

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):

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

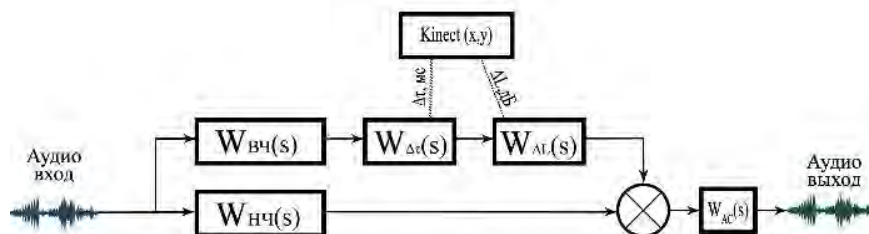


Рис. 1. Структурная схема канала автоматизированной системы управления КИЗ

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  $\Delta t$  и усиления амплитуды  $\Delta L$  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  $\tau$  – 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.

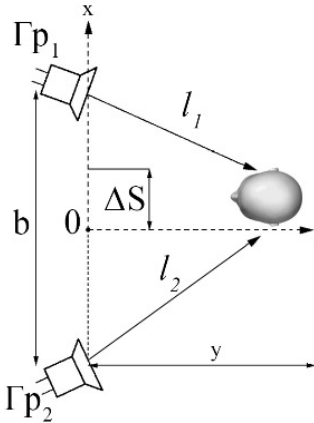


Рис. 2. Отклонение местоположения головы слушателя от центра стереобазы АС

Величина задержки сигнала определяется как

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

где  $\Delta l_1$  – отклонение головы слушателя от центрального положения стереобазы АС,  $c$  – скорость звука равная 330 мс/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  $\Delta t$  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  $\Delta t$  [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;

$$Q_L = \varpi_B \cdot C_{AB} \cdot R_{AL} = \frac{1}{\varpi_B \cdot C_{MEP} \cdot R_{EL}} - \text{доб-}$$

ротность, 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.