

Современные методы реализации технологии 3D-аудио и оценка ее возможностей для улучшения звукового интерфейса кабины летательного аппарата

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0699177

Корсун О. Н.¹, Лаврова Г. А.²

УДК 629.7:004.52

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

²ФГУП ГосНИИАС

marmottouno@gmail.com

gasidorina@2100.gosniias.ru

Введение

Высокая информационная загруженность экипажа является одной из основных проблем современной пилотируемой авиации, поэтому актуальны исследования по улучшению формы представления информации, особенно в критических ситуациях. Для этого используются практически все возможные каналы: световой, звуковой, тактильный. Однако возможности звукового канала используются не полностью: человек помимо оценки самого звукового сигнала, способен также определять направление на его источник. Таким образом, имеется объективная возможность улучшения интерфейса современной кабины пилота – применение технологии пространственного звука (3D-аудио). Данное направление активно развивается за рубежом, но является новым для отечественной практики.

3D-аудио – это технология, которая в наушниках или через динамики воссоздает пространственно направленный звук. С технологией 3D-аудио человек способен лучше понимать критичную информацию, потому что такая форма представления близка к естественному способу, которым владеет его слуховая система.

Аудио-подсказки целесообразны в случаях, когда летчик должен быстро сосредоточить внимание на определенном направлении и выполнить некоторое действие, например, включить тумблер, нажать кнопку. В таком случае аудио-подсказка должна указывать на этот орган управления. Кроме того, аудио-подсказки могут помочь предотвратить пространственную дезориентацию в полете в условиях плохой видимости. Сочетая 3D-звук с информацией от системы предупреждения столкновений в воздухе и предупреждающими сигналами о воздушном

движении можно сгенерировать пространственный сигнал, предупреждающий пилотов об опасном сближении самолетов и повышающий эффективность выполнения маневра уклонения. Если вместе со звуковой сигнализацией об опасности выдавать направление, из которого она исходит, это позволит пилоту быстрее и точнее произвести необходимый маневр и усилить ситуационную безопасность полета [5].

1 Реализация технологии 3D-аудио и эксперименты по ее оценке

Физиология пространственного слуха. Способность человека распознавать положение источника звука в пространстве может объясняться различными способами [2]. Когда речь идет о смещении влево или право, факторами, способствующими распознаванию смещения, являются внутрислуховое отношение интенсивностей и внутрислуховая временная разность. Очевидно, что звук будет громче, и достигнет раньше ухо, ближе к которому расположен источник. Механизм такого распознавания прост и эффективен, и легко имитируется в наушниках. В частности, в [3] описаны эксперименты с простыми видами сигналов (использовалось 2 вида гарнитур, в том числе стандартные авиационные наушники) – состоящими из одной и нескольких частот, обработанными по такой схеме. Однако если учитывать только эти два фактора, невозможно отличить, спереди находится звук или сзади, выше или ниже. Для медианной плоскости (вертикальная плоскость, которая «делит» голову на 2 симметричные части) внутрислуховое отношение интенсивностей и внутрислуховая временная разность равны нулю для идеальной модели головы. В то же время человек способен определять местоположение источников звуков и в этой плоскости.

В настоящее время основная гипотеза, объясняющая способность человека распознавать положение источника звука в пространстве, состоит в утверждении, что он оценивает искажение спектра звукового сигнала при взаимодействии с головой и ушной раковиной, которое зависит от расположения источника звука. Данное предположение подтверждается экспериментами, показавшими, что при заклеивании некоторых частей или всей ушной раковины, способность локализовать источник звука в частности в медианной плоскости ухудшается или пропадает, в то время как с открытой ушной раковиной человек способен на локализацию [1].

Алгоритм реализации технологии 3D-аудио. Для точного описания изменений спектра сигнала были введены такие понятия как Head Related Impulse Response (Антропозависимая Импульсная Характеристика) – HRIR и Head Related Transfer Function (Антропозависимая Передаточная Функция) – HRTF. HRTF является интегральным преобразованием Фурье функции HRIR. HRTF отражает, каким образом меняется спектр звукового сигнала при достижении

внешнего слухового прохода. Строго говоря, HRTF различна для левого и правого уха и зависит от точки пространства, в которой расположен источник звука.

Для измерения HRIR во внешние слуховые проходы вставляются специальные микрофонные датчики. Нередко данные измерения проводят не на человеке, а на манекене, так называемом KEMAR (Knowles Electronics Mannequin for Acoustic Research [6]), который имеет форму человеческого туловища, головы и ушных раковин. Динамики воспроизводят заранее подготовленный сигнал, который измеряется микрофонными датчиками, находящимися в ушном канале. Для дальнейшей обработки сигналов измеряется так же неискаженный манекеном или человеком сигнал (при отсутствии соответствующего объекта). Измерения проводятся для различных углов азимута и возвышения (элевации), таким образом создается библиотека HRIR и, соответственно, HRTF. Наглядное графическое определение азимута и возвышения и принятого правила знаков представлено на рисунке 1.

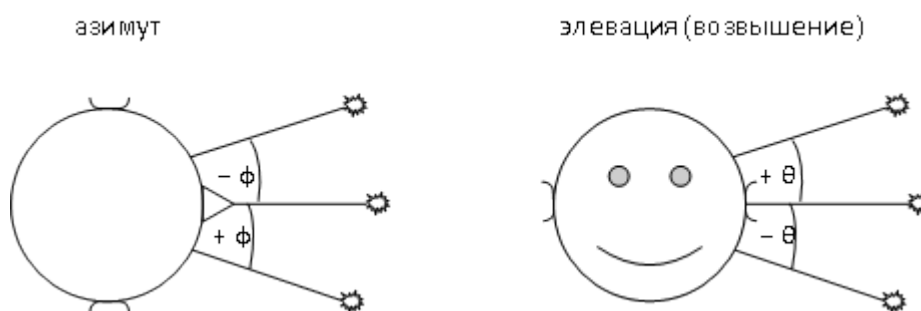


Рис. 1. Определение углов азимута и возвышения.

Если источник звука находится далее одного метра, считается, что источники звука находятся в дальнем поле, в таком случае значение HRTF уменьшается обратно пропорционально расстоянию. Большинство измерений HRTF производится именно в дальнем поле.

На данный момент самой полной общедоступной библиотекой HRIR является CIPIC HRTF Database лаборатории CIPIC Interface Laboratory at UC Davis [7]. Данной лабораторией были проведены измерения HRIR 45 человек на 25 различных азимутах и 50 возвышениях.

Для получения эффекта 3D-аудио необходимо в реальном масштабе времени смоделировать преобразование моно-сигнала линейными цифровыми фильтрами с антропозависимыми импульсными характеристиками (HRIR) для левого и правого уха, соответствующими выбранному направлению. Результаты следует объединить в стерео-файл и подать на воспроизведение в наушники.

Антропозависимая импульсная характеристика HRIR для конкретного направления, человека и уха (соответственно правого и левого) в CIPIC HRTF Database представляет собой последовательность из 200 значений ($hrir_{left}$ и $hrir_{right}$). Как правило, звуковой сигнал представляет собой значительно более длительную последовательность ($sound$). Для обработки звукового сигнала необходимо произвести операцию свертки этих последовательностей для левого и правого уха ($sound * hrir_{left}$ и $sound * hrir_{right}$):

$$sound_{left}(n) = \sum_{m=0}^n sound(m) \cdot hrir_{left}(n - m),$$

$$sound_{right}(n) = \sum_{m=0}^n sound(m) \cdot hrir_{right}(n - m),$$

$$n = 0 \dots N + M - 2,$$

где N и M – длины звукового сигнала и импульсной характеристики. Для вычисления свертки можно использовать функции *conv* или *filter* в программном математическом пакете Matlab [9, 10].

В случаях, когда одна из последовательностей значительно длиннее другой удобнее использовать секционированные свертки, получаемые методом перекрытия с суммированием, либо методом перекрытия с накоплением [8]. Для улучшения характеристик, связанным с быстродействием программного обеспечения, реализующего алгоритм, целесообразно выполнять свертку с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого блоки звукового сигнала должны обрабатываться по схеме $БПФ^{-1}(БПФ(sound_block) \cdot БПФ(hrir))$, где первый оператор означает обратное преобразование Фурье. Данный алгоритм, с использованием методом перекрытия с суммированием реализован функцией *fftfilt* в программном математическом пакете Matlab [11].

Очевидно, что принцип, основанный на восприятии человеком изменений спектра звукового сигнала не применим к моночастотным и ограниченным по частотному составу сигналам, поскольку, как известно, для правильного определения местоположения в медианной плоскости звук должен быть широкополосным и содержать частоты от 7 кГц и выше [1]. Этому критерию соответствуют не все звуки, используемые в аварийной сигнализации современных летательных аппаратов, таким образом возникает задача выбора сигнала для реализации системы пространственных аудио-подсказок.

Эксперименты по оценке характеристик реализованной технологии. На первых этапах изучения вопроса для экспериментов использовался основной звуковой сигнал аварийной сигнализации современного пассажирского самолета «Непрерывный удар колокола» (спектрограмма данного сигнала представлена на рисунке 2). Данный сигнал содержит частоты

выше 7 кГц, однако при попытке проводить эксперименты по распознаванию положения виртуального источника звука, испытуемые не ощущали перемещения звукового образа по высоте [4]. Таким образом, упомянутые условия являются необходимыми, но не достаточными.

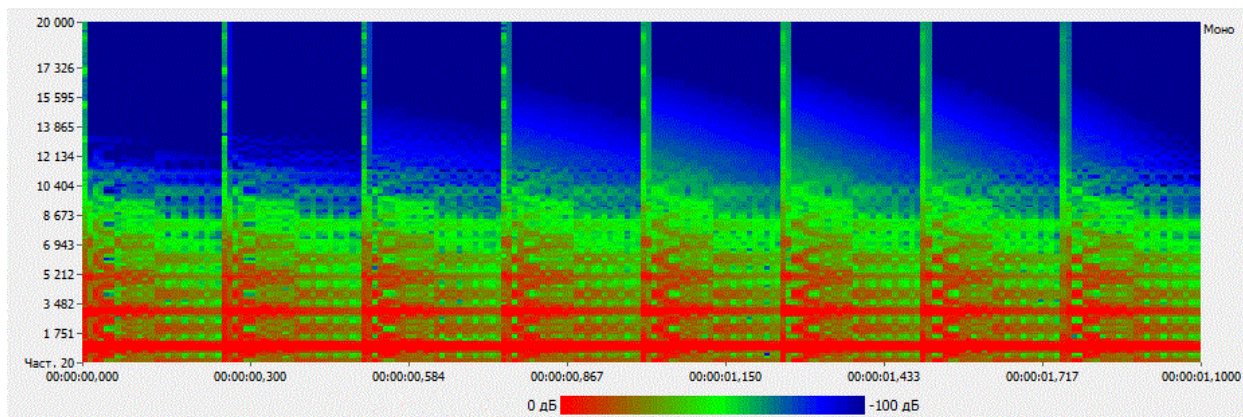


Рис. 2. Спектрограмма сигнала «Непрерывный удар колокола».

Упомянутая ранее схема обработки звукового сигнала была реализована в Matlab 2013a, пользовательский интерфейс (рисунок 3) был создан с использованием библиотек .net в среде программирования Microsoft Visual Studio 2012, при этом использовались антропозависимые импульсные характеристики из базы данных [7]. Интерфейс позволяет выбрать номер антропозависимой передаточной функции (HRTF) из базы данных, вид звукового сигнала (Sound), виртуальное положение источника звука из предусмотренных экспериментом положений. После можно запустить воспроизведение обработанного звукового сигнала (кнопкой «Пуск»), узнать у испытуемого, в каком из возможных предложенных положений находится виртуальный источник звука, зафиксировать результат кнопкой «Фиксация результата», после чего он будет помещен в таблицу справа, вместе с отметкой, правильно ли было угадано положение.

Для обработки были выбраны следующие звуковые сигналы:

-фрагмент классического произведения "Половецкие пляски" из оперы А.П. Бородина "Князь Игорь",

-звуки горна,

-модулированный широкополосный шум.

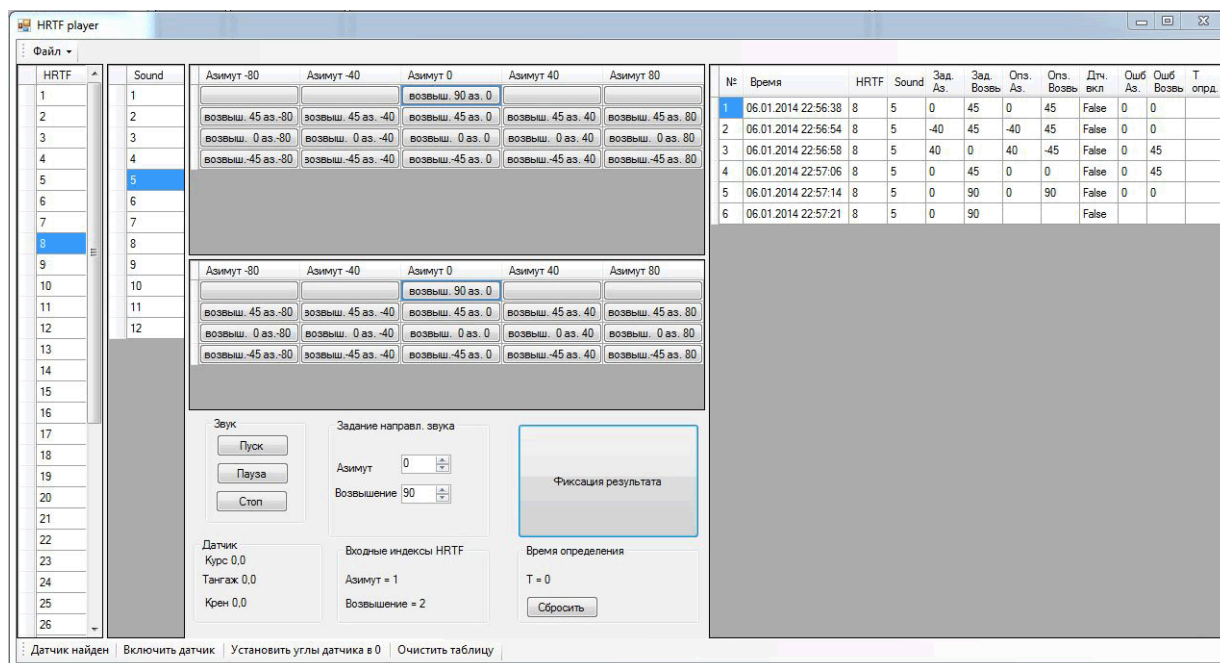


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы, создающей эффект 3D-аудио.

Кроме того, в предыдущих исследованиях было замечено, что движение звука локализуется лучше, чем статичный звук. Поэтому, помимо статичного модулированного шума в эксперимент был включен вариант "блуждающего" шума по вертикальному направлению вверх и вниз приблизительно на 5 градусов вокруг одного положения.

Анализ спектра данных звуковых сигналов показал, что все они содержат частоты выше 7 кГц. Спектрограммы сигналов можно увидеть на рисунках 4, 5, 6.

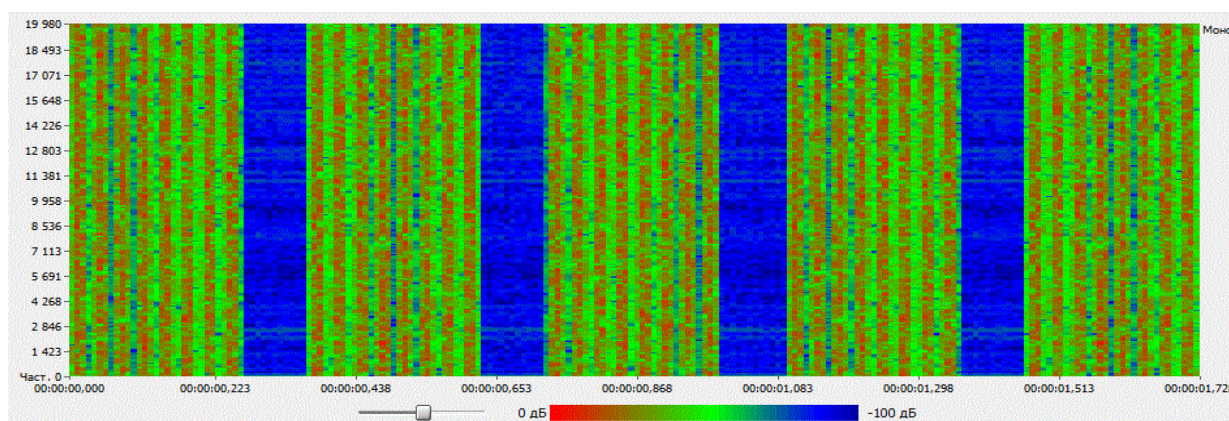


Рис. 4. Спектрограмма модулированного широкополосного шума.

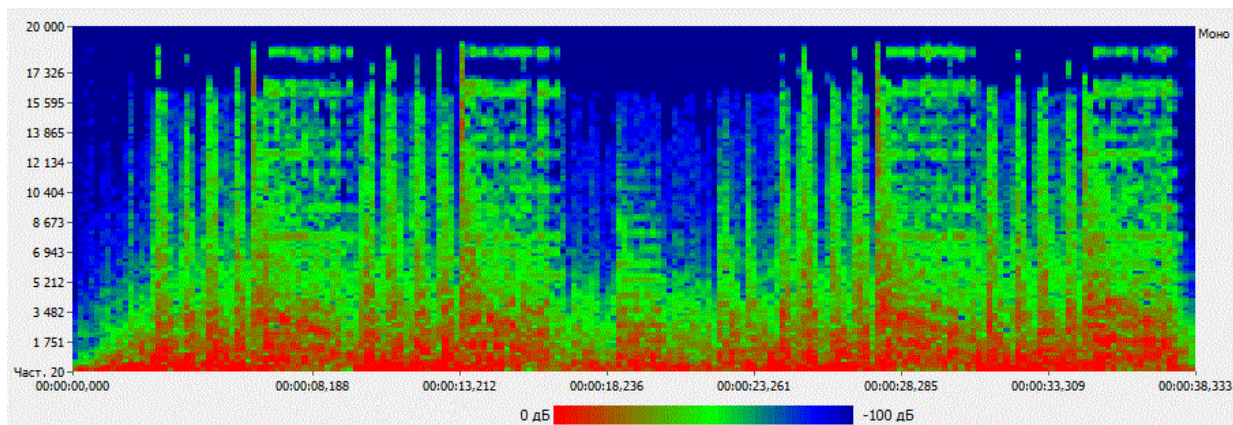


Рис. 5. Спектрограмма фрагмента музыкального произведения "Половецкие пляски".

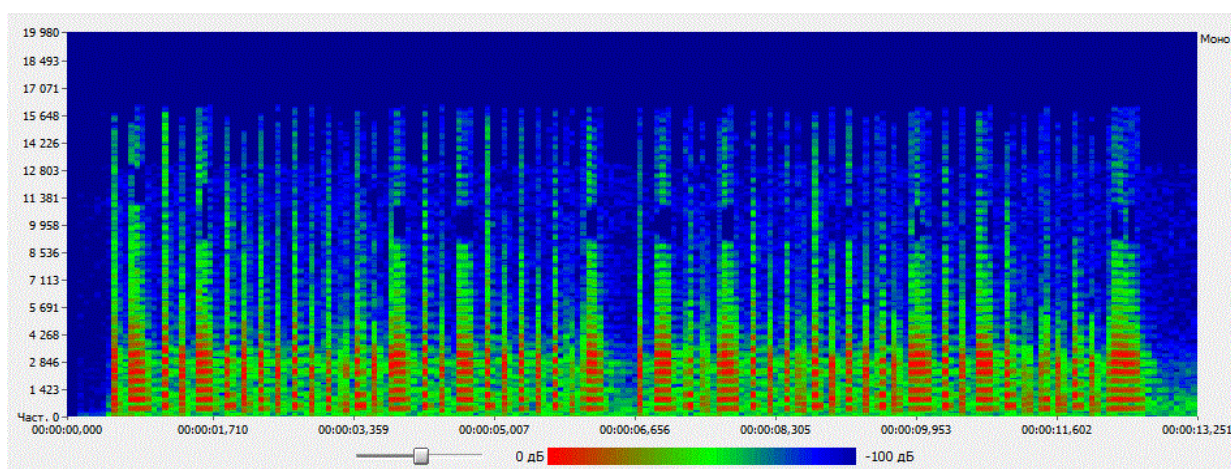


Рис. 6. Спектрограмма звука горна.

Для оценки звуковых сигналов с точки зрения точности локализации направления на источник звука, имитируемый при помощи технологии 3D-аудио, были проведены следующие эксперименты.

Для получения эффекта пространственного звука использовалось упомянутое выше программное обеспечение и звуковые сигналы. Испытуемым предлагалось угадать, в каком из возможных положений (по азимуту $\pm 80^\circ$, $\pm 40^\circ$, 0° , по возвышению (для каждого из азимутов) $\pm 45^\circ$, 0° , и 90° - над головой) находится виртуальный источник звука. Пример оформления результатов эксперимента по одному испытуемому и одному виду звукового сигнала представлен в таблице 1. Обобщенные результаты по всем видам исследуемых сигналов для 6 испытуемых приведены в таблице 2.

Следует отметить, что по горизонтали результаты существенно лучше, чем в вертикальном направлении. Вероятнее всего, пространственные аудиоподсказки стоит воспринимать как дополнительный, а не основной источник информации.

Таблица 1

Пример результатов эксперимента. Желтым цветом помечены ошибки в 45 градусов, красным цветом помечены ошибки в 90 и более градусов

Испытуемый: Айдар Габдрахманов															Звуковой сигнал:															
широкополосный модулированный шум																														
положение	ниже															выше														
	80	0	80	40	80	0	0	40	80	0	80	40	80	0	0	40	0	80	40	80	0	40	0	80	40	80	0	40	80	
положение	ниже															выше														
	45	90	0	0	0	0	45	0	45	45	45	45	45	45	0	0	45	90	45	0	45	45	45	0	45	45	0	45	45	
положение	ниже															выше														
	80	40	80	80	80	0	0	80	40	80	0	40	80	40	80	0	0	40	0	80	40	40	80	80	80	0	80	80	40	
положение	ниже															выше														
	0	45	0	45	45	90	45	0	45	45	45	0	45	0	0	45	90	45	0	0	45	45	0	45	90	45	0	0	0	

Таблица 2

Оценка вероятности правильных распознаваний в определении направления на виртуальный источник звука в передней полусфере

Направления и величины ошибок	Звуковые сигналы			
	Модулированный широкополосный шум (статичный)	Модулированный широкополосный шум (с «блужданием»)	Отрывок из «Половецких плясок»	Звук горна
Горизонт: Оценка вероятности правильных распознаваний при определении	1,0 (в эксперименте ошибок распознавания не выявлено)	1,0 (в эксперименте ошибок распознавания не выявлено)	1,0 (в эксперименте ошибок распознавания не выявлено)	1,0 (в эксперименте ошибок распознавания не выявлено)

направления с градацией по точности 90°				
Горизонт: Оценка вероятности правильных распознаваний при определении направления с градацией по точности 40°	0,78	0,77	0,78	0,75
Вертикаль: Оценка вероятности правильных распознаваний при определении направления с градацией по точности 90°	0,885	0,91	0,88	0,87
Вертикаль: Оценка вероятности правильных распознаваний при определении направления с градацией по точности 45°	0,5	0,49	0,48	0,36

Статистический анализ результатов экспериментов. Для корректных выводов результаты по различным звуковым сигналам были оценены по методу проверки гипотезы [12] «о равенстве процента брака в двух генеральных совокупностях». В нашем случае гипотеза касалась одинакового процента ошибок при оценивании испытуемыми положения виртуального источника звука.

Критерий для оценки гипотезы равенства процента ошибок $p_1 = p_2 = p$:

$$Z = \frac{\frac{x_1}{n_1} - \frac{x_2}{n_2}}{\sqrt{p(1-p)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

где критерий Z имеет нормальное нормированное распределение.

Так как величина p заранее неизвестна, оценочное значение было вычислено по формуле:

$$\hat{p} = \frac{x_1 + x_2}{n_1 + n_2}$$

x_1, x_2 - количество ошибок в экспериментах, n_1, n_2 - количество вариантов в экспериментах.

Были рассчитаны критерии Z , задан уровень значимости $\alpha = 0.05$, для уровня значимости определен интервал принятия гипотезы $[-1,96 ; 1,96]$. Значения критериев, полученные при попарном сравнении количества ошибок для сигналов различных видов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения критерия Z для оценки гипотезы равенства процента ошибок в экспериментах с различными звуковыми сигналами

Звуковые сигналы	Значения критерия Z		
	Ошибки по азимуту с градацией по точности 40°	Ошибки по возвышению	
		с градацией по точности 45°	с градацией по точности 90°
Шум статичный / Шум с «блужданием»	-0.1209	0.8446	0.6126

«Половецкие пляски» Шум статичный	0.0928	-0.12133	-0.3503
Шум статичный Звук горна	-0.3209	-0.4754	-2.5893
«Половецкие пляски» Шум с «блужданием»	0.2080	-0.9313	0.2338
Звук горна Шум с «блужданием»	-0.2054	-1.2856	-2.0107
«Половецкие пляски» Звук горна	0.3958	-0.3380	-2.1506

Таким образом, для всех рассмотренных пар сигналов гипотеза о равенстве доли ошибок принимается, за исключением звука горна при распознавании в вертикальном направлении. Наиболее вероятной причиной является относительно узкий спектральный состав сигнала звук горна. Также стоит отметить, что перемещение звукового образа для сигнала «модулированный широкополосный шум», вопреки исходным предположениям, не привело к улучшению результатов.

Согласно выполненным экспериментам, человек лучше распознает положение источников звука для естественных звуков, с достаточно широким шумовым спектром. Некоторые музыкальные произведения обладают этим свойством. В то же время для четких чистых звуков, которые традиционно применяются в сигнализации, точность локализации направления снижается.

Заключение

Таким образом, в результате проведенной работы:

1. Разработаны методики и проведены экспериментальные исследования алгоритмов формирования объемного звука для сигналов различного вида. При этом установлено, что внедрение технологии 3D-аудио для улучшения интерфейса кабины летательного аппарата не требует значительных затрат и может использоваться со стандартными авиационными гарнитурами.

2. Согласно результатам проведенных экспериментов, для всех видов сигналов с высокой вероятностью (в среднем 0.94) распознаются направления с «грубой» градацией 90° (в горизонтالي «слева-прямо-справа», по вертикали «верх-прямо-низ»). При этом спектральный состав сигнала существенного значения не имеет.

3. Результаты более точного распознавания с градацией 40...45° зависят от вида сигнала и различны для горизонтального и вертикального каналов.

В горизонтальном канале вероятность правильного распознавания для широкополосных сигналов (модулированный шум, классическая музыка) составляет 0,77...0,78, для звука горна 0,75.

В вертикальном канале для сигналов с узким спектром направление на источник не распознается, вероятность правильного распознавания для широкополосных сигналов (модулированный шум, классическая музыка) составляет 0,48...0,50, для звука горна 0,36.

4. В ходе проведенных исследований получены объективные количественные характеристики новой акустической технологии 3D-аудио, которые целесообразно использовать при проектировании интерфейса кабины перспективных летательных аппаратов.

Список литературы

1. Альтман Я.А. Слуховая система. Л.: Наука, 1990. 620 с.
2. Корсун О.Н., Лаврова Г.А., Себряков Г.Г. Синтез 3D-аудио сигналов для звукового интерфейса перспективной кабины летательного аппарата // Всерос. науч.-тех. конф. «Моделирование авиационных систем»: сб. докл. Т. 3. М.: ФГУП ГосНИИАС, 2011. С. 452-458.
3. Корсун О.Н., Лаврова Г.А. Использование гармонических и полигармонических сигналов при создании эффекта 3D-аудио // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 8. С. 8-13.
4. Корсун О.Н., Лаврова Г.А. Синтез пространственных аудио-подсказок для звукового интерфейса перспективной кабины летательного аппарата // Седьмой международный

аэрокосмический конгресс IAC'2012 (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012): сб. науч. тр. М., 2013. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); рег. № 0321303652/03.06.2013. С. 407-410.

5. Joffrion J.F., Raquet J.F., Brungart D.S. Sonic Boon: Head Tracking for 3D Audio Using a GPS-Aided MEMS IMU // Inside GNSS. 2006. No. January / February. P. 32-41. Available at: <http://www.insidegnss.com/node/874> , accessed 01.01.2014.
6. Zhang M., Zhang W., Kennedy R.A., Abhayapala T.D. HRTF measurement on KEMAR manikin // In: Proceedings of ACOUSTICS 2009, Adelaide, Australia, 23-25 November 2009.
7. Algazi V.R., Duda R.O., Thompson D.M., Avendano C. The CIPIC HRTF database // Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New York, 2001. P. 99-102. DOI: [10.1109/ASPAA.2001.969552](https://doi.org/10.1109/ASPAA.2001.969552)
8. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 840 с.
9. conv: Convolution and polynomial multiplication of fi objects. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/fixedpoint/ref/conv.html> (дата обращения 20.12.2013)
10. filter: Filter data with filter object. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/dsp/ref/filter.html> (дата обращения 20.12.2013).
11. fftfilt: FFT-based FIR filtering using overlap-add method. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/fftfilt.html> (дата обращения 20.12.2013).
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей М.: Наука, 1989. 576 с.

Contemporary methods for realization and estimation of efficiency of 3D-audio technology application for sound interface improvement of an aircraft cabin

02, February 2014

DOI: **10.7463/0214.0699177**O.N. Korsun¹, G.A. Lavrova²¹Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation²FGUP (Federal State Unitary Enterprise) GosNIIAS (State Research Institute of Aviation Systems)marmottouno@gmail.comgasidorina@2100.gosniias.ru

High information load of crew is one of the main problems of modern piloted aircraft therefore researches on approving data representation form, especially in critical situations are a challenge. The article considers one of opportunities to improve the interface of a modern pilot's cabin i.e. to use a spatial sound (3D - audio technology). The 3D - audio is a technology, which recreates a spatially directed sound in earphones or via loudspeakers. Spatial audio-helps, which together with information on danger will specify also the direction from which it proceeds, can reduce time of response to an event and, therefore, increase situational safety of flight. It is supposed that helps will be provided through pilot's headset therefore technology realization via earphones is discussed.

Now the main hypothesis explaining the human ability to recognize the position of a sound source in space, asserts that the human estimates distortion of a sound signal spectrum at interaction with the head and an auricle depending on an arrangement of the sound source. For exact describing the signal spectrum variations there are such concepts as Head Related Impulse Response (HRIR) and Head Related Transfer Function (HRTF). HRIR is measured in humans or dummies. At present the most full-scale public HRIR library is CIPIC HRTF Database of CIPIC Interface Laboratory at UC Davis.

To have 3D audio effect, it is necessary to simulate a mono-signal conversion through the linear digital filters with anthropodependent pulse characteristics (HRIR) for the left and right ear, which correspond to the chosen direction. Results should be united in a stereo file and applied for reproduction to the earphones.

This scheme was realized in Matlab, and the received software was used for experiments to estimate the quantitative characteristics of technology. For processing and subsequent experiments the following sound signals were chosen: a fragment of the classical music piece "Polovetsky Dancings" from A.P. Borodin's opera "Prince Igor", the horn sounds, the modulated broadband noise (with the fixed position, and "wandering" in the range $\pm 5^\circ$ in the vertical direction with respect to the fixed position). In the course of experiments the examinee was offered to define in what of possible positions (on an azimuth $\pm 80^\circ$, $\pm 40^\circ$, 0° , on an eminence $\pm 45^\circ$, 0° , and 90° - over the head) there is a virtual source of sound.

According to results of experiments, directions with "rough" gradation 90° (in a horizontal "at the left-direct-on the right", in a vertical "up-direct-down") are distinguished with the high probability (on the average 0.94) for all types of signals. Thus the spectral content of signal is of no importance. Results of more accurate recognition with gradation of $40 \dots 45^\circ$ depend on the type of signal and are different for horizontal and vertical channels. In the horizontal channel the probability of the correct recognition for broadband signals (the modulated noise, classical music) is 0.77 ... 0.78, for a sound of horn it is 0.75. In the vertical channel for broadband signals (the modulated noise, classical music) the probability of the correct recognition is 0.48 ... 0.50, for a sound of horn it is 0.36. The results allow us to assume that the person recognizes better the position of sound signal sources with rather wide spectrum close to the natural ones (broadband noise, symphonic orchestra).

Thus, as a result of the carried-out work the sound processing algorithms have been realized and the software to allow reproducing spatial audio-helps via earphones has been created. In the course of research the methods of a digital filtration as well the statistical methods to analyse the results of experiments have been used. The main result defining a scientific novelty of work is the objective quantitative characteristics of the 3D - audio technology, which are expedient for considering in designing the interfaces for pilots' cabins of modern aircrafts.

Publications with keywords: [spatial audio-cues](#), [3D-audio technology](#), [head related transfer function](#)
Publications with words: [spatial audio-cues](#), [3D-audio technology](#), [head related transfer function](#)

References

1. Al'tman Ya.A. *Slukhovaya sistema* [The auditory system]. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 620 p. (in Russian)
2. Korsun O.N., Lavrova G.A., Sebyakov G.G. [Synthesis of 3D-audio signals to sound interface of perspective aircraft cabin]. *Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Modelirovanie aviatsionnykh sistem": sb. dokl. T. 3* [Proc. of the All-Russian Scientific and Technical conf. "Modeling of Aircraft Systems". Vol. 3]. Moscow, Publ. of FGUP GosNIIAS, 2011, pp. 452-458. (in Russian)

3. Korsun O.N., Lavrova G.A. [Use of harmonic and polyharmonic signals in case of 3d-audio effect creation]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy - Herald of Computer and Information Technology*, 2012, no. 8, pp. 8-13. (in Russian)
4. Korsun O.N., Lavrova G.A. [Synthesis of spatial audio prompts for sound interface of perspective aircraft cabin]. *Sed'moy mezhdunarodnyy aerokosmicheskiy kongress IAC'2012: sb. nauch. tr.* [Proc. of the Seventh International Aerospace Congress IAC'2012], Moscow, Lomonosov MSU, 2012. Moscow, 2013. CD-disk, pp. 407-410. (in Russian)
5. Joffrion J.F., Raquet J.F., Brungart D.S. Sonic Boon: Head Tracking for 3D Audio Using a GPS-Aided MEMS IMU. *Inside GNSS*, 2006, no. January / February, pp. 32-41. Available at: <http://www.insidegnss.com/node/874> , accessed 01.01.2014.
6. Zhang M., Zhang W., Kennedy R.A., Abhayapala T.D. HRTF measurement on KEMAR manikin. In: *Proceedings of ACOUSTICS '09*, Adelaide, Australia, 23-25 November 2009.
7. Algazi V.R., Duda R.O., Thompson D.M., Avendano C. The CIPIC HRTF database. In: *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New York, 2001, pp. 99-102. DOI: [10.1109/ASPAA.2001.969552](https://doi.org/10.1109/ASPAA.2001.969552)
8. Rabiner L.R., Gold B. *Theory and application of digital signal processing*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. (Russ. ed.: Rabiner L., Gold B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov*. Moscow, Mir, 1978. 848 p.).
9. *conv: Convolution and polynomial multiplication of fi objects*. Available at: <http://www.mathworks.com/help/fixedpoint/ref/conv.html> , accessed 20.12.2013.
10. *filter: Filter data with filter object*. Available at: <http://www.mathworks.com/help/dsp/ref/filter.html> , accessed 20.12.2013.
11. *fftfilt: FFT-based FIR filtering using overlap-add method*. Available at: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/fftfilt.html> , accessed 20.12.2013.
12. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 576 p. (in Russian)