

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРА СИГНАЛА ВЕЩАНИЯ

Е. Н. Десятирикова\*, Н. Б. Горбачева\*\*, М. Б. Подболотова\*\*

\* Воронежский государственный университет

\*\* Воронежский филиал Российского государственного торгово-экономического университета

Поступила в редакцию 25.11.2012 г.

**Аннотация.** В статье рассматриваются проблема регулирования вещательного сигнала. Алгоритмы регулирования с использованием метода расщепления сигнала ЗВ на аналитическую огибающую и мгновенную фазу позволяют изменить мощностные свойства сигнала без заметности этих изменений для слушателя. Метод разработки регуляторов динамического диапазона для цифровых звуковых систем с использованием цифрового сигнального процессора возможен только с использованием сопряженного по Гильберту сигнала. Представлен способ регулирования с помощью преобразования Фурье и Гильберта.

**Ключевые слова:** звуковой сигнал, канал вещания, диапазон, нелинейные искажения, огибающая, преобразование Фурье, преобразование Гильберта.

**Annotation.** In article are considered a problem of regulation of a broadcasting signal. Algorithms of regulation with use of a method of splitting of a signal of ZV allow to change moshchnostny properties of a signal to an analytical bending-around and instant phase without a visibility of these changes for the listener. The method of development of regulators of a dynamic range for digital sound systems with use of the digital alarm processor is possible only with use of the signal interfaced on Hilbert. The way of regulation by means of Fourier and Hilbert's transformation is presented.

**Keywords:** sound signal, the broadcasting channel, range, the nonlinear distortions, bending around, Fourier's transformation, Hilbert's transformation.

Практически во всех современных системах звукового вещания (ЗВ) и массового оповещения принимаются меры для улучшения их эксплуатационных характеристик за счет автоматического регулирования уровня звукового сигнала. Поэтому проблема регулирования вещательного сигнала остаётся актуальной, несмотря на то, что свойства сигналов и их изменения при различных регулировках в процессе длительных и тщательных исследований уже хорошо изучены.

Множества созданных устройств осуществляют динамическую компрессию вещательных сигналов и автоматическую стабилизацию их уровня на входе передатчика, повышают КПД и среднюю мощность передатчиков, расширяют зону уверенного приема и увеличивают отношение сигнал-шум. Однако, дальнейшее улучшение эксплуатационных характеристик сдерживается возможностями используемых алгоритмов регулирования, традиционных в своей основе, а также снижением абонентской оценки

качества сигнала. Использование глубокой обработки сигнала с привлечением закономерностей звуковосприятия, особенностей заметности шумов и помех на фоне сигнала, осложняется отсутствием адекватной модели восприятия и спорностью многих положений, лежащих в основе ряда практических устройств.

Алгоритмы регулирования [1] с использованием метода расщепления сигнала ЗВ на аналитическую огибающую и мгновенную фазу (косинус мгновенной фазы) позволяют изменить мощностные свойства сигнала без заметности этих изменений для слушателя. Таким образом, производится практически безинерционное регулирование динамического диапазона сигнала вещания, то есть устраняется один из недостатков. Это регулирование не сопровождается расширением спектра сигнала в канале передачи и не вносит искажений в форму сигнала на выходе канала передачи.

Такое регулирование стало возможным только теперь из-за быстрого развития вычислительной техники и способов цифровой обработки звукового сигнала.

Радиовещание (РВ) и телевидение (ТВ) стали неотъемлемой частью жизни общества, важным средством политического, эстетического и нравственного воздействия на население.

Одним из главных преимуществ РВ как средства доставки информации является оперативность, недостижимая пока ТВ. Просмотр ТВ передач требует минимальных усилий и предполагает прекращение всякой полезной деятельности, в отличие от РВ, при прослушивании программ которого возможно продолжение работы. В ряде случаев такое прослушивание просто необходимо, например, передачи для водителей знакомят их с дорожной обстановкой и помогают не заснуть. Специально подобранные музыкальные программы позволяют увеличить производительность труда на конвейере на 5–7%, увеличить удои коров на 20%, яйценоскость кур на 10–15%, урожайность зерновых на 30%.

Происходит это за счет сигналов звукового вещания (колебаний), соответствующих речи, музыке или их сочетанию.

Сигнал звукового вещания является случайным процессом, характеризующие его акустические или электрические величины непрерывно изменяются во времени. Для описания сигнала используются следующие характеристики:

- распределение энергии по динамическому диапазону;
- интегральные функции распределения;
- распределения функции плотности вероятности мгновенных значений;
- энергетические спектры сигналов.

Задача художественного вещания состоит в том, чтобы слушатель, находясь достаточно далеко, получил бы точно такое ощущение, как и слушатель, находящийся в концертном зале. Если эти ощущения неотличимы, тогда задача радиовещания решена. Сейчас "домашнее" восприятие еще значительно отличается от непосредственного прослушивания. Причин такого несовпадения можно указать несколько.

## 1. ПОТЕРЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ПЕРСПЕКТИВЫ

Слушая музыку в концертном зале, благодаря наличию двух органов слуха, мы воспринимаем те характеристики звучания, которые связаны с направлением прихода звука. Мы замечаем, что звуки струнных инструментов приходят из центра, медные инструменты рас-

положены справа, а ударные – сзади и слева. Слушая ту же программу по каналу вещания, мы все звуки получаем из одной точки. Даже при "идеальном" электрическом тракте одноканальная передача приводит к потере акустической перспективы. Необходима двух- или трехканальная (стереофоническая) система радиовещания.

## 2. СОКРАЩЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Динамический диапазон речи невелик, но для симфонического оркестра он значителен (75–80 дБ). Передача такого диапазона по каналу вещания трудно осуществима. Невозможно передать очень малые уровни, лежащие ниже уровня шума, имеющегося практически во всяком канале. Очень большие уровни трудно передать из-за перегрузки отдельных звеньев канала. В настоящее время практический динамический диапазон вещательного тракта равен 35 дБ. Поэтому, естественный динамический диапазон должен быть перед его передачей по каналу сжат до величины, которая может быть передана через канал вещания в неискаженном виде.

## 3. СМЕЩЕНИЕ УРОВНЕЙ

Часто прослушивание вещательных передач производится не с присущей им естественной громкостью. Громкость передачи определяется положением регулятора громкости, а не природой сигнала. При этом возникает разница между оригинальным звучанием и его воспроизведением. Так как кривые равной громкости сжимаются к краям диапазона, то есть сближаются в области низких и высоких частот, то прослушивание на более высоком уровне не приводит к подчеркиванию, выделению низких частот; если прослушивание передачи производится на более низком среднем уровне, то субъективно низкие частоты подавляются, а это существенно меняет тембр сигнала.

## 4. ПОМЕХИ

Имеются в виду помехи, возникающие в канале вещания:

- а) помехи концертного зала – шевеление, шепот, кашель;
- б) помехи тракта – электрические и тепловые шумы;
- в) атмосферные и промышленные помехи в радиовещательном канале.

## 5. ИСКАЖЕНИЯ

Под искажениями понимаются те отличия воспроизведенного звучания от оригинального, которые обусловлены техническим несовершенством аппаратуры, составляющей вещательный канал. Искажения обнаруживаются путем сравнения сигнала на выходе и входе канала.

Предлагаемая система [3] не должна требовать введения в действие новых радиовещательных станций и не должна увеличивать и без того существующую «тесноту в эфире». Необходимо, чтобы для приема стереофонических радиопередач радиослушателю не требовалось приобретать новые дорогостоящие приемные установки. Лучше всего, если бы слушатель мог воспользоваться имеющимся у него обычным (монофоническим) приемником с добавлением недорогой приставки. Кроме того, система должна обеспечивать достаточно хорошее разделение левого и правого каналов. Переходное затухание между каналами должно соответствовать величинам, приведенным в ГОСТах. Необходимо, чтобы радиослушатели, у которых нет аппаратуры для приема стереофонических радиопередач, могли слушать эти передачи как обычные монофонические. Для этого нужно, чтобы на обычный радиоприемник принимался сигнал, соответствующий сумме стереофонических каналов. Если это выполняется, то говорят, что система стереофонического радиовещания обладает свойством совместимости.

Для сигналов художественного вещания главной задачей обработки является обеспечение общего высокого качества, для сигналов информационного вещания – обеспечение, прежде всего высокой разборчивости речи. При этом должен быть по возможности сохранен естественный динамический диапазон звуковых сигналов.

Динамический диапазон симфонической музыки может достигать 80 дБ. Так как по каналам звукового вещания во многих случаях можно передавать сигналы с динамическим диапазоном не более 40 дБ, то звукорежиссеры специальным образом, с помощью регуляторов уровня, сжимают динамический диапазон до требуемого значения.

В домашних условиях вещательные передачи обычно прослушивают при максимальных акустических уровнях  $N_{a \max}$  80 дБ, где акустические шумы достигают  $N = 35...40$  дБ. Сле-

довательно, минимальный уровень полезных сигналов должен быть не ниже  $N_{a \min} = 40$  дБ. Таким образом, исходя из реальных условий прослушивания в домашних условиях, динамический диапазон вещательных сигналов не должен превышать

$$Z = N_{a \max} - N_{a \min} = 80 - 40 = 40 \text{ дБ. (1)}$$

Для радиовещательных каналов недопустим уровень сигнала, превышающий номинальное значение, так как при этом появляются большие нелинейные искажения. Кроме того, такие устройства обработки как частотные корректоры и автоматические регуляторы уровня устанавливаются в каналах связи и на входе передатчиков.

Быстрое развитие цифровых методов обработки сигнала и производство сигнальных процессоров для их реализации, привело к тому, что большинство преобразований сигнала вещания осуществляется в системах вещания автоматически, адаптивно в соответствии со свойствами сигнала и условиями приема.

Новый метод разработки регуляторов динамического диапазона (компрессоров, экспандеров, ограничителей, подавителей шума) для цифровых звуковых систем с использованием цифрового сигнального процессора возможен только с использованием сопряженного по Гильберту сигнала.

Развитие микропроцессорной техники сделало возможным реализацию достаточно сложных алгоритмов регулирования. Одним из перспективных направлений реализации регулирования громкости вещательного сигнала является регулирование по аналитической огибающей сигнала звукового влияния (СЗВ), полученной с использованием сопряженного по Гильберту сигнала.

Применение алгоритма регулирования с использованием метода расщепления сигнала ЗВ на аналитическую огибающую и мгновенную фазу позволяет устранить недостатки и повысить качество регулирования. С помощью преобразования Фурье из входной цифровой последовательности  $Z(U)_{\text{вх}}$  формируют ортогональный сигнал, из которого выделяют огибающую и мгновенную фазу сигнала.

Предлагаемый способ реализуется выполнением последовательности следующих операций:

1. Формирование с помощью Фурье-преобразования сигнала  $Z(U)_{\text{вх}}$ , ортогонального исходному  $Z(U)_{\text{вх}}$ , т.е. сопряженного с ним по Гильберту;

2. Формирование гильбертовской огибающей  $S(t) = Z(U)_{\text{вх}} + Z(U)_{\text{вх}}$  и мгновенной фазы

$$f(t) = \arctg \frac{Z(U)_{\text{вх}}}{Z(U)_{\text{вх}}}$$

из исходного и ортогонального сигналов;

3. Разделение огибающей на низкочастотную  $S_{\text{н}}(t)$  и высокочастотную  $S_{\text{н}}(t)$  составляющие;

4. Регулирование составляющей  $S_{\text{н}}(t)$  посредством компрессирующей, экспандирующей или линейной характеристики регулирующего звена, зависящей от полярности и величины сигнала управления;

5. Регулирование составляющей  $S_{\text{н}}(t)$  посредством изменения, пропорционального изменению низкочастотной составляющей;

6. Восстановление огибающей путем суммирования низко- и высокочастотной составляющих;

7. Получение выходной цифровой последовательности путем выполнения операции перемножения  $Z(U)_{\text{вых}} = S(t) * \cos(f(t))$ ;

8. Адаптивное формирование сигнала управления с учетом заданного уровня входного сигнала (задается цифровым пороговым уровнем  $\Pi(U)_1$ ) и заданной величины ОСМ выходного сигнала (задается цифровым пороговым уровнем  $\Pi(U)_2$ ).

Понятие огибающей и мгновенной частоты вводятся для пары сигналов: исходного  $Z(t)$  и сопряженного с ним по Гильберту  $\bar{Z}(t)$  причём:

$$\bar{Z}(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z(t_1)}{t - t_1} dt_1;$$

$$Z(t) = -\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{Z}(t_1)}{t - t_1} dt_1.$$

Преобразование Гильберта переводит сумму косинусоид в сумму синусоид с сохранением амплитуд и фазовых углов, и в электрических цепях выполняется фазовращателями.

Преобразование Гильберта позволяет любой звуковой сигнал представить произведением двух функций – огибающей и косинуса фазы:

$$Z(t) = A(t) \cdot \cos \phi(t),$$

где  $A(t) = \sqrt{Z^2(t) + \bar{Z}^2(t)}$ ,  $\phi(t) = \arctg \frac{\bar{Z}(t)}{Z(t)}$ .

Программная реализация алгоритма, обеспечивающая регулирование сигнала по огибающей, проводится на языке программирования

Delphi. В Delphi имеются плюсы и для прикладных программистов. Конечно, Delphi сама не выполнит двумерное преобразование Фурье и не решит уравнений Навье–Стокса, но она совместима с другими программами. Создание программ в Delphi базируется на объектно-ориентированной технологии. Структурной единицей визуального программирования является компонент. Компонент представляет собой разновидность объекта, который:

- может перенести в приложение из специальной палитры компонентов;
- имеет набор свойств, которые можно определять, не изменяя исходный код программы.

Практически любой компонент содержит методы-обработчики событий, каждый из которых отвечает за реакцию компонента на определённое событие. В Delphi введено понятие проекта. Проект – это вся совокупность файлов, из которых Delphi создаёт приложение. Один проект соответствует одному приложению. Разработанное программное обеспечение позволяет оценить вычислительную сложность алгоритма и сформировать требования к комплектации устройства и его конструктивному оформлению.

Реализация алгоритма регулирования при современном уровне развития вычислительной техники, сигнальных процессоров и периферии, не вызывает принципиальных затруднений. Авторегулятор огибающей СЗВ может быть выполнен в виде персонального компьютера снабженного дополнительными платами аналогового ввода-вывода и аналогового интерфейса, вставляемыми в стандартный корпус персонального компьютера, в этом случае упрощается управление устройством, синхронизация и электропитание. Устройство регулирования [2] можно разработать на базе микропроцессоров, промышленных ПК, а также на основе бытовых ПК. Также, устройство может быть выполнено и в промышленном корпусе, если планируется его установка в стойку с другим оборудованием или требуется защитить устройство от внешних воздействий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медиченко М. П. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие / М. П. Медиченко, В. П. Литвинов. – М.: Изд-во МГОУ, 2011.
2. Смирнов С. А. Преобразования оптических сигналов : учеб. пособие / С. А. Смирнов. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. – 113 с.

3. Григоров И. В. Использование нелинейных ортогональных преобразований для сжатия сигналов звукового диапазона / И. В. Григоров // Физика

волновых процессов и радиотехнические системы. – 2005. – Т. 8, – №3. – С. 58–62.

4. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. – М. : Мир, 2006. – 328 с.

**Десятирикова Елена Николаевна** – доктор экономических наук, профессор кафедры информационных систем Воронежского государственного университета.

**Desyatirikova Elena Nikolaevna** – doctor of economy Sciences, Professor of the dept. of the Information Systems, Voronezh State University

**Горбачева Наталья Борисовна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий в экономике Воронежского филиала Российского Государственного торгово-экономического университета. Тел.: 8-904-214-56-14. E-mail: djerry1@rambler.ru

**Gorbacheva Natalia Borisovna** – the candidate of the physicist - mathematical sciences, the associate professor of information technologies in economy of VF RGTEU. Tel.: 8-904-214-56-14. E-mail: djerry1@rambler.ru

**Подболотова Маргарита Борисовна** – старший преподаватель кафедры информационных технологий в экономике Воронежского филиала Российского Государственного торгово-экономического университета

**Podbolotova Margarita Borisovna** – the senior teacher of chair of information technologies in economy of VF of RGTEU