

УДК 534.843.742

С.М. Порошин, В.В. Усик, И.С.Беликов

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ КАЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В ПРОСТРАНСТВЕ

В статье предложена математическая модель автоматизированной системы управления перемещения кажущегося источника звука в пространстве. Рассматривается возможность расширения стереофонии согласно перемещению человека в зоне прослушивания.

Ключевые слова: акустическая система, математическая модель стереофония, кажущийся источник звука, фильтр нижних частот.

Введение

Постановка проблемы. Разработать математическую модель автоматизированной системы позиционирования КИЗ.

Целью данного исследования является разработка математической модели правого и левого канала обработки акустического сигнала в автоматизированной системе позиционирования КИЗ.

Анализ достижений по теме исследований. При разработке автоматизированной системы позиционирования кажущегося источника звука (КИЗ) авторами была предложена структурная схема системы, а также установлено, что изменение позиционирования КИЗ в пространстве зависит от внесения временных задержек в один из каналов стерео системы, а также компенсацией амплитудного усиления. Внесение задержки в несколько миллисекунд, например, в левый канал акустической системы (АС) приводит к ослаблению восприятия звука этого канала и смещает КИЗ в сторону правого громкоговорителя [1].

Смещение КИЗ возможно и при использовании интенсивной стереофонии, усиление амплитуды сигнала одного из каналов, приводит к смещению КИЗ в сторону звучащего громкоговорителя, позволяя человеку постоянно находиться в оптимальной

зоне прослушивания при перемещении в комнате, где он прослушивает мультимедийный контент.

Позиционирование КИЗ при озвучивании пространства рассчитывается исходя из свойств человеческого слуха. При расположении слушателя напротив центра стереобазы, воспроизводимые сигналы с правого громкоговорителя и левого громкоговорителя не имеют различий по времени ($\Delta\tau=0$) и по уровню ($\Delta L=0$). При таком условии звучание обоих громкоговорителей сливается в единый звуковой образ, который соответствует изначально задуманному звукорежиссером звучанию [3].

Данная схема коррекции КИЗ возможна и для перемещающегося слушателя в пространстве, либо для слушателя, который занял не идеальное местоположение между громкоговорителями стерео системы.

Основная часть

На рис. 1 представлена структурная схема одного из каналов автоматизированной системы управления кажущимся источником звука для фазоинверсной акустической системы.

Передачная функция $W_{\Sigma}(s)$ канала в общем виде имеет вид (1):

$$W_{\Sigma} = (W_{НЧ}(s) + W_{ВЧ}(s) \cdot W_{\Delta\tau}(s) \cdot W_{\Delta L}(s)) \cdot W_{АС}(s) \quad (1)$$

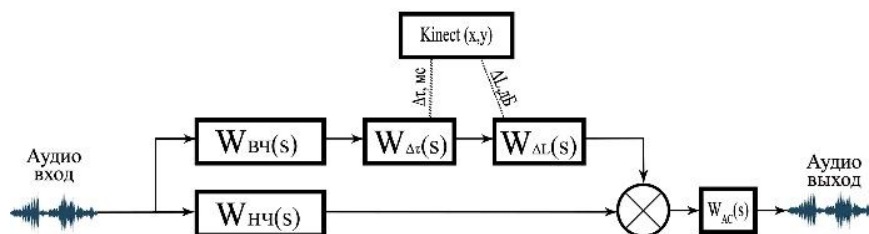


Рис. 1. Структурная схема канала автоматизированной системы управления КИЗ

На рис. 1 $W_{ВЧ}(s)$ – передаточная функция фильтра верхних частот; $W_{НЧ}(s)$ – передаточная функция фильтра нижних частот; $W_{\Delta\tau}(s)$ – передаточ-

ная функция блока временной задержки; $W_{\Delta L}(s)$ – передаточная функция блока управления усилением сигнала; Kinect (x,y) – блок приема данных о координатах.

натах перемещения головы слушателя в пространстве; $\Delta t, \text{мс}$ – величина необходимой временной задержки аудио канала; $\Delta L, \text{дБ}$ – величина усиления аудио сигнала, согласно перемещению КИЗ; $W_{AC}(s)$ – передаточная функция акустической системы.

Далее в статье схема маршрутизации обработки аудио сигнала (рис. 1) рассмотрена для левого канала стерео сигнала. Для второго канала фильтрация, величины задержек во времени Δt и усиления амплитуды ΔL выполняются аналогичным образом. Авторами ранее было уже установлено, что для управления перемещением КИЗ в пространстве, необходимо вносить временные и амплитудные корректировки в область верхних частот (300 – 20 000 Гц).

Предварительная фильтрация акустического сигнала выполняется фильтрами нижних и верхних частот Баттерворта второго порядка. Передаточная функция фильтра нижних частот имеет вид:

$$W_{НЧ}(s) = \frac{1}{B_1^2(s)}, \quad (2)$$

где $B_1(s) = (1+s)$ – полином Баттерворта.

Передаточная функция фильтра верхних частот имеет вид:

$$W_{ВЧ}(s) = \frac{s^2}{B_1^2(s)}. \quad (3)$$

Передаточная функция блока временной задержки имеет вид:

$$W_{\Delta t}(s) = e^{-\tau s}, \quad (4)$$

где τ – величина задержки левого канала АС относительно правого в мс. На рис. 2 указано схематическое расположение головы слушателя и отклонение его положения от центра базы АС.

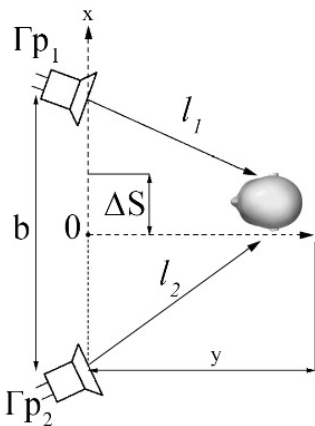


Рис. 2. Отклонение местоположения головы слушателя от центра стереобазы АС

Величина задержки сигнала определяется как

$$\tau = \frac{\Delta l_1}{c}, \quad (5)$$

где Δl_1 – отклонение головы слушателя от центрального положения стереобазы АС, c – скорость звука равная 330 м/с.

Передаточную функцию блока усиления (ослабления) сигнала представим в виде

$$W_{\Delta l}(s) = k, \quad (6)$$

где k – величина усиления (ослабления) акустического сигнала левого канала относительно правого в дБ.

Данный вариант интенсивностной стереофонии предлагается применять одновременно с временными задержками в тех случаях, когда величина Δt будет превышать значения 12 мс для возврата положения КИЗ в рекомендуемое пространство. Принцип работы состоит в усилении противоположного канала АС, в который не вносятся временные задержки Δt [2].

Для стереобаз, величина которых равна $b=0,8 \dots 1,8$ метров, величина усиления сигнала k при отклонении от центра базы АС на $S=0,5b$ равняется 5 дБ. Для стереобаз размером $b=1,8 \dots 2,8$ метров, при отклонении головы слушателя от центра базы на $0,5b$ величина $k=5 \dots 8$ дБ, соответственно [3]. Координаты перемещения головы слушателя, а также детектирование образа человека в пространстве выполняется при помощи камеры Microsoft Kinect [6, 7]. Авторами ранее было проведено экспериментальное подтверждение изменение позиционирования КИЗ в пространстве, а также предложена методика калибровки центрального местоположения КИЗ для громкоговорителей [8].

Нормированная передаточная функция акустической системы фазоинверсного типа имеет вид:

$$W_{AC}(s) = \frac{T_0^4 \cdot s^4}{T_0^4 \cdot s^4 + a_1 \cdot T_0^3 \cdot s^3 + a_2 \cdot T_0^2 \cdot s^2 + a_3 \cdot T_0 \cdot s + 1}, \quad (7)$$

где $T_0 = \sqrt{T_B \cdot T_S}$, $T_B = \frac{1}{f_b}$, f_b – частота настройки

фазоинвертора; $T_S = \frac{1}{f_s}$, f_s – резонансная частота головки громкоговорителя;

$$a_1 = \frac{Q_L + h \cdot Q_{ts}}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}};$$

$$a_2 = \frac{h + (\alpha + 1 + h^2) \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}};$$

$$a_3 = \frac{Q_L \cdot h + Q_{ts}}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}},$$

где a – значение нормированных параметров элементов фильтров;

$$h = \frac{f_B}{f_S} = \frac{\omega_B}{\omega_S} = \frac{\tau_S}{\tau_B} \quad \text{– нормированная частота}$$

настройки фазоинвертора;

Q_{ts} – полная добротность громкоговорителя;

$$\alpha = \frac{C_{AS}}{C_{AH}} = \frac{L_{CES}}{L_{CEB}} \quad \text{– отношение гибкостей под-$$

веса в воздухе и в корпусе;

$Q_L = \varpi_B \cdot C_{AB} \cdot R_{AL} = \frac{1}{\varpi_B \cdot C_{MEP} \cdot R_{EL}}$ – добротность, характеризующая щелевые потери, где R_{AL} – акустическое сопротивление излучателя; C_{AB} – акустическая гибкость воздуха в корпусе АС;

$\varpi_B = 2 \cdot \pi \cdot f_B = \frac{1}{\sqrt{C_{AB} \cdot M_{AP}}} = \frac{1}{\sqrt{C_{MEP} \cdot L_{CEB}}}$ – круговая частота настройки фазоинвертора; M_{AP} – акустическая масса пассивного излучателя или воздуха в трубе фазоинвертора.

Пусть

$$A_0 = T_0^4;$$

$$A_1 = a_1 \cdot T_0^3;$$

$$A_2 = a_2 \cdot T_0^2;$$

$$A_3 = a_3 \cdot T_0.$$

С учетом введенных обозначений передаточная функция акустической системы будет иметь следующий вид

$$W_{AC}(s) = \frac{A_0 \cdot s^4}{A_0 \cdot s^4 + A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s + 1}. \quad (8)$$

В результате, итоговое выражение (1) получит вид

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{A_0 \cdot s^4 - A_0 \cdot k \cdot s^6 \cdot e^{-\tau s}}{(s^2 + 2s + 1) \cdot (A_0 \cdot s^4 + A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s + 1)}. \quad (9)$$

Обозначив $k_1 = k \cdot A_0$, получится выражение

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{-s^4 \cdot (k_1 \cdot e^{-\tau s} + A_0)}{(s^2 + 2s + 1) \cdot (A_0 \cdot s^4 + A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s + 1)}. \quad (10)$$

Полученное выражение передаточной функции канала будет использоваться для получения суммарной передаточной функции всей системы с целью дальнейшего ее анализа.

Выводы

Авторами ведется анализ полученной математической модели автоматизированной системы, исследование устойчивости системы при изменении временной задержки, вносимой в каждый из каналов аппаратной составляющей и устройством Kinect, а также влияние на устойчивость системы коэффициента усиления, получаемого за счет интенсивностной стереофонии.

Список литературы

1. Порошин С.М. Разработка активной системы коррекции местоположения кажущегося источника звука в пространстве / С.М. Порошин, И.С. Беликов // Третья международная научно-техническая конференция «Информационные проблемы в теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем IPTS-2014» г. Харьков, 21-23 октября 2014 г.
2. Алдошина И.А. Высококачественные акустические системы и излучатели [Текст] / И.А. Алдошина, А.Г. Войвицко. – М.: Радио и связь, 1985. – 166 с.
3. Кононович Л.М. Стереофоническое восприятие звука [Текст] / Л.М. Кононович, Ю.А. Ковалгин. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с.
4. Алябьев С. И. Радиовещание и электроакустика [Текст] / С.И. Алябьев, А.В. Выходец, Р. Гермер и др. – М.: Радио и связь, 1998. – 783 с.
5. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике [Текст] / П. Шкритек; пер. с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с.
6. Jana A. Kinect for Windows SDK Programming Guide [Text] / A. Jana; Published by Packt Publishing Ltd. // Livery Place, 35 Livery Street, Birmingham B3 2PB, UK, 2012. – 392 p.
7. Miles R. Start Here! Learn Microsoft Kinect API [Text] / R. Miles; O'Reilly Media, Inc. // Gravenstein Highway North Sebastopol, California 95472, 2012. – 272 p.
8. Порошин С.М. Влияние интенсивностной стереофонии на локализацию кажущегося источника звука. / С.М. Порошин, И.С. Беликов // Технология приборостроения: научно-технический журнал ХНАДУ, спецвыпуск осень 2014.

Поступила в редколлегию 10.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ КОРЕКЦІЇ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ УЯВНОГО ДЖЕРЕЛА ЗВУКУ У ПРОСТОРІ

С.М. Порошин, В.В. Усик, І.С.Беліков

У статті запропонована математична модель автоматизованої системи керування уявним джерелом звуку у просторі. Розглядається можливість розширення стереофонії згідно до переміщення людини у зоні прослуховування.

Ключові слова: акустична система, стереофонія, уявне джерело звуку, фільтр нижніх частот, фільтр верхніх частот.

MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATED SYSTEM FOR CORRECTION OF APPARENT SOUND SOURCE POSITION IN SPACE

S.M. Poroshin, V.V. Usik, I.S. Bielikov

This article proposes a mathematical model of automated system for correction of an apparent sound source position in space. The possibility of enhancing the stereophony matched with the listener movement within the hearing area.

Keywords: acoustic system, stereophony, apparent sound source, high-pass filter, low-pass filter.