

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ ПО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ

RESEARCH OF DISTORTIONS OF THE ENERGY PARAMETERS OF AUDIO BROADCASTING SIGNALS BY THE METHOD OF COMPLEX STATISTICAL ESTIMATION

**O. Popov
T. Chernysheva
V. Abramov
A. Borisov**

Summary. It has been shown that passing an audio signal through the links of a transmission path, in which parameters and volume of the signal are transformed, can result in emotional degradation of the sound of informational messages. In addition, the transmission path may introduce an emotional content into the sound information that was not present initially. The quality and completeness of transmission of the audio signal is well evaluated by the nature of changes in its energy parameters. It has been found that objective evaluations of the quality of transmission of these signals in communication channels, which have a strong correlation with subjective evaluations of these signals, can be obtained based on the analysis of the most significant statistical parameters of broadcasting signals. A methodology has been proposed to combine an objective assessment of the sound signal with the results of subjective-statistical measurements, which involves using complex statistical evaluation of the energy parameters of the signal. Such an approach to evaluating the quality of transmission of informational audio signals proves to be quite effective in conditions of various interferences and distortions that operate in transmission channels. Meanwhile, other objective methods of evaluation formed without the involvement of a perceiving human, may prove to be less efficient. An experimental study was conducted on the dependence of changes in statistical parameters of relative mean power of sound signals as they are subjected to various types of distortions and interferences. The study results showed a high correlation between changes in the parameters of relative mean power of signals and their subjective perceptibility. The originality of this research is protected by registered programs and patents as well as various articles in journals. By using the results of this research, it is possible to improve the quality of broadcasting signals and informational programs, as well as to more effectively control and regulate sound broadcasting equipment, thereby increasing the popularity ratings of broadcasting stations and their economic efficiency.

Keywords: adaptive sound broadcasting channels, objective and subjective estimation of transmission quality, relative average power complex statistical estimation.

Попов Олег Борисович

*к.т.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
olegp45@yandex.ru;*

Чернышева Татьяна Васильевна

*к.т.н., доцент, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
krba2012@yandex.ru;*

Абрамов Валентин Александрович

*к.т.н., доцент, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
vabramov44@mail.ru;*

Борисов Андрей Алексеевич

*аспирант, Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)
a.borisov199@gmail.com*

Аннотация. Показано, что при прохождении звукового сигнала по звеньям передающего тракта, в которых осуществляется преобразование параметров и объема сигнала, может происходить эмоциональное ухудшение звучания информационных сообщений. Кроме того, передающий тракт может вносить в звуковую информацию не свойственную ей изначально эмоциональное содержание. При этом качество и полнота передачи звукового сигнала хорошо оцениваются характером изменений его энергетических параметров. Выяснено, что на основе анализа наиболее значимых статистических параметров вещательных сигналов могут быть получены объективные оценки качества передачи этих сигналов в каналах связи, имеющие сильную коррелированность с субъективными оценками этих сигналов. В основу методики, позволяющей совместить объективную оценку звукового сигнала с результатами субъективно-статистических измерений, предложено использовать комплексное статистическое оценивание энергетических параметров сигнала. Такое рассмотрение оценок качества передачи информационного звукового сигнала является довольно эффективным в условиях воздействия разнообразных помех и искажений, действующих в каналах передачи. При этом другие объективные методы оценок, сформированные без участия воспринимающего человека, могут проявлять себя как не очень эффективные. Проведено экспериментальное исследование зависимости изменения статистических параметров относительной средней мощности звуковых сигналов от вносимых в сигнал различных видов искажений и помех. Результаты исследования показали высокую корреляцию между изменениями параметров относительной средней мощности сигналов и их субъективной заметностью. Оригинальность данного исследования подтверждена зарегистрированными программами и патентами, а также статьями в различных журналах. Использование результатов данной работы позволяет повысить качество вещательных сигналов и информационных программ, а также более качественно контролировать и регулировать аппаратуру звукового вещания и за счет этого повышать рейтинги популярности вещательных станций, а также повышать экономическую эффективность данных станций.

Ключевые слова: адаптивные каналы звукового вещания, объективная и субъективная оценки качества передачи, относительная средняя мощность, комплексное статистическое оценивание.

Введение

Исследования и разработки в области оценки и контроля качества передачи и приема звуковых информационных сигналов связаны в том числе с существующими способами кодирования и сложного представления цифровых сигналов. Также имеет значение, при оценках качества сигналов, некоторые особенностей восприятия этих звуковых информационных сигналов слушателями. Это связано с тем, что качество звуковых сигналов зависит в том числе от согласованности параметров каналов передачи со свойствами сигнала. Кроме того, это качество в значительной степени определяется степенью согласования параметров звукового информационного сигнала с характеристиками слухового анализатора человека. Результаты таких согласований в значительной степени определяют эффективность и качество передачи звуковых сигналов по существующим каналам связи.

В настоящее время при передаче звуковых вещательных сигналов используются методы, основанные на адаптивной обработке этих сигналов, связанные с изменениями их формы. Однако используемые способы оценки и контроля качества передачи основаны на применении малокомпонентных гармонических тестовых сигналов в условиях отключения всех устройств адаптивной обработки сигнала. Поэтому качество звуковых сигналов, передаваемых по каналам с адаптивной обработкой, приходится определять на основе субъективно-статистических испытаний (ССИ), которые являются достаточно сложными и дорогими.

В связи с этим целью данной работы является разработка метода, открывающего возможность по связыванию оценок качества передачи звуковых сигналов, полученных путем их объективных измерений, с субъективными оценками качества, полученными бригадами экспертов. Данная цель может быть осуществлена, в частности, на основе исследований и оценок энергетических параметров вещательного сигнала.

Методика проведения исследований

В основу метода, позволяющего связать субъективно-статистические оценки качества с объективными результатами измерений звукового сигнала, было предложено использовать комплексное статистическое оценивание наиболее значимых параметров сигнала. Исследования изменений параметров звуковых сигналов при внесении в них искажений и помех, осуществлялись на основе компьютерных программ. В качестве основного программного набора использовались звуковой редактор *Cool Edit 2000*, а также оригинальные программы и патенты [3, 6, 9, 10].

Результаты исследований

Известно, что различного рода искажения в звуковых сигналах замечаются слуховым анализатором человека при величинах примерно 2...3 %. При таких искажениях изменяются многие параметры сигнала, в том числе его энергетические характеристики, наиболее успешно определяемые относительной средней мощностью (ОСМ) данного сигнала.

Относительная средняя мощность определяется как отношение измеренной мощности сигнала P на ограниченном отрезке времени к мощности синусоидального сигнала P_0 с амплитудой, равной наибольшему значению амплитуды вещательного сигнала [1].

Существуют два вида ОСМ в зависимости от значения P_0 . Имеется «канальная» ОСМ (ОСМк), в которой P_0 на длительности фрагмента сигнала соответствует мощности гармонического колебания с амплитудой, равной номинальному уровню сигнала в канале связи или равной максимальному уровню квантования на этом фрагменте. Особенностью канальной ОСМ является то, что она характеризует степень загрузки канала связи. Кроме того, ОСМк дает возможность оценивать диапазон громкости звукового сигнала, а также изменения в параметрах модуляции этого сигнала. В случае же, когда P_0 на длительности фрагмента соответствует мощности гармонического колебания с амплитудой, равной пиковому значению звукового информационного сигнала, то в этом случае имеет место «сигнальная» ОСМ (ОСМс). Особенностью этой сигнальной ОСМ является то, что она характеризует энергетику звукового сигнала. Величины ОСМк и ОСМс во многом определяют временной структурой сигнала в виде звуковых элементов и пауз между ними. При этом, чем меньше пауз будет присутствовать в звуковом сигнале, тем выше будет величина ОСМ. В реальных звуковых вещательных сигналах ОСМ находится в пределах от 0 до 0,4.

Относительная средняя мощность, характеризующая энергию сигнала, остается основным критерием качества для слушателей. При прослушивании абонентом голосовой или музыкальной информации важное значение имеет характеристика энергичности звучания, которая во многом определяет эмоциональное содержание данной информации. Энергичность звучания определяет диапазон изменения громкости содержащегося в звуковом сигнале.

В информационном сообщении его энергичность объективно выражается в изменении параметров канальных ОСМ [1, 2]. Относительная средняя мощность сигнала связана также с динамикой звукового сообщения, которая, в свою очередь, связана с динамическими контрастами сигнала. Так, при звучании симфонического

оркестра это выражается в яркости контраста динамической громкости звучания. А для певцов характерно поддержание динамических оттенков в звучании, что выражается в сравнительно не больших изменениях громкости. При этом появление искажений в виде ослабления громкостной динамики способствует заметному уменьшению воздействия музыки на эмоциональные состояния слушателей. В наибольшей степени, качество и полноту передачи эмоций принято оценивать на голосах великих певцов прошлого, таких как Шаляпин или Карузо. Энергетические параметры сигнала в виде ОСМк, ОСМс очень хорошо характеризуют упомянутую громкостную динамику сигнала [1, 2, 3].

При прохождении звукового сигнала по звеньям передающего тракта, в которых осуществляется преобразование параметров и объема сигнала, может происходить эмоциональное ухудшение звучания информационных сообщений. Кроме того, передающий тракт может вносить в звуковую информацию не свойственную ей изначально эмоциональное содержание [4]. При этом качество и полнота передачи эмоций в звуковом сигнале хорошо оцениваются характером изменений распределений ОСМс [3,4,5].

При появлении в звуковом сигнале различных искажений и помех, то такой параметр относительной средней мощности, как частота появления значений ОСМ, будет изменяться, что позволяет контролировать по характеру этих изменений степень искажений звукового сигнала. Искажения и помехи в виде изменения динамического диапазона или изменения спектра сигнала, а также нелинейных искажений или шумовой помехи будут изменять картину распределения частот появления значений ОСМ. Это выражается, в том числе, в смещении гистограммы по оси значений, увеличении или уменьшении величин максимальных значений частоты появления ОСМ. Кроме того, это выражается в виде расширения или сужение гистограммы распределения, а также в изменениях крутизны фронтов и спадов этого распределения. Для оценки степени изменений гистограммы ОСМс и ОСМк было предложено использовать такую характеристику этой гистограммы как *интегральное отклонение* (ИО) ОСМс и ОСМк. При этом, время интеграции предложено выбрать равным 200 мс, что соответствует времени интеграции слухового анализатора [1].

В основу метода, позволяющего связать субъективно-статистические оценки качества с объективными результатами измерений энергетических параметров звукового сигнала, было предложено использовать *комплексное статистическое оценивание* (КСО) [6, 7, 8]. Это необходимо для того, чтобы в результате такого комплексного статистического оценивания объективно измеряемые параметры звукового сигнала были бы тесно

связаны, с субъективными оценками слушателями качества звучания этого звукового сигнала.

Следовательно, на основе использования *метода комплексного статистического оценивания* (МКСО) можно формировать оценки качества функционирования каналов передачи звуковой информации. При этом, комплексное статистическое оценивание может характеризовать параметры звуковых сигналов и оценивать степень их искажений вследствие воздействия на эти сигналы различных помех в каналах связи с изменяющимися характеристиками.

Объективные результаты статистического оценивания затем привязываются к субъективным оценкам качества, полученных в результате субъективно-статистических испытаний (ССИ), на основе осуществления операции шкалирования. Подобный метод оценки качества передачи информационного звукового сигнала является довольно эффективным в условиях воздействия разнообразных помех и искажений, действующих в каналах передачи. При этом другие объективные методы оценок, сформированные без участия воспринимающего человека, могут проявлять себя как не очень эффективные.

При реализации операции шкалирования, оценки сигналов, сформированных на основе объективных измерений, необходимо соединить с результатами оценок, полученных при субъективно-статистических испытаниях. В качестве параметра, отражающего степень связанности результатов субъективных и объективных испытаний, может использоваться коэффициент корреляции r .

Для оценки энергетических параметров звукового вещательного сигнала был разработан соответствующий алгоритм и программное обеспечение [3,6,9,10]. Результатом анализа данных энергетических параметров являются нормированные статистические частоты появления значений (НЧПЗ) этих параметров. На основании полученных НЧПЗ затем может быть определено интегральное отклонение (ИО) этих НЧПЗ в виде величин несовпадений частот появления этих параметров сигналов до и после прохождения канала передачи.

Эксперимент проводился на основе мультимедийного вычислительного комплекса. При этом все необходимые введения искажений и помех в звуковые сигналы и исследования параметров этих сигналов, осуществлялись на основе компьютерных программ. Основным программным набором стал звуковой редактор *Cool Edit 2000*, а также использования оригинальных программ и патентов [3, 6, 9,10,11].

При экспериментальном исследовании в звуковой сигнал вносились следующие виды искажений и помех:

ограничение полосы частот, ограничение динамического диапазона, белый шум, нелинейные искажения.

Для оценки изменений сигнала звукового вещания при воздействии на него различных видов искажений и помех было осуществлено исследование сигнальной ОСМ (**ОСМс**) и канальной ОСМ (**ОСМк**).

На рис. 1 и рис. 2 показаны графики зависимости интегрального отклонения ОСМс от частоты ограничения спектра сигнала, соответственно, снизу и сверху. А на рис. 3 и рис. 4 показаны графики зависимости интегрального отклонения ОСМк от частоты ограничения спектра сигнала, соответственно, снизу и сверху.

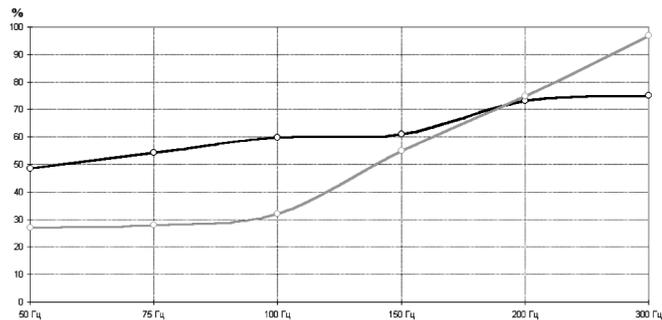


Рис. 1. Интегральное отклонение ОСМс при ограничении спектра сигнала снизу (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

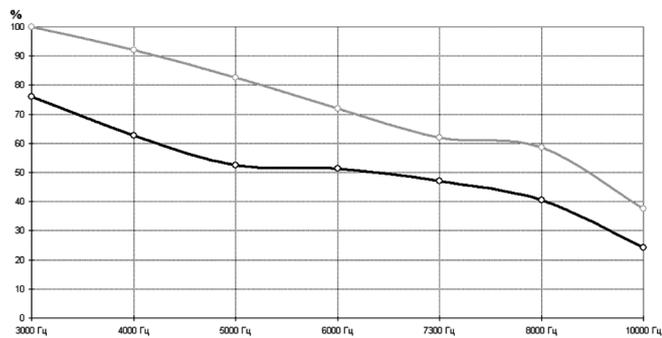


Рис. 2. Интегральное отклонение ОСМс при ограничении спектра сигнала сверху (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

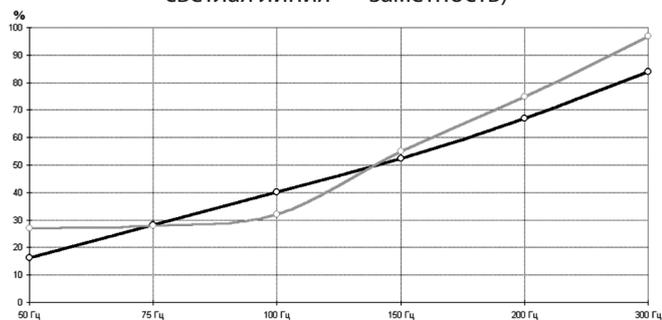


Рис. 3. Интегральное отклонение ОСМк при ограничении спектра сигнала, снизу (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

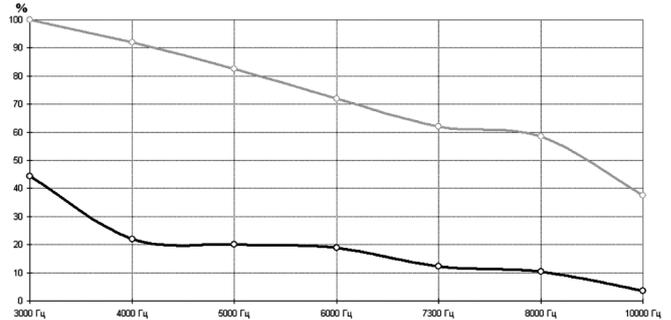


Рис. 4. Интегральное отклонение ОСМк при ограничении спектра сигнала сверху (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

Анализ полученных графиков показывает, что при ограничении спектра звукового сигнала канальная относительная средняя мощность (рис. 3 и рис. 4) коррелирована в несколько большей степени с субъективным восприятием (заметностью) по сравнению с сигнальной относительной средней мощностью. Это можно объяснить тем, что сигнальные ОСМс, довольно чувствительны к шумам при отсутствии сигнала и, поэтому, оказываются более требовательными к выбору параметров временного фрагмента.

Для оценки степени связанности полученных экспериментальных результатов с результатами ССИ использовался коэффициент корреляции (КК). Средний по разным информационным жанрам коэффициент корреляции при ограничении в области НЧ для ОСМс составляет 0,937, а для ОСМк, составляет 0,967. А средний по разным музыкальным жанрам коэффициент корреляции при ограничении в области ВЧ для ОСМс составляет 0,947, а для ОСМк, составляет 0,896.

Высокие показатели коэффициентов корреляции указывают на то, что статистика интегральных отклонений ОСМс и ОСМк при ограничениях спектра сигнала на нижних и верхних частотах могут быть использованы в качестве параметров, хорошо коррелирующих с субъективными оценками восприятия.

На рис. 5 и 6 показаны, соответственно, график зависимости интегрального отклонения ОСМс и ОСМк при воздействии на звуковой сигнал разных значений аддитивного белого шума

Коэффициенты корреляции для ОСМс и ОСМк при воздействии на звуковой сигнал аддитивного белого шума, равны, соответственно, 0,9960 и 0,9901, что свидетельствует об очень высокой степени связанности субъективных и объективных оценок этого сигнала. При этом ОСМс и ОСМк хорошо выявляют степень воздействия шума на звуковой сигнал, поскольку это воздействие, в значительной степени выражается как энергетическое

искажение. Данные показатели коэффициентов корреляции r указывают на то, что объективные результаты оценки сигнала в виде статистики интегрального отклонения ОСМс и ОСМк в зависимости от воздействия на звуковой сигнал разных значений аддитивного белого шума могут быть использованы в качестве параметров, хорошо коррелирующих с субъективными оценками восприятия.

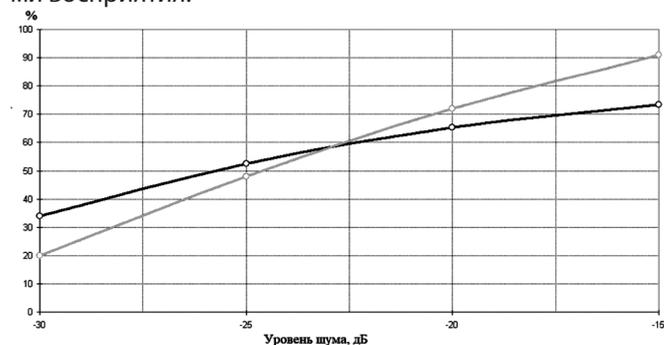


Рис. 5. Интегральное отклонение ОСМс при воздействии на звуковой сигнал аддитивного белого шума (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

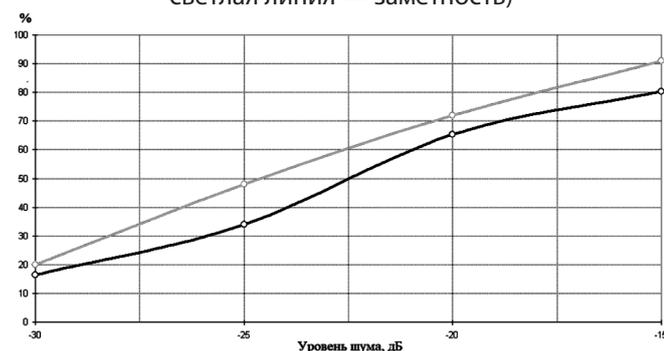


Рис. 6. Интегральное отклонение ОСМк при воздействии на звуковой сигнал аддитивного белого шума (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

На рис. 7 показан график зависимости интегрального отклонения ОСМс, а на рис. 8 график зависимости интегрального отклонения ОСМк от степени сжатия динамического диапазона звукового сигнала автоматическим регулятором уровня (АРУР).

Коэффициенты корреляции для ОСМс и ОСМк при ограничении динамического диапазона АРУРом, равны, соответственно, 0,9274 и 0,9183, что свидетельствует о высокой степени связанности разных оценок этого сигнала. Данные показатели указывают на то, что объективные результаты оценки сигнала в виде статистики интегрального отклонения ОСМс и ОСМк в зависимости от уровня ограничения динамического диапазона звукового сигнала АРУРом могут быть использованы в каче-

стве параметров, хорошо коррелирующих с субъективными оценками восприятия.

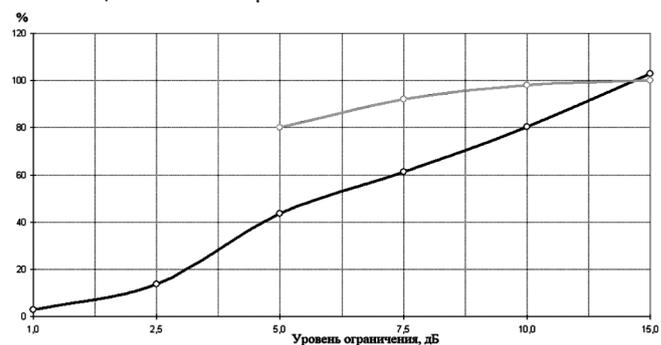


Рис. 7. Интегральное отклонение ОСМс при ограничении динамического диапазона АРУРом (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

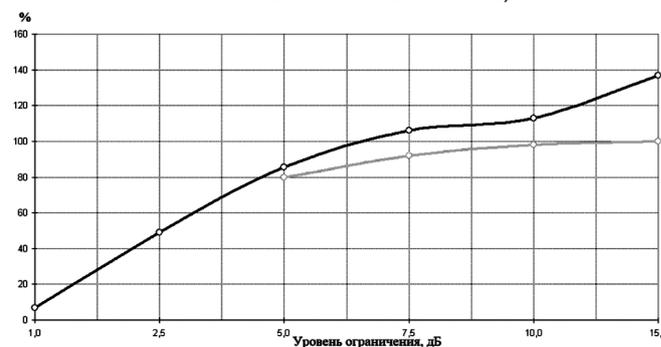


Рис. 8. Интегральное отклонение ОСМк при ограничении динамического диапазона АРУРом (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

На рис. 9 и 10 показаны, соответственно, графики зависимости интегрального отклонения ОСМс и ОСМк при нелинейных искажениях сигнала в виде двухстороннего ограничения амплитуды.

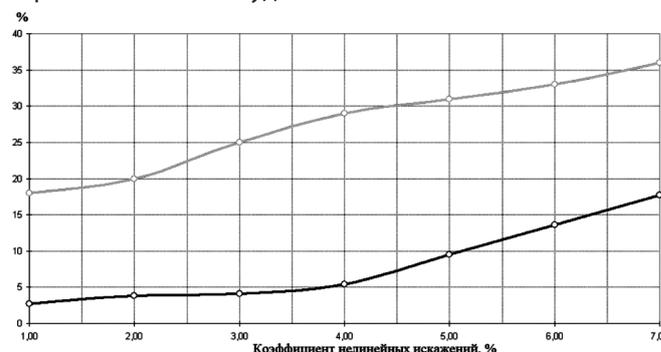


Рис. 9. Интегральное отклонение ОСМс при нелинейных искажениях сигнала в виде двухстороннего ограничения амплитуды (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

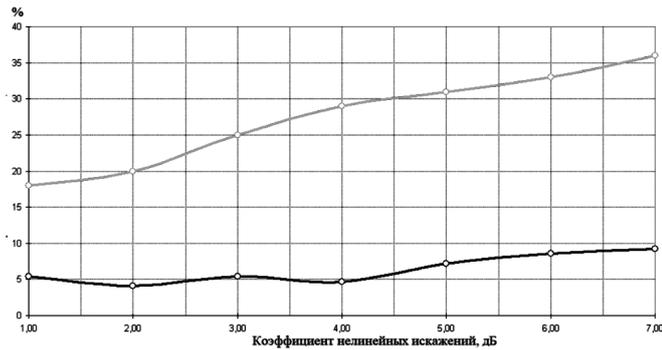


Рис. 10. Интегральное отклонение ОСМк при нелинейных искажениях сигнала в виде двухстороннего ограничения амплитуды (темная линия — интегральное отклонение, светлая линия — заметность)

Результаты в виде объективной и субъективной оценки данного вида искажений показывают, что коэффициенты корреляции для ОСМс и ОСМк равны, соответственно, 0,8989 и 0,8156, что свидетельствует о высокой степени связанности разных оценок этого сигнала. Данные показатели коэффициентов корреляции r указывают на то, что объективные результаты оценки сигнала в виде статистики интегрального отклонения ОСМс и ОСМк при нелинейных искажениях сигнала в виде двухстороннего ограничения амплитуды могут быть использованы в качестве параметров, хорошо коррелирующих с субъективными оценками восприятия.

Заключение

В основу метода, позволяющего связать субъективно-статистические оценки качества с объективными результатами измерений звукового сигнала, было предложено использовать комплексное статистическое оценивание некоторых наиболее значимых параметров сигнала.

При воздействии на передаваемый звуковой сигнал искажений и помех, исходный и прошедший канал связи сигналы будут отличаться, поэтому в качестве параметра оценивания такого отличия предложено использовать энергетические параметры сигнала.

Использование энергетических параметров звукового сигнала позволяет оценить такие важные характеристики как относительную среднюю мощность сигнальную (ОСМс) и относительную среднюю мощность канальную (ОСМк) при воздействии на звуковой сигнал различных искажений и помех.

В основу методики, позволяющей совместить объективную оценку звукового сигнала с результатами субъективно-статистических измерений, предложено использовать комплексное статистическое оценивание (КСО) наиболее значимых энергетических параметров сигнала.

Для экспериментальной проверки качества оценки звукового сигнала на основе комплексного статистического оценивания, а также проверки алгоритма определения энергетических параметров, осуществлялся выбор звукового материала в соответствии с исследованиями, проведенными в свое время на кафедре РВ и ЭА МТУСИ.

Проведено экспериментальное исследование изменений статистики энергетических параметров звуковых сигналов в зависимости от вносимых в сигнал следующих видов искажений и помех: ограничение полосы частот, ограничение динамического диапазона, белый шум, нелинейные искажения. Результаты исследования показали высокую корреляцию между изменениями этих энергетических параметров и их субъективной заметностью, когда средний коэффициент корреляции составил не ниже 80 %.

Оригинальность данного исследования подтверждено зарегистрированными программами и патентами, а также статьями в различных журналах.

Использование результатов данной работы позволяет повысить качество вещательных сигналов и информационных программ, а также более качественно контролировать и регулировать аппаратуру звукового вещания и за счет этого повышать популярность телерадиовещательных станций, а также повышать экономическую эффективность данных станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Командирование сигналов в канале звукового вещания. О.Б. Попов, С.Г. Рихтер, А.Н. Терехов и др.; Под ред. профессора С.Г. Рихтера. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 298 с.: ил.
2. V.A. Abramov, V.G. Taktakishvili, A.A. Ovchinnikov, O.B. Popov «Objective Assessment of Transmission and Informativeness of a Speech Signal According to Statistical Parameters». Proceedings of the FRUCT 24, Moscow, Russia, 8–12 April 2019, p. 741–746.
3. Вычислитель уровня громкости по ITU-RBS.1770. Версия 1.4 «GROM». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618009, Россия. Дата гос. регистрации 05.07.2018. Авторы: Абрамов В.А., Попов О.Б., Люкина Е.В., Яновский А.С., Борисов А.А.
4. Абрамов В.А. Попов О.Б., Чернышева Т.В. Эмоциональная информативность звуковых вещательных сигналов. Международный форум информатизации (МФИ-2018). Международный конгресс (СТН-2018) Коммуникационные технологии и сети. М. МТУСИ, 2018, с.419–421.

5. V.A. Abramov, O.B. Popov, T.V. Chernysheva, V.G. Taktakishvili and A.A. Ovchinnikov, «On-board Transmission Quality Assessment Using Short Audio Signal», 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416085.
6. Комплексное представление сигналов ПО «Комплекс». Версия 2019. 09.24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667523. Дата гос. Регистрации 24.12.2019. Авторы: Абрамов В.А., Попов О.Б., Тактакишвили В.Г., Чернышева Т.В., Овчинников А.А.
7. Тактакишвили В.Г., Абрамов В.А., Попов О. Б., Борисов А.А. Методы компактного представления, оценки и обработки звуковых сигналов на основе их комплексного представления. Журнал Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт.2019, том 13, №2, с. 11–17.
8. V.A. Abramov, O.B. Popov, V.G. Taktakishvili, A.A. Ovchinnikov Analysis and Processing of Audio Signals Using Complex Form Representation. Proceedings of the FRUCT 24, Moscow, Russia, 8–12 April 2019, pp.735–740.
9. Способ и устройство компандирования звуковых вещательных сигналов. Патент России № 2691122. БИ №17, 11.06.2019. Авторы: Абрамов В.А., Попов О.Б., Орлов В.Г.
10. Способ и устройство измерения мощности и крутизны нарастания участков нестационарности акустических сигналов. Патент России № 2731339, опубликован 01.09.2020 г. Авторы: Абрамов В.А., Попов О.Б., Тактакишвили В.Г.
11. Способ и устройство измерения ритмических частот, мощности и длительности спадов участков нестационарности акустических сигналов. Патент России № 2773261. Опубликовано 01.06.2022. Авторы: Абрамов В.А., Попов О.Б., Власюк И.В., Балобанов А.В.

© Попов Олег Борисович (olegr45@yandex.ru); Чернышева Татьяна Васильевна (krba2012@yandex.ru);
Абрамов Валентин Александрович (vabramov44@mail.ru); Борисов Андрей Алексеевич (a.borisov199@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»