

# СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА<sup>1</sup>

## 1. Введение

Данный материал является попыткой создания простого и доступного способа оценки верности воспроизведения звукового сигнала в дополнение к стандартным методикам проверки, таким как измерение неравномерности АЧХ, коэффициента гармонических, интермодуляционных искажений, импульсной и переходной характеристик, динамического диапазона и т.д. Существует мнение о недостаточности результатов традиционных измерений для принятия решения о субъективном качестве звучания системы звуковоспроизведения. Возможно, причиной несоответствия инструментальных и субъективных оценок является использование тестового сигнала, имеющего стационарную структуру.

## 2. Назначение

Предлагаемый способ предназначен для проверки точности передачи сигнала произвольной формы при его масштабировании и передаче по проводным каналам, цифро-аналоговом, аналогово-цифровом, электроакустическом преобразовании, а также при других видах преобразования, вносящих искажения в целевой сигнал.

Способ выявляет искажения, связанные как с исходной нелинейностью амплитудной характеристики тракта, так и искажения, вызванные нестационарным характером целевого сигнала, обладая при этом пренебрежимо малой чувствительностью к статическим амплитудно-частотным и фазо-частотным искажениям сигнала.

## 3. Принцип работы

Принцип выявления нестационарных искажений основан на последовательном воздействии двух фрагментов тестового сигнала, обладающих одинаковой средней мощностью, различной формой, при этом имеющих заранее определенную линейную связь (связь, позволяющую с помощью линейного оператора (или «восстанавливающего» оператора) преобразовать эти фрагменты к одному виду).

---

<sup>1</sup> © Букварев Е.А. Считать официальной первичной публикацией.

Шумы, ошибки слежения, нестационарные изменения параметров тракта эту линейную связь нарушают, поэтому после применения к искаженным фрагментам тестового сигнала восстанавливающего оператора, их формы окажутся различными. Степень различия легко определить путем вычитания одного фрагмента из другого (получение «разностного» сигнала), а оценку субъективной заметности искажений (в случае «аудио тестирования») возможно получить из анализа разностного сигнала с использованием психоакустической модели слухового аппарата человека. Во многих случаях достаточно обычного прослушивания разностного сигнала. Для получения же числовых и визуальных оценок, целесообразно использовать традиционные методы частотно-временного анализа нестационарных сигналов, как линейные (спектрограммы, вейвлет преобразования), так и уточняющие нелинейные (например, преобразование Вигнера в скользящем окне).

Для формирования фрагментов тестового сигнала, в качестве линейного оператора предлагается использование преобразования Гильберта. Один из фрагментов является исходным, другой – его ортогональным дополнением, вычисляемым в соответствии с выражением:

$$s_h(t) = H\{s(t)\} = \int_{-T_s}^{T_s} \frac{s(\tau)}{\pi \cdot (t - \tau)} d\tau,$$

где  $s_h(t)$  – результат операции,  $T_s$  – длительность фрагмента,  $\tau$  – временной сдвиг.

Фрагменты  $s(t)$  и  $s_h(t)$  являются ортогональными, имеют одинаковый амплитудный спектр (за исключением постоянной составляющей), линейно связанные фазовые спектры, они идентичны по звучанию. Однако они различны по форме. Кроме того достоинством такого построения тестового сигнала является то, что при произвольных линейных искажениях, масштабировании, а также временном растяжении - сжатии фрагменты тестового сигнала сохраняют ортогональность. Эти особенности позволяют исключить влияние неравномерности АФЧХ тракта на результат, и использовать источник и приемник тестового сигнала, тактируемые от различных задающих генераторов. Полезной особенностью также является то, что в

качестве исходного фрагмента можно выбрать фрагмент музыкального произведения, представляющего собой нестационарный сигнал.

В качестве восстанавливающего оператора также используется преобразование Гильберта. После синхронного приема пары фрагментов  $s(t)$  и  $s_h(t)$  производится операция получения разностного сигнала:

$$s_{\Delta}(t) = H\{\hat{s}(t)\} - \hat{s}_h(t) = \int_{-T_s}^{T_s} \frac{\hat{s}(\tau)}{\pi \cdot (t - \tau)} d\tau - \hat{s}_h(t), \quad (1)$$

где  $s_{\Delta}(t)$  - разностный сигнал,  $T_s$  - длительность фрагмента,  $t$  - временной сдвиг,  $\hat{s}(t)$  и  $\hat{s}_h(t)$  - искаженные каналом фрагменты тестового сигнала.

Наличие аддитивных шумов в тракте ограничивает потенциальную точность однократной оценки. Для обеспечения возможности уточнения результата предлагается периодическое повторение измерений с накоплением результатов.

При добавлении в канал аддитивного шума, в разностном сигнале появляется аддитивная шумовая компонента  $n_{\Delta}(t)$ :

$$n_{\Delta}(t) = H\{\gamma(t)\} - \vartheta(t), \quad (2)$$

где  $\gamma(t)$  и  $\vartheta(t)$  - фрагменты реализации аддитивного шума.

В случае их некоррелированности,  $n_{\Delta}(t)$  представляет собой шум, мощностью, равной сумме мощностей фрагментов. При наличии же в этих реализациях коррелированных помех, например, фона сетевой частоты, мощность аддитивной шумовой компоненты будет зависеть от интервала между фрагментами  $s(t)$  и  $s_h(t)$ . Учитывая, что компонента  $\gamma(t)$  подвергается преобразованию Гильберта, интервал  $T_s$  можно выбрать таким образом, чтобы обеспечить взаимную компенсацию части коррелированных компонентов помехи в процессе выполнения операции (2).

В отсутствии искажений разностный сигнал будет представлять собой лишь шумовую компоненту  $n_{\Delta}(t)$ . Действительно, в предположении наличия в канале двух операторов искажений, линейного  $L\{\cdot\}$  и нелинейного -  $N\{\cdot\}$ , имеем:

$$\hat{s}_h(t) = L\{s_h(t)\} + N\{s_h(t)\}. \quad (3)$$

$$\hat{s}(t) = L\{s(t)\} + N\{s(t)\}. \quad (4)$$

С учетом (1), (3) и (4):

$$s_{\Delta}(t) = L\{H\{s(t)\} - s_h(t)\} + N\{H\{s(t)\}\} - N\{s_h(t)\} =$$

$$= 0 + N\{H\{s(t)\}\} - N\{s_h(t)\}, \quad (5)$$

а при добавлении шума приемной системы, с учетом (2) и (5) имеем финальный разностный сигнал вида:

$$S_{\Delta}(t) = s_{\Delta}(t) + n_{\Delta}(t) = N\{H\{s(t)\}\} - N\{s_h(t)\} + H\{\gamma(t)\} - \vartheta(t). \quad (6)$$

Компонента  $s_{\Delta}(t)$  может равняться нулю лишь в случае тождества:

$$H\{s(t)\} \equiv s_h(t),$$

что позволяет синтезировать метод оценки  $S_{\Delta}(t)$  на основе анализа статистических параметров разностного сигнала, т.к. в отсутствии искажений, статистика  $S_{\Delta}(t)$  окажется такой же, как и у шумового профиля системы «формирователь – канал – приемник». Для обеспечения возможности получения образца шумового профиля предлагается ввести в тестовый сигнал специальный фрагмент, состоящий полностью из нулевых отсчетов.

Для обеспечения возможности слепой синхронизации с принимаемыми данными, в начале тестового сигнала предлагается ввести маркер.

#### 4. Эксперимент

Для проверки потенциальной работоспособности способа был сформирован тестовый сигнал, состоящий из восьми последовательно расположенных фрагментов длительностью по 1048576 отсчетов частоты 44100 Гц. Первый фрагмент был получен из музыкального произведения. Второй представляет собой ортогональное дополнение первого. Остальные шесть фрагментов получены копированием первой пары. Такой тестовый сигнал позволяет провести как однократное измерение, так и усреднение результатов измерений количеством до четырех. Тестовый сигнал также не содержит участков, предназначенных для получения шумового профиля и синхронизации, поэтому при обработке, номер отсчета, соответствующего началу первого фрагмента выставлялся вручную.

В качестве «подопытных» были использованы звуковые карты FF400, ASUS D2X, усилители ZD50 и MARSHALL 8008.

Для первичных тестов в качестве основной математической обработки был выбран метод построения спектрограммы с размером скользящего окна, равным 256 отсчетов и весовой функцией Хемминга. Спектрограммы строились для двух диапазонов частот: 0..19845 кГц (полный диапазон, полоса фильтра - 172 Гц) и 0..1895 Гц (НЧ диапазон, полоса фильтра - 21,5 Гц). Перед построением НЧ спектрограммы, исходный сигнал подвергался 8-кратной децимации. На спектрограмме модуль результата обозначен в децибелах по отношению к уровню, достижимому при использовании гармонического сигнала полной шкалы разрядной сетки. Спектрограмма НЧ диапазона вычислялась на длительности, приблизительно соответствующей первой четверти тестового фрагмента, а спектрограмма полного диапазона - на участке с 502000 по 534000 номера отсчета тестового файла.

Кроме трехмерного графика поверхности «частота - время», был построен ряд двумерных графиков «относительной ошибки», вычисленной в соответствии с выражением:

$$ERR_{rel}(f) = \max_t \frac{|S_{\Delta}^f(t)|}{\max_t |\hat{s}^f(t)|} \quad (7)$$

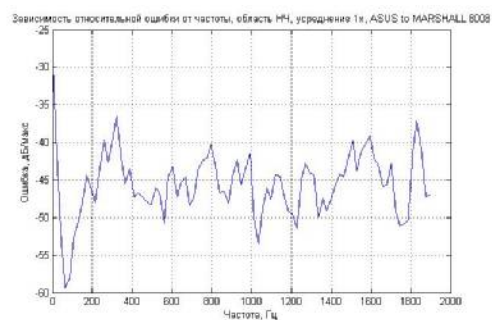
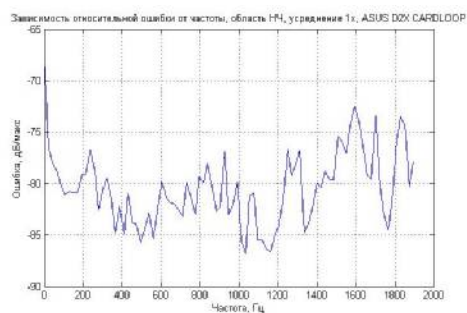
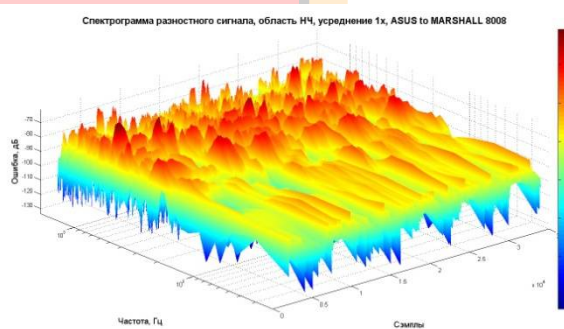
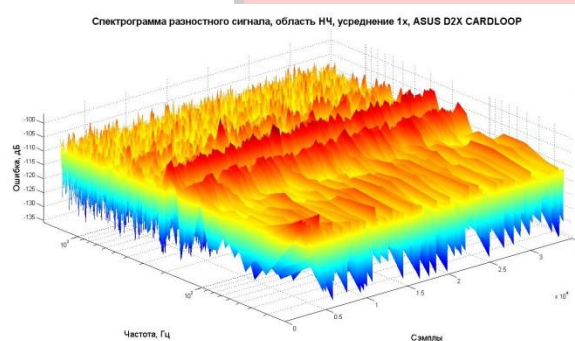
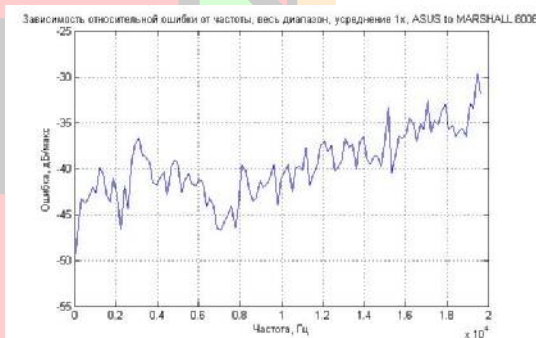
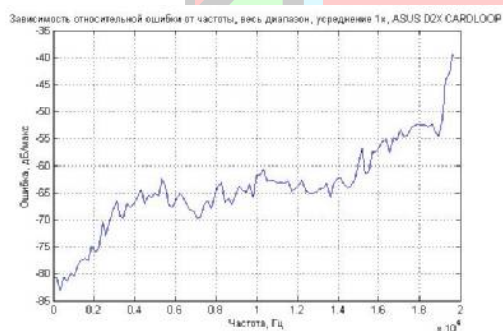
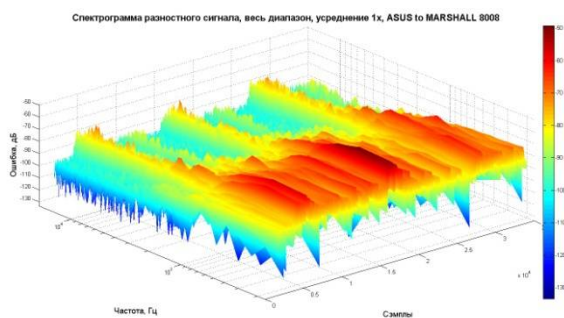
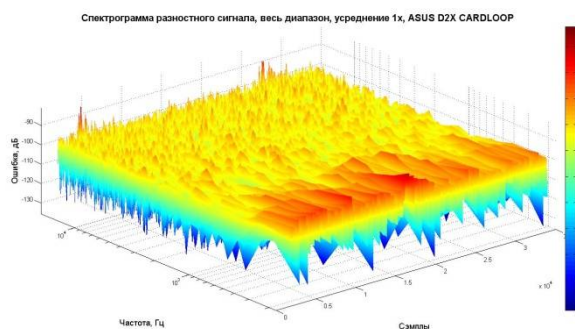
Этот показатель характеризует относительную точность воспроизведения формы тестового сигнала в каждой частотной полосе. Однако, если в некоторой частотной полосе амплитуда тестового сигнала мала, то за счет влияния шума, значение данного показателя будет занижено.

Кроме визуальных и числовых представлений, в процессе экспериментов были сохранены файлы разностных сигналов, нормированные к уровню 0,5 полной шкалы. Эти файлы доступны для скачивания и прослушивания.

Для удобства сравнения, графические материалы сгруппированы попарно – «карта», «усилитель».

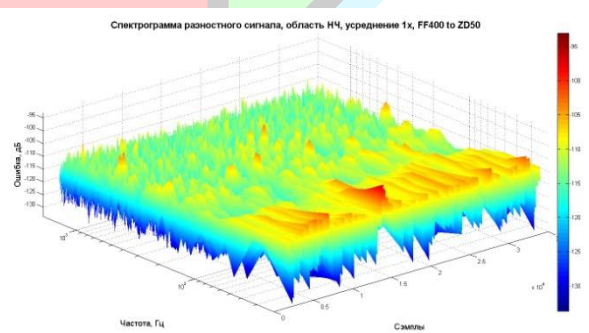
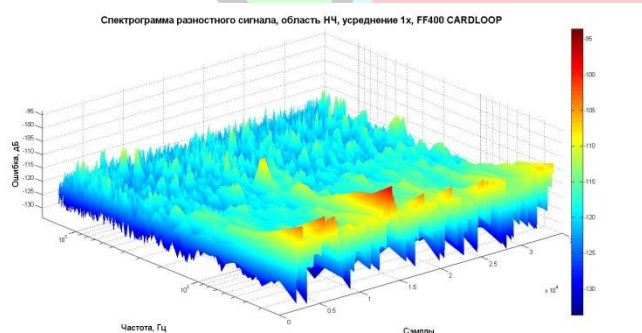
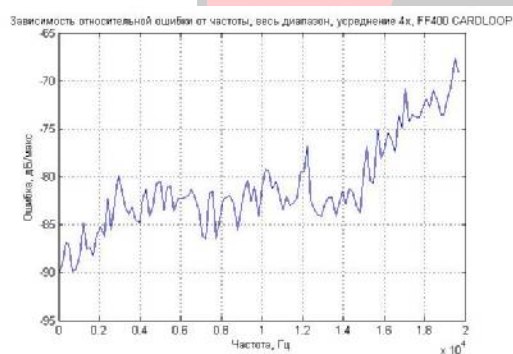
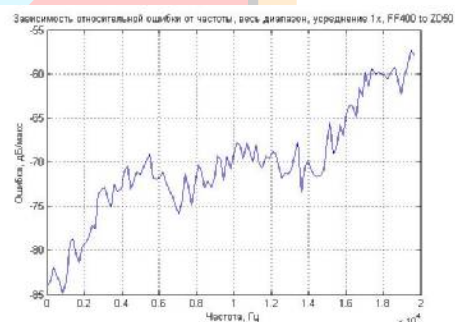
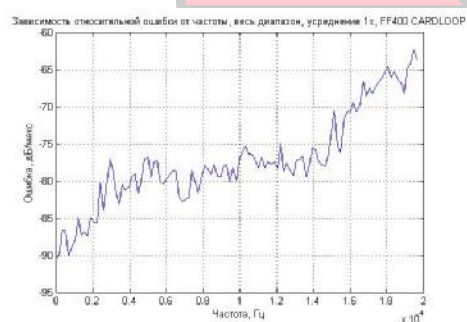
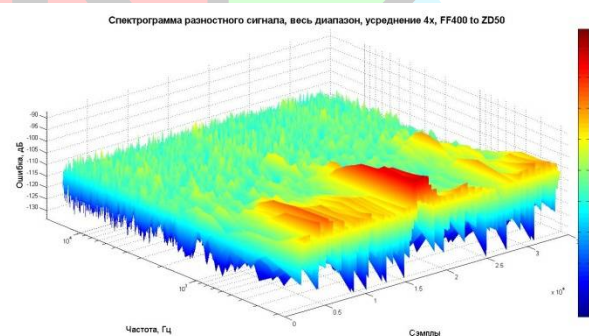
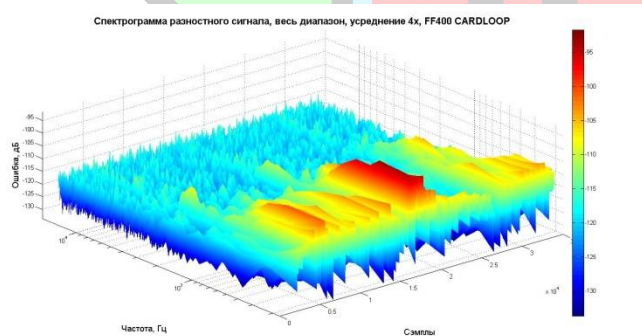
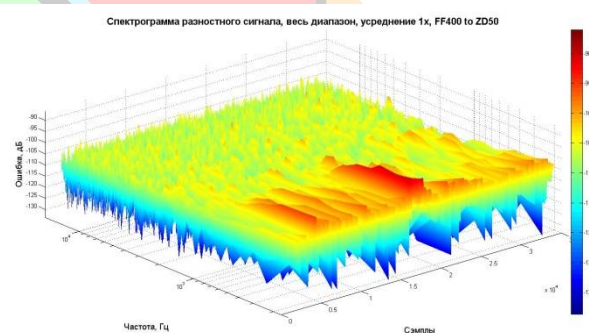
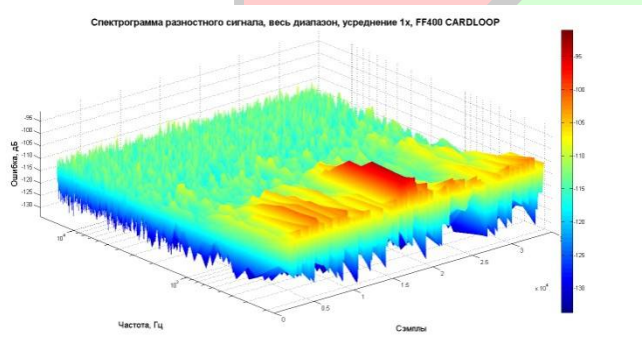
Ниже представлены результаты тестирования карты ASUS D2X и MARSHALL 8008 (усилитель был подключен к реальной широкополосной акустической системе номинальным сопротивлением 4 Ом, средняя выходная мощность – 3 Вт).



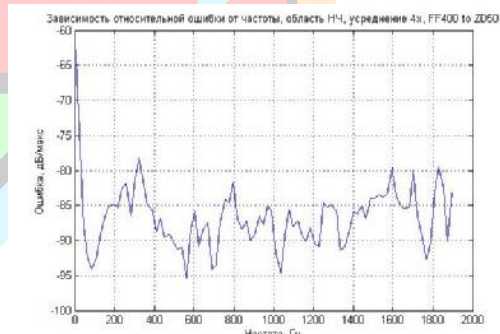
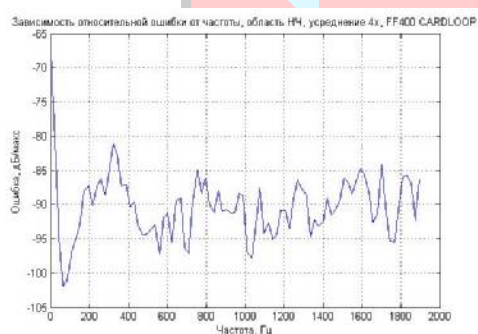
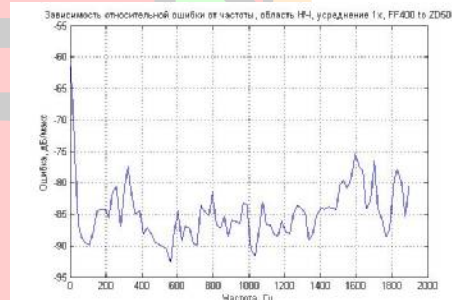
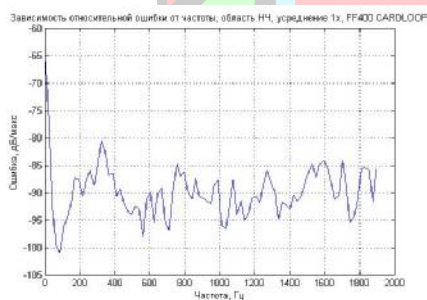
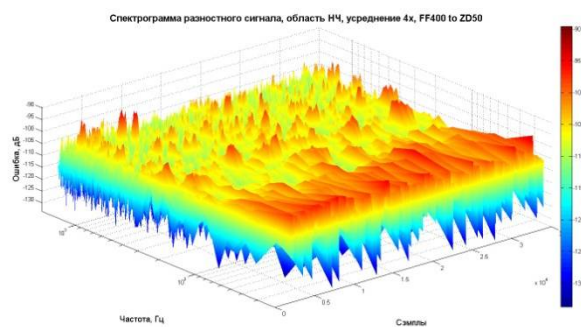
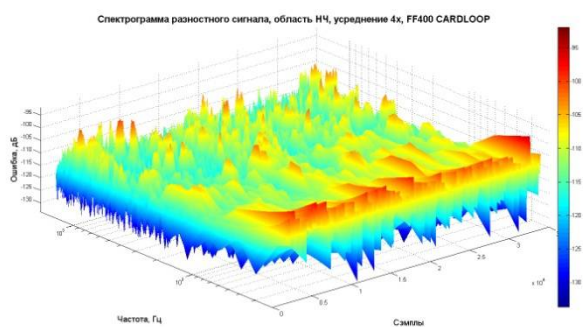


Из рисунков видно, что усилитель вносит значительное ухудшение точности усиливаемого сигнала (более 20 дБ). На широкополосной спектрограмме наблюдаются синхронные с хай-хетом искажения («гребни»), а на НЧ спектрограмме - явные артефакты, особенно выраженные в диапазоне от 400 до 1500 Гц. Эти данные свидетельствуют о явном отклонении статистики распределения разностного сигнала от нормальной и ухудшении верности.

Далее рассмотрим результаты тестирования карты FF400 и ZD50 (усилитель был подключен к резистивной нагрузке 10 Ом, средняя выходная мощность – 5 Вт).







Из рисунков видно, что эта пара обеспечивает значительно меньшие искажения. Также видно, что использование усреднения повышает контрастность результата, и, например, на широкополосной спектрограмме при усреднении результата также начинают проявляться «гребни», правда, их уровень весьма мал. Подобный результат также показывает, что реакция этих экземпляров звуковой карты и усилителя на один и тот же входной сигнал обладает хорошей повторяемостью от испытания к испытанию. Искажения, вносимые усилителем — мизерны, и качественные показатели второй пары в значительной мере определяются звуковой картой. Следует отметить, что данный экземпляр усилителя конструктивно был выполнен на очень высоком уровне.



Приведенные графические материалы и .wav файлы также доступны к скачиванию по ссылкам, приведенным ниже.

Тестовый файл:

[https://drive.google.com/open?id=0B0\\_v8MFWHsMJODEfJZGhtM2NlOUk](https://drive.google.com/open?id=0B0_v8MFWHsMJODEfJZGhtM2NlOUk)

ASUS D2X, MARSHALL 8008:

[https://drive.google.com/folderview?id=0B0\\_v8MFWHsMJfnVFESHdLdkhMNIROVVVZT3phZkNBLWhmSIBmd2h6ZUk2RINnTlYxX3UlcG8&usp=sharing](https://drive.google.com/folderview?id=0B0_v8MFWHsMJfnVFESHdLdkhMNIROVVVZT3phZkNBLWhmSIBmd2h6ZUk2RINnTlYxX3UlcG8&usp=sharing)

FF400, ZD50:

[https://drive.google.com/folderview?id=0B0\\_v8MFWHsMJf9hS3VLMF8ySWNraWdqcnk0azZHO2hLXzl6YmRlaFRvM3A3OXJKWTgyX0k&usp=sharing](https://drive.google.com/folderview?id=0B0_v8MFWHsMJf9hS3VLMF8ySWNraWdqcnk0azZHO2hLXzl6YmRlaFRvM3A3OXJKWTgyX0k&usp=sharing)

## 5. Заключение

Предложен сравнительно простой способ выявления искажений сигнала, показана техническая возможность его реализации на примере использования элементов звуковой техники.

Для проведения измерения не требуется знания формы тестового сигнала, а необходима лишь информация о приблизительной длительности его фрагмента, что позволяет тестировать аудиосистему без дополнительного оборудования. В частности, обладатель звуковой карты сможет выбрать/отрегулировать усилитель комплекса до уровня, соответствующего техническим возможностям этой карты, причем тестирование возможно проводить на фрагментах, соответствующих предпочтениям владельца аудиосистемы.

К недостаткам способа следует отнести его нечувствительность к эффектам добавления каналом некоррелированных шумовых помех. Наличие таких помех выявляется лишь с помощью оценки мощности добавленного шума по сравнению с шумовым профилем в процессе обработки разностного сигнала.

Данная статья является обзорной, и в ней не рассматриваются алгоритмы статистического анализа разностного сигнала, а также случай разнесенных формирователя и приемника тестового сигнала, и связанные с этим вопросы поиска начала тестового фрагмента, синхронизации, алгоритмы обработки.

Предлагаемый способ является представителем более общего метода исследования нелинейности преобразования детерминированных сигналов. Для детального ознакомления с теоретической основой метода [1–3] и его сравнению с традиционными [4], рекомендуем читателю обратиться к источникам, указанным в списке литературы.

Данный материал предоставляется открыто, на правах первичной публикации следующей группой лиц, принимавших активное участие в генерации, обсуждении идей и их проверке:

Антонов Александр,  
Букварев Евгений,  
Гапонов Игорь,  
Смаев Андрей.

04 сентября 2015 года. Нижний Новгород – Одесса.

#### **Список использованных источников**

1. Гапонов И. Шопен в палате мер и весов ("ЭВКЛИД")  
<http://www.sky.od.ua/%7Eeugeny/evclid.pdf>
2. Э.В. Семёнов. Исследование нелинейности преобразования детерминированных сверхширокополосных сигналов путем линейного комбинирования откликов объекта на линейно зависимые тестовые сигналы.  
<http://www.duskyrobin.com/tpu/2004-04-00005.pdf>
3. Э.В. Семенов. Патент RU2263929 "Способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом".
4. Э.В. Семенов, А.В. Семенов. Использование разности сверток тестовых сигналов и откликов объекта для исследования нелинейности преобразование сверхширокополосных сигналов. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2007, том 52, № 4, с. 480–485.