полезном сигнале[1]. Предположим, что диагностируемый механизм – источник полезного сигнала и механизмы – источники помехи установлены на одном фундаменте. В этом случае линейные опорные приемники (виброприемники и/или микрофоны), установленные на механизмах – источниках помехи или вблизи них, будут воспринимать колебания, возбуждаемые механизмом – источником полезного сигнала. Эти колебания могут распространяться одновременно и по фундаментной конструкции и по воздушной среде.

В этой ситуации задача фильтрации может быть решена путем использования в адаптивных системах компенсации нелинейных опорных приемников, которые воспринимают только сигнал той машины, на которой они установлены, и не воспринимают сигналы других машин и механизмов. Создание таких приемников возможно, если источником помех является так называемое цикловое оборудование. К такому оборудованию относятся роторные машины (вентиляторы, насосы, турбины и

т.п.), машины циклического действия (дизели, компрессоры и т.п.), и другие машины и механизмы, работа которых характеризуется повторяющимися во времени циклами.

Компенсацию (подавление) помех можно рассматривать как разновидность задачи оптимальной фильтрации. Такой подход во многих случаях является весьма плодотворным. В компенсаторе помех используется дополнительный сигнал, который поступает от одного или нескольких датчиков, расположенных в тех точках поля помех, где полезный сигнал слаб или ниже порога обнаружения. Сигнал, подаваемый на дополнительный вход, называют опорным. Помеха в дополнительном канале проходит через фильтр, а затем вычитается из сигнала в основном канале, представляющего собой смесь полезного сигнала и помехи. В результате шумы в основном канале уменьшаются или подавляются полностью.

На рис.1 приведена структурная схема, поясняющая описанный в работе [3] принцип адаптивной компенсации помех.

На схеме показаны источник полезного сигнала ИС, источник помехи ИП, контрольный приемник КП полезного сигнала, опорный приемник ОП помехи, а также адаптивный фильтр, в состав которого входят перестраиваемый фильтр ПФ с оператором N и сумматор, работающий в режиме вычитающего устройства.

Система работает следующим образом. Сигнал $s(t)$ опорного приемника ОП поступает на опорный вход адаптивного фильтра, а сигнал $d(t)$ контрольного приемника КП – на его основной вход. Сигнал $d(t)=b(t)+v(t)$ содержит две составляющие – полезный сигнал $v(t)$ и помеху $b(t)$, которые возбуждаются соответственно источником сигнала ИС и источником помехи ИП. Предполагается, что при работе системы выполняются следующие условия, необходимые для реализации задачи оптимальной винеровской фильтрации:

- опорный приемник ОП принимает только помеху $s(t)$, и не воспринимает полезный сигнал,
- полезный сигнал $v(t)$ не коррелирован с помехами $b(t)$ и $s(t)$,
- сигналы $b(t)$ и $s(t)$ коррелированы, однако, априори функция корреляции неизвестна.

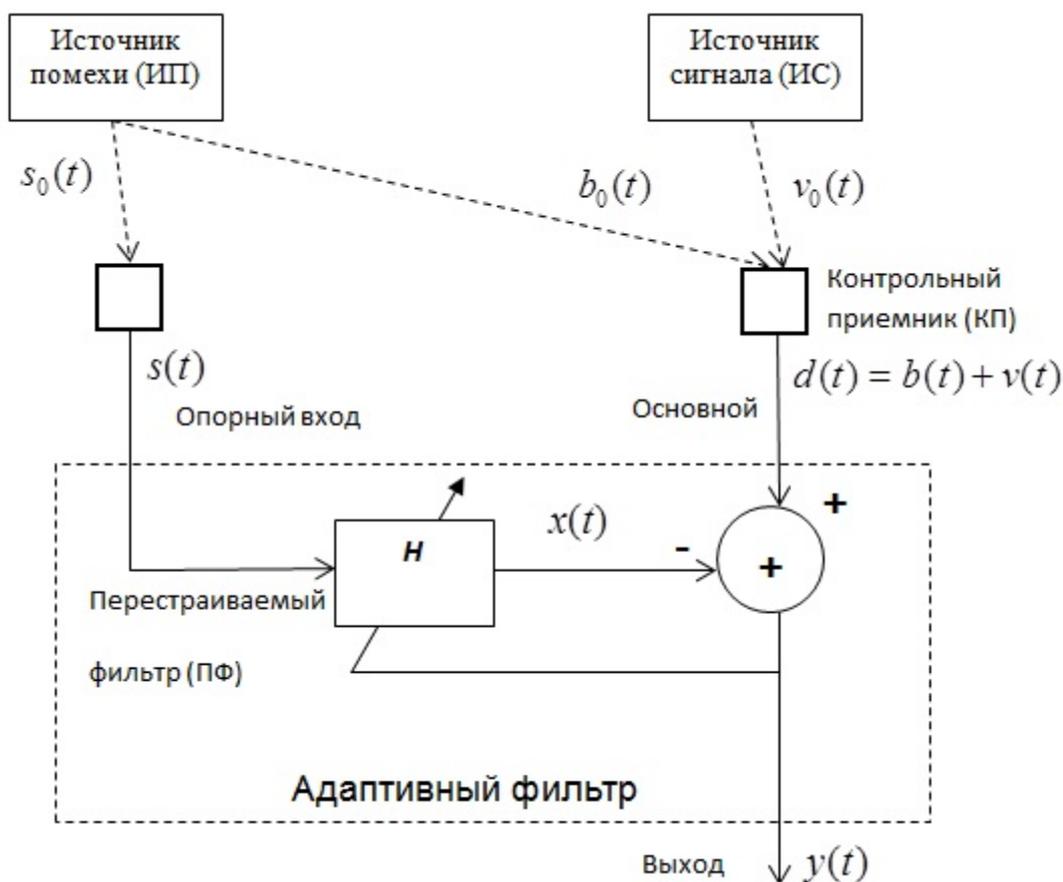


Рис. 1. Структурная схема, поясняющая принцип адаптивной компенсации помех.

Помеха $s(t)$, пройдя через перестраиваемый фильтр, формирует на его выходе сигнал $x(t)$. Параметры перестраиваемого фильтра, на управляющий вход которого подается сигнал $y(t)$, автоматически настраиваются таким образом, чтобы сигнал $x(t)$ как можно меньше отличался от сигнала помехи $b(t)$. Затем сигналы $d(t)$ и $x(t)$ подаются на вычитающее устройство, где формируется выходной сигнал системы $y(t) = b(t) + v(t) - x(t)$. В результате вычитания на выходе системы остается практически чистый полезный сигнал $v(t)$. Таким образом, сигнал $y(t)$ является наилучшей оценкой полезного сигнала $v(t)$.

Если бы характеристики каналов передачи, по которым помехи поступают на основной и опорный входы адаптивного фильтра, были известны априори, то в принципе можно было бы заменить перестраиваемый фильтр ПФ фильтром с постоянными параметрами, преобразующим помеху $s(t)$ в $b(t)$. В результате вычитания на выходе системы остался бы чистый полезный сигнал $v(t)$. Однако, как правило, характеристики каналов передачи неизвестны, либо известны лишь частично и редко имеют неизменный характер. Поэтому использовать фильтры с постоянными параметрами в системах компенсации нельзя.

Процедура настройки параметров перестраиваемого фильтра на оптимальный режим происходит под действием того или иного адаптивного алгоритма. При этом целью работы адаптивной системы компенсации является минимизация средней мощности сигнала $y(t)$.

Рассмотрим адаптивный винеровский фильтр, в котором для настройки коэффициентов перестраиваемого нерекурсивного фильтра на оптимальный режим использована модификация известного алгоритма минимума среднего квадрата ошибки Уидроу-Хоффа (LMS (подробное описание этого алгоритма можно найти в [2])).

Оптимальный адаптивный фильтр с этим модифицированным алгоритмом описывается уравнениями:

$$x(iT) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(iT)s(iT - kT), \quad (1)$$

$$h_k(iT) = h_k(iT - T) + 2\alpha(T)y(iT)s(iT - kT), \quad (2)$$

$$\text{где: } \alpha(T) = 2\pi f_c T,$$

iT ($i=1,2,\dots$) - дискретное время; T – частота дискретизации; $h_k(iT)$ ($k=0,1,2,\dots,N-1$) – k -ый коэффициент перестраиваемого нерекурсивного фильтра; N - число перестраиваемых коэффициентов фильтра; $\alpha(T)$ - действительный положительный коэффициент, определяющий скорость сходимости итерационного процесса к оптимальному решению.

Выражение (1) есть уравнение перестраиваемого нерекурсивного фильтра ПФ. Выражение (2) представляет собой адаптивный алгоритм настройки коэффициентов фильтра (1) на оптимальный режим, при этом (2) описывает дискретный интегратор с частотой среза f_c в Гц.

В алгоритме (1-2) коэффициент $\alpha(T)$ зависит от величины T . В этом случае изменение частоты дискретизации не влияет на частоту среза интегратора f_c а, следовательно, и на статические и динамические характеристики адаптивного фильтра. Необходимость изменения частоты дискретизации часто возникает на этапе настройки адаптивного фильтра, например, когда требуется увеличить длину импульсной характеристики (т.е. фактически количество коэффициентов h_k) нерекурсивного фильтра ПФ, не меняя его порядка N .

Для компактной реализации адаптивного фильтра с алгоритмом (1-2) была использована специализированная отладочная плата TMDXEVM5515 фирмы Spectrum Digital (США). Внешний вид платы представлен на Рис.2.

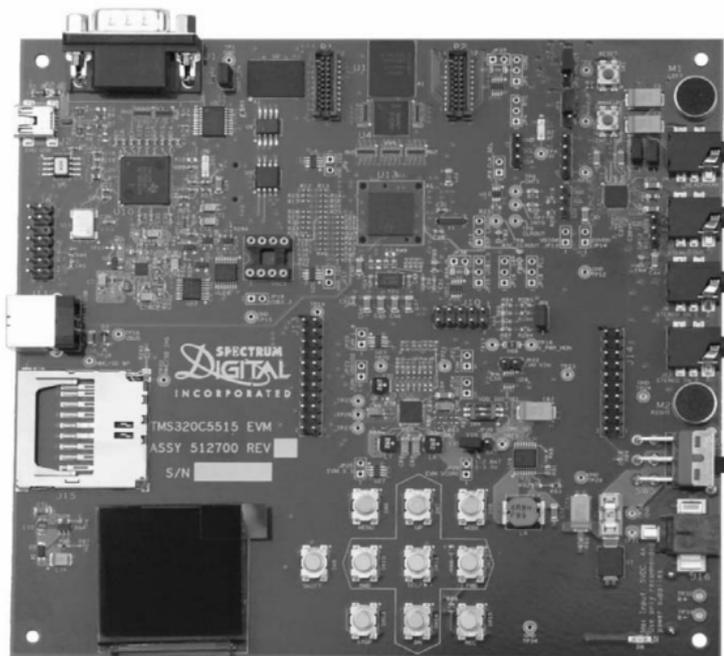


Рис. 2. Внешний вид платы TMDXEVM5515.

В плате в качестве процессора использован 16 разрядный сигнальный процессор с фиксированной точкой TMS320C5515 фирмы Texas Instruments (США). Так же на плате установлен аудио кодек TLV320AIC3204 с двумя входами и тремя выходами. Емкость каждого из двух ЭСППЗУ (электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство), установленных на плате, равна 256 Кбит, емкость NOR памяти – 16 МБ, а NAND памяти – 64 МБ, так же можно подключить внешнюю SD карту. Некоторые технические характеристики процессора приведены ниже:

- Процессор обеспечивает частоту исполнения инструкций до 120 МГц (8.33 нс – командный цикл)
- Соединение с персональным компьютером осуществляется посредством mini USB разъема
- Рабочая температура окружающей среды от 0 до 70 °С
- Разрядность ЦАП и АЦП 32 бита
- Отношение сигнал/шум (АЦП/ЦАП) 92/100 дБ
- Динамический диапазон (АЦП/ЦАП) 93/100 дБ
- Частота дискретизации от 8 кГц до 192 кГц

Для решения поставленной задачи задействованы далеко не все возможности и функциональные блоки этой платы. Структурная схема связей между использованными ресурсами платы представлена на Рис.3.



Рис. 3. Структурная схема связей между использованными ресурсами платы.

Качество процесса адаптивной фильтрации принято оценивать двумя основными показателями - длительностью процесса адаптации, которая характеризует динамические свойства фильтра, и также эффективностью фильтрации в установившемся режиме, которая характеризует его статические свойства. В качестве показателя эффективности фильтрации обычно используют величину ослабления помехи в заданном диапазоне частот.

На Рис.4 функциональная схема работы адаптивного компенсатора помех (где q – коэффициент ослабления помехи, учитывающий влияние окружающей среды на передачу опорного сигнала от источника к приемнику), реализованного с помощью специализированной платы TMDXEVM5515, с последующим экспортом результатов в Matlab, при этом во всех проведенных экспериментах входные тестовые сигналы генерировались программно.

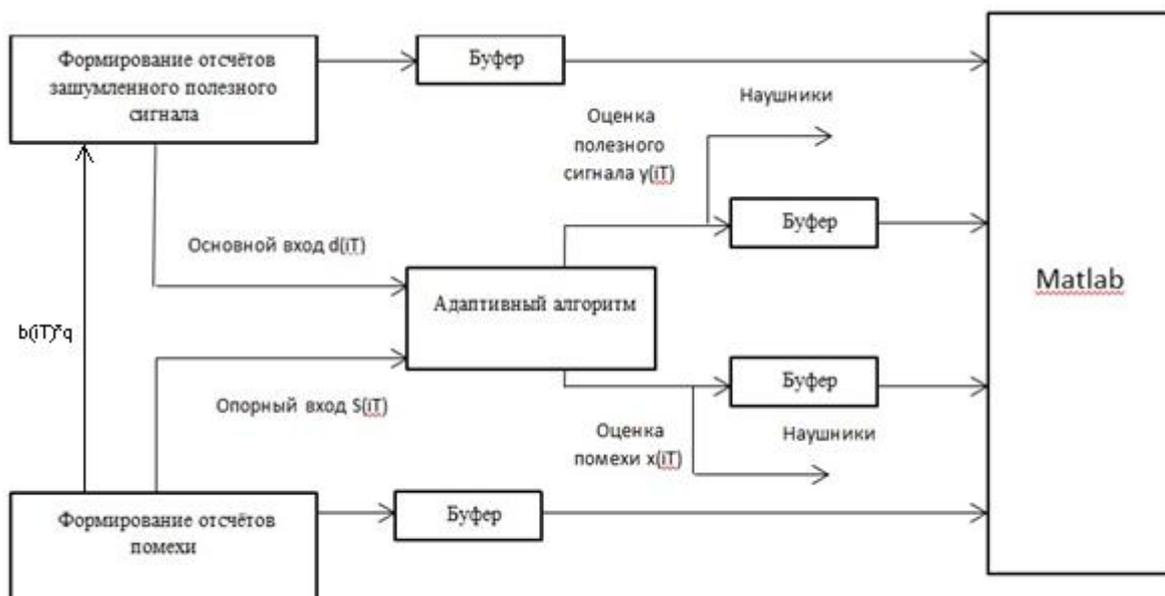


Рис. 4. Функциональная схема работы адаптивного компенсатора помех, реализованного с помощью специализированной платы TMDXEV5515, с последующим экспортом результатов в Matlab.

Проверка результатов работы реализованного на плате алгоритма (1-2) в установленном режиме производится путем сравнения выходов алгоритма с выходами того же алгоритма, реализованного в среде Matlab, при одинаковых входных тестовых сигналах.

В первом эксперименте на опорный вход подается помеха в виде широкополосного шума с равномерным спектром, а на основной - сумма синусоидального полезного сигнала и помехи.

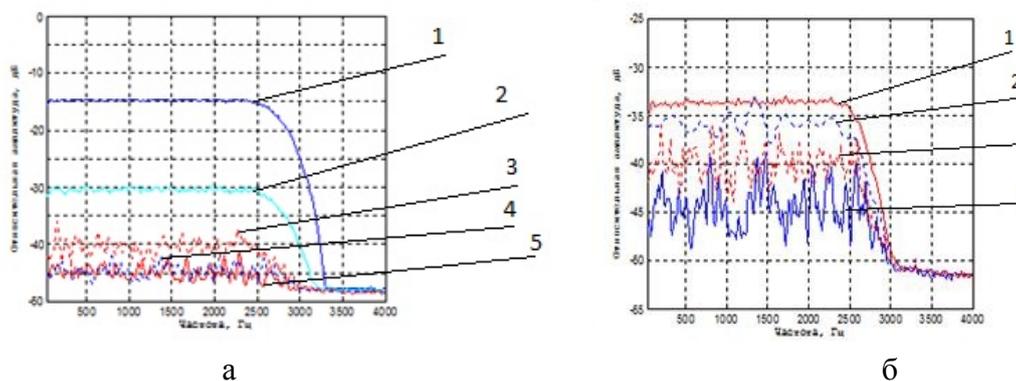


Рис. 5. Эффективность гашения широкополосного шума адаптивным фильтром (частота дискретизации 5.5 кГц)

На Рис.5 показаны спектры сигналов после компенсации широкополосного шума адаптивным фильтром в зависимости от коэффициента адаптации $a(T)$ (Рис.5 а) и в зависимости от числа отводов фильтра (Рис.5 б). Число отводов фильтра данном эксперименте постоянно и равняется 144, меняется только коэффициент адаптации. График 5 – $a(T)$ равно 0.047, график 4 – 0.026, график 3 – 0.016, график 2 – 0.003, график

1 – 0.002. Как видно наилучшее гашение обеспечивается при $a(T)=0.026$. Дальнейшее уменьшение удвоенного коэффициента адаптации ведет только к ухудшению плохим результатам, к тому же замедляет скорость адаптации. Это связано с округлением произведения $2a(T)u(iT)$ до одного 16-рядного слова.

На Рис.5 б показана эффективность гашения широкополосного шума при различном числе отводов адаптивного фильтра (при этом $a(T)=0.026$). График 4 соответствует фильтру со 144 отводами, график 1 – 2, график 2 - 22, график 3 – 512. Вероятно, разница связана с особенностями округления суммы при вычислении свертки вектора коэффициентов и входных значений фильтра. Результат сравнения реализации алгоритма на плате и в Matlab представлены на Рис.6 и 7. Небольшие различия в результатах, очевидно, связаны с различной величиной разрядной сетки, используемой MatLab и процессором, установленным на плате.

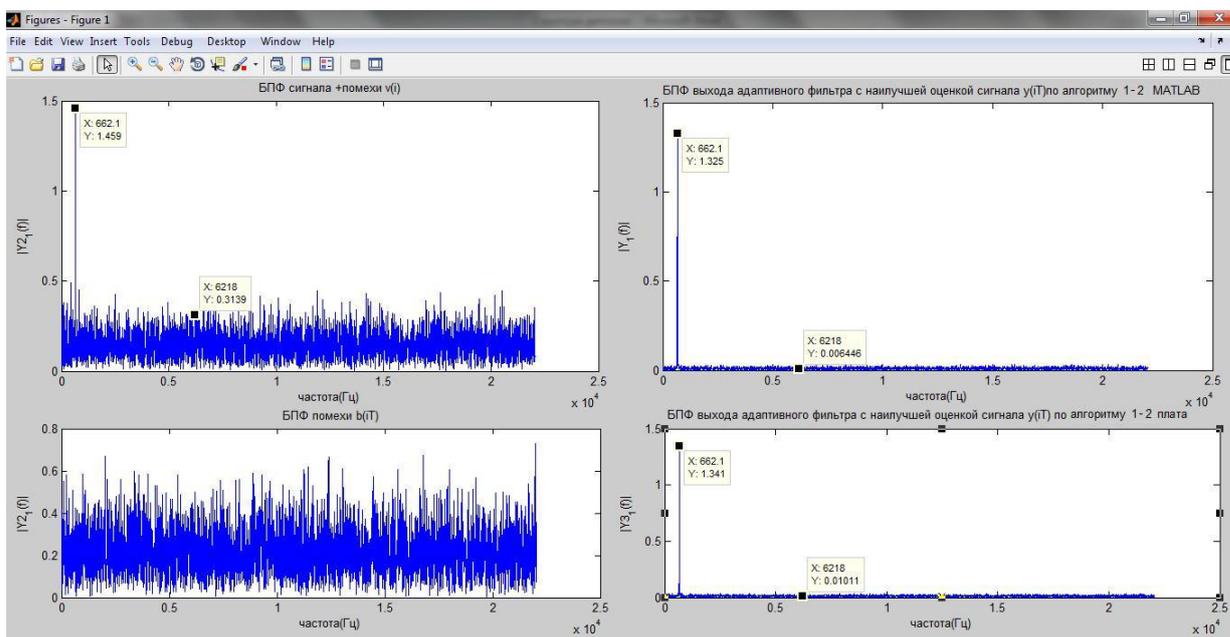


Рис. 6. Входные и выходные спектры сигналов, полученные в результате работы программы по алгоритму (1-2) в Matlab и на плате. Длина фильтра 144, частота дискретизации 44.1 КГц, $a(T)=0.026$. Сигнал на опорном входе – белый шум, сигнал на основном входе – синусоида + белый шум. Отношение сигнал/шум полученное при моделировании на плате - 42.4 дБ, при моделировании на Matlab - 46.2 дБ (до фильтрации отношение сигнал/шум было - 13.3 дБ).

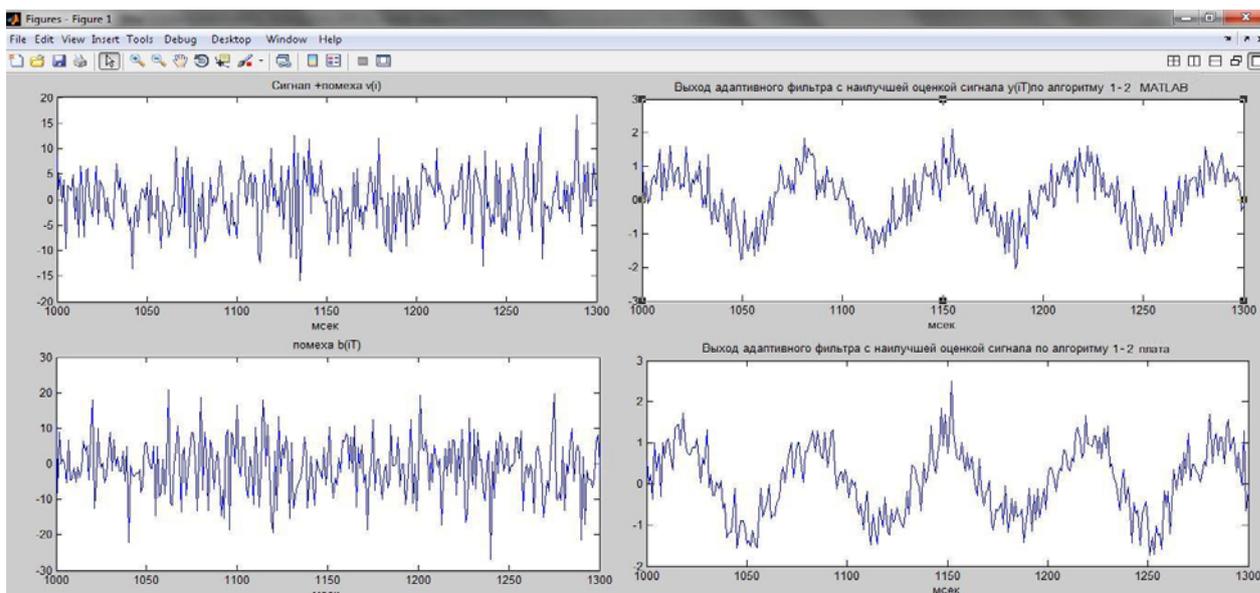


Рис.7. Входные и выходные сигналы, полученные в результате работы программы по алгоритму (1-2) в Matlab и на плате. Длина фильтра 144, частота дискретизации 44.1 КГц, $a(T)=0.026$. Сигнал на опорном входе – белый шум, сигнал на основном входе – синусоида + белый шум.

Выводы

В данной статье были рассмотрен алгоритм адаптивной фильтрации случайных помех. При разработке модели адаптивного компенсатора с алгоритмом фильтрации (1-2), учитывалось наличие влияния окружающей среды на передачу опорного сигнала от источника к приемнику. Было проведено исследование влияния параметров адаптивного фильтра на качество фильтрации, а также реализация и моделирование адаптивного алгоритма на специализированной плате и сравнение полученных результатов с результатами, полученными в ходе моделирования в среде Matlab. Качество фильтрации имеет довольно хороший уровень при относительно небольших затратах вычислительных ресурсов.

Список литературы

1. Уидроу и др. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения. ТИИЭР, 1975, т.63, № 12.
2. Э.Айфичер, Б. Джервис. Цифровая обработка сигналов. Практический подход 2-е издание. Вильямс, 2008, т. 1000 экз.
3. А.И.Орлов и др. Разработка системы передачи речевых сигналов в условиях повышенных акустических помех от работающих механизмов. ФГУП «АКИН», 1993.