**BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF INFORMATICS AND RADIOELECTRONICS**

**The English Language**

**Translation**

Master student Kozyakov A. I.

Group 815042

Minsk 2019

**Analog-to-Digital Conversion to Accommodate the Dynamics of Live Music in Hearing Instruments**

**Abstract**

Hearing instrument design focuses on the amplification of speech to reduce the negative effects of hearing loss. Many amateur and professional musicians, along with music enthusiasts, also require their hearing instruments to perform well when listening to the frequent, high amplitude peaks of live music. One limitation, in most current digital hearing instruments with 16-bit analog-to-digital (A/D) converters, is that the compressor before the A/D conversion is limited to 95 dB (SPL) or less at the input. This is more than adequate for the dynamic range of speech; however, this does not accommodate the amplitude peaks present in live music. The hearing instrument input compression system can be adjusted to accommodate for the amplitudes present in music that would otherwise be compressed before the A/D converter in the hearing instrument. The methodology behind this technological approach will be presented along with measurements to demonstrate its effectiveness.

## Introduction

## Hearing instruments are outlined and have been appeared to diminish the adverse impacts of hearing misfortune depict hearing instrument use just like a generally noninvasive, okay choice for hearing impeded individuals with numerous potential advantages. They go ahead to portray hearing instruments as the main effectively open treatment for hearing misfortune, which enhances the wellbeing related personal satisfaction in grown-ups by lessening the mental, social, and enthusiastic impacts of sensorineural hearing misfortune. To address these personal satisfaction issues, hearing instruments are intended to increase discourse flags well, and this is an essential key driver behind their advancement. There is a wide region of research intended to characterize the attributes of discourse and to along these lines create intensification plots as far as perceptibility and solace. There are, notwithstanding, hearing instrument clients and potential clients who require their listening ability instruments to intensify unrecorded music well, particularly as to the dynamic attributes of unrecorded music. These people might be proficient or novice performers or even energetic show goers. Music, for a few people, can be thought to be a need to improve their personal satisfaction and at any rate their sentiments of prosperity. The accompanying article will inspect some key contemplations in adjusting discourse based enhancement plans to address the issues of hearing instrument clients who tune in to music. This will incorporate a discourse of the dynamic attributes of discourse and music, alongside a talk of a few constraints of flag preparing that emerge amid the transformation of music from the simple to the computerized spaces.

## The Dynamic Characteristics of Speech and Music

Why do hearing instruments typically fail when it comes to reproducing the dynamics of live music? Speech has a well-defined relationship between loudness (the psychological impression of the intensity of a sound) and intensity (the physical quantity relating to the magnitude or amount of sound). For music, this relationship is highly variable and greatly depends on the musical instrument being played ([Chasin, 2006a](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr8-1084713812471906); [Fabiani & Friberg, 2011](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr22-1084713812471906)). Speech has many acoustic differences to music regardless of genre, as has been described previously in the literature ([Chasin, 2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr7-1084713812471906); [Chasin & Russo, 2004](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr11-1084713812471906)). The dynamic characteristics of music create a challenge to the current generation of digital hearing instruments. Many multimemory digital hearing instruments that are available today have music programs. But little is different from other standard speech-specific programs and so the musician cannot experience a natural perception of the dynamics of live music ([Chasin, 2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr7-1084713812471906); [Zakis & Fulton, 2009](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr68-1084713812471906)).

While clinicians have frequently relied on software fine-tuning to improve the sound quality of music reproduction in digital hearing instruments, the result falls short of what is required because there are many limiting factors that are inherent to the device itself ([Chasin, 2010](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr10-1084713812471906)). Such factors might include the quality of miniature transducers, the bandwidth or frequency response of the device, and the dynamic range available in the device. In the past, the transducers used in hearing instruments were frequently blamed for poor fidelity for music. However, this has been shown repeatedly not to be the case ([Killion, 1988](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr35-1084713812471906)) and the technology has continued to improve. Extended bandwidth in hearing instruments has also assisted in addressing the mismatch between the frequency response of a hearing instrument (now reported up to 10000Hz) and the frequencies represented in live music (up to 20000Hz). Where sensorineural hearing loss is present, the benefit of extended high frequencies in the hearing instrument will depend on the residual hearing of the user and, in many cases, this will be significantly limited ([Ricketts, Dittberner, & Johnson, 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr55-1084713812471906)). Dynamic range, on the other hand, is the factor inherent to hearing instruments with potential for improvement. Although hearing instrument transducers can easily handle the demands of the dynamic range in music, typically these capabilities are not utilized.

One key difference between speech and music is the difference in intensity. Soft speech is generally considered as having a long-term RMS level of 50 dB SPL, conversational speech of 65 dB SPL, and loud speech of 80 dB SPL.[1](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#fn1-1084713812471906) These input classifications are used to show the amplification response typically seen when measured with a commercially available probe-microphone real ear measurement system, or when simulated by a hearing instrument manufacturer’s software. While there are many different individual variations in the levels of speech, even shouted male speech does not usually exceed 89 dB SPL ([Olsen, 1998](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr49-1084713812471906)). Music, on the other hand, is quite different and can easily reach 105 dB (A) and can have peaks of 120 dB (A) or even higher ([Killion, 2009](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr38-1084713812471906); [Pawlaczyk-Luszczynska, Dudarewicz, Zamoijska, & Sliwinska-Kowalska, 2010](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr50-1084713812471906)). For example, [Killion (2009)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr38-1084713812471906) measured the peaks of a symphony orchestra in a concert hall at 114 to 116 dB (C), while [Flugrath (1969)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr23-1084713812471906) measured amplified rock music with levels of 114 dB (A). It must be noted that these peaks, especially for orchestral music, are very short in duration and are typically higher than the exposure levels that instrumentalists are subjected to on a long-term basis ([Behar, Wong, & Kunov, 2006](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr4-1084713812471906); [MacDonald, Behar, Wong, & Kunov, 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr43-1084713812471906); [Phillips & Mace, 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr51-1084713812471906); [Poissant, Freyman, MacDonald, & Nunes, 2012](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr52-1084713812471906); [Royster, Royster, & Killion, 1991](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr56-1084713812471906)). Amplified rock music, however, can typically have a long-term average level that is higher than that for orchestral music ([Clark, 1991](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr13-1084713812471906)).

Typically, a digital hearing instrument compresses the peaks of the signal once they reach 95 dB SPL before the A/D conversion. This is based on the 16-bit analog-to-digital A/D conversion architecture that is employed by most of the hearing instruments currently in use ([Agnew, 2002](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr2-1084713812471906); [Edwards, 2007](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr21-1084713812471906); [Hamacher et al., 2005](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr30-1084713812471906)). A compression threshold of 95 dB before the A/D converter is more than adequate even for loud speech, even when the level is measured close to the speaker’s lips. [French and Steinberg (1947)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr25-1084713812471906) found levels of 90 dB SPL, 5.1 cm (2 in.) from the speaker’s lips. Average overall levels are lower as was previously mentioned but this can vary depending on the measurement technique ([Byrne, 1977](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr5-1084713812471906); [Cornelisse, Gagné, & Seewald, 1991](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr14-1084713812471906); [Dunn & White, 1940](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr20-1084713812471906); [French & Steinberg, 1947](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr25-1084713812471906); [Ladefoged & McKinney, 1963](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr40-1084713812471906); [Olsen; 1998](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr49-1084713812471906)) For the peaks of live music, this compression threshold of 95dB at the input is too low and the music can sound compressed, unnatural, and even slightly distorted. Compression is used widely in the recording industry to make music sound “louder” and also to make it easier for data reduction for storage on portable devices but is not generally preferred by normal hearing listeners when they are given the choice ([Croghan, Arehart, & Kates, 2012](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr16-1084713812471906)). So could the use of low compression thresholds before the A/D converter in hearing instruments be thought of being analogous to the experience of normal hearing individuals when listening to low bit rate encoded music files? This question could be investigated in future studies.

There is nothing that can be done via the hearing instrument software to correct or reduce the effects of this low input compression threshold on the signal. The resulting perceptual distortions are especially a drawback for musicians in ensembles, who may be trying to hear their fellow musicians to play correctly. We will discuss a digital signal processing methodology that can adapt the speech-specific compression limiting at the input to the A/D converter to a music-specific configuration, along with measurements to demonstrate its effectiveness.

## A/D Conversion to Accommodate the Dynamics of Live Music

### **The Fundamentals of A/D Conversion**

A/D conversion is part of the front end of the digital hearing instrument. It is comprised of an input source, primarily the hearing instrument microphone, and the A/D converter ([Csermak & Armstrong, 1999](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr17-1084713812471906)). A detailed discussion of the process of A/D conversion is beyond the scope of this article; however, a short discussion about it helps to explain the potential solution to this issue. The key element of A/D conversion involved with dynamic range is quantization, which classifies the amplitude information of a signal ([Agnew, 2002](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr2-1084713812471906)). To briefly explain quantization, it is necessary to look at some basic definitions. A bit (binary digit) is represented as either a 1 or a 0 and is the smallest possible piece of digital information ([Agnew, 2000](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr1-1084713812471906)). The digital word length refers to the number of bits that are used to represent a signal. Therefore, a 16-bit digital word could look like this—1010111001100111. Without focusing on a specific implementation, the quantization step size is generally defined as 2digital word length ([Agnew, 2002](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr2-1084713812471906)). [Figure 1](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig1-1084713812471906/) shows the dependency of quantization and resolution. The gray curve is part of a sine signal normalized to +/– 0.9 and the black line represent the discrete quantization steps.

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig1.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig1-1084713812471906/)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig1-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 1.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig1-1084713812471906/) Quantization steps for a portion of a simple waveform

An eight-bit quantization creates 28 or 256 discrete levels to represent the amplitude of a signal as schematically shown on the left side, whereas a 16-bit quantization, shown on the right, will create 216discrete levels or 65536 levels. The more quantization levels, the more accurate the resolution is for defining the amplitude. Each bit in a digital system represents approximately 6 dB of dynamic range ([Ryan & Tewari, 2009](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr58-1084713812471906)). Following this rule, [Table 1](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/table/table1-1084713812471906/) shows the relationship between digital word length and dynamic range.

Most current hearing instruments use 16-bit A/D conversion. However, depending on the hearing instrument design, even if a digital system uses 16-bit A/D conversion, the dynamic range may in fact be limited to only 12 bits, for example, due to other requirements, such as the directional microphone and feedback cancellation processing systems ([Agnew, 2000](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr1-1084713812471906)). The result is that to accommodate the peaks of live music, this can only be truly represented by a digital hearing instrument system using A/D conversion of at least 20-bit word lengths resulting in a potential dynamic range of 120 dB.

In addition to the representation of the dynamic range of a signal when converting a signal from analog to digital, it is also important to be aware of quantization error ([Lyons, 2004](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr42-1084713812471906)). A large number of discrete steps might not offer infinite precision in the representation of the amplitude because of the quantization error. Due to the fact that the quantization process will always be rounded up or rounded down to the nearest level that is available ([Agnew, 2000](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr1-1084713812471906)), the result is that there may be a difference between the actual signal and the quantized signal. This error can produce audible noise, which may be masked by the microphone noise in the hearing instrument. An increase in the number of available quantization levels can be made by increasing the digital word length and this will decrease the quantization error ([Agnew, 2002](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr2-1084713812471906)). This enables the digital representation of the analog signal to be more accurate; however, it requires an increase in the power supply to the hearing instrument. To preserve battery life, compromises must be made in the design of the digital hearing instrument. The question remains as to what can be done to improve current digital hearing instrument systems that use 16-bit A/D converters.

### **Overcoming the Current Limitations of Dynamic Range**

Hearing instrument integrated circuits need to be efficient with regard to battery drain and so adjusting the digital word length to accommodate speech while minimizing battery drain is very important. This is one of the main reasons why 20- or even 24-bit A/D conversion is not widely seen in hearing instruments that are currently available today ([Kates, 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr33-1084713812471906)). This may, however, change in the future as technology changes. Until then, is there anything that can be done within the hearing instrument, before input compression, to be able to handle the loud peaks of music with 16-bit digital architecture? The answer lies in using a 16-bit A/D converter but shifting the maximum input level where the hearing instrument works more linearly, so that the AGCinput (automatic gain control) does not start to compress until the level from the microphone exceeds approximately 110 dB SPL ([Chasin, 2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr7-1084713812471906)). This basic idea of modifying the AGCinput was implemented, in a commercially available hearing instrument, by Bernafon AG in 2010. The result is that most, if not all, of the peaks of loud live music are not compressed before the A/D converter without significantly increasing the battery drain, which has been verified by power consumption investigations. In [Figure 2](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig2-1084713812471906/), it is possible to see schematically the difference between the shifted (black wave up to 110 dB SPL) and the reference processing (gray wave up to 96 dB SPL) at the front end. Assuming that the gray wave has a sound pressure level of 96 dB SPL, the gray arrow in the AGCinputcontroller block indicates the cutoff. Input signals with a higher level will not be converted into the digital domain and processed any further. The black wave represents a signal with the characteristics of live music as described above. The black arrow is now changing the AGCinput by shifting the dynamic range toward a higher level by using a delta, “Δ.” However, the range between the min and max value of the amplitude stays the same [–1:1-1/2^(word length-1)] and is not extended like the best case solution with a 20-bit system. After the A/D conversion, this “Δ” will be compensated for elsewhere within the signal processing path of the hearing instrument.

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig2.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig2-1084713812471906/)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig2-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 2.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig2-1084713812471906/) A basic block diagram illustrating the signal path of the A/D conversation

Another way to look at this idea is illustrated in [Figure 3](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig3-1084713812471906/), where the behavior of the AGC is shown in an in/output diagram. In the reference situation (black line) the threshold of the AGCinput cuts in at 95 dB SPL, whereas the gray line shows the level-shifted condition that has its threshold at 110 dB SPL because of the implemented attenuation of −15 dB in the AGCinput. This will subsequently be referred to as the “level-shift.”

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig3.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig3-1084713812471906/)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig3-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 3.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig3-1084713812471906/) Effect of the AGC input/output behavior for a reference (black line) compared to the level-shifted condition (gray line)

It is very important to emphasize that the level-shift is occurring in the front end, before the amplification within the hearing instrument. The maximum power output (MPO) is therefore not changed. The peaks of music are not increasing the output levels. Short-duration intense sounds in excess of 115 dB SPL create a risk of permanent threshold shift (PTS), as [Hunter, Ries, Schlauch, Levine, and Ward (1999)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr32-1084713812471906) discussed in their study on acoustic reflex testing. The MPO is always set based on the real or calculated uncomfortable loudness levels (UCL) within the hearing instrument to avoid any potential issues of PTS or even temporary threshold shift (TTS) for the hearing instrument user. The usual care should be taken when setting the MPO regardless of input.

## Acoustical Measurements With a Modified Input AGC

A series of measurements was conducted to verify the effectiveness of the level-shift within the digital front end of a hearing instrument.

### **Method, Equipment, and Setup**

All measurements were performed with the same setup. A custom programmed LabVIEW 2010 SP1 (National Instruments Corporation, Austin, Texas) based recording tool was used, which gives the opportunity to do real-time input/output measurements. The chassis from a National Instruments (NI) MPXI-1024 with an embedded controller NI PXI-8108 and the analog signal acquisition and generation card NI PXI-4461 were integrated into the setup as shown in [Figure 4](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig4-1084713812471906/). The signals were recorded via a Bruel & Kjaer 2cc Coupler 4946 connected to a G.R.A.S. AG 40 microphone with the G.R.A.S. Type 26 A preamplifier and 12 AA power supply. The signals were presented in the free-field via a multichannel power amplifier, RAM Audio T2408, connected to a stand-mounted Bose MA 12 Line Array loud speaker (LS).

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig4.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig4-1084713812471906/)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig4-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 4.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig4-1084713812471906/) Measurement setup

The hearing instrument was placed on a stand 40 cm away from and pointing toward the middle of the loud speaker. A sound-absorbing curtain covered any reflective surfaces in a 30m2 quiet room. Two different acoustic stimuli were used. The first consisted of sine signals of 1 kHz and 3 kHz, while the second consisted of a mixture of small recorded excerpts of music, 15 to 30 s in duration, representing different styles and genres of music with broad dynamic changes (e.g., choir and orchestra: Elgar The Dream of Gerontius). All signals were normalized to +/– 1 with Adobe Audition 3.0 (Adobe Systems Incorporated, San Jose, California). Recordings were used to control as many variables as possible within the test room and also to ensure the reliability and repeatability of the measurements. An integrated calibration routine ensured that the desired sound level was applied at the calibration point. The hearing instrument used was a commercially available BTE unit, chosen randomly from stock.

Two conditions were compared, first, a reference program with all adaptive features deactivated; and second, the level-shifted program with the modified AGCinput. For comparison reasons, the gain was set to the same linear values via the fitting software with minimal amplification to isolate the front end of the hearing instrument as much as possible ([Chasin, 2006b](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr9-1084713812471906)), as can be seen in [Figure 5](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig5-1084713812471906/). The amplification was chosen to be rather small to avoid any interaction with the MPO of the hearing instrument. The expansion system was set to the maximum to overcome the possible side effects of the internal and external noise floors. No other special settings were used.

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig5.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig5-1084713812471906/)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig5-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 5](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig5-1084713812471906/). Linear insertion gain simulation of the hearing instrument

### **Results**

An easy way to see the difference between the preamplification of the reference and level-shifted conditions is by looking at an input/output function. In [Figure 6](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig6-1084713812471906/), we can see an input/output function for a 1000Hz sine signal with the gain setting shown in [Figure 5](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig5-1084713812471906/). The gray line represents the reference program designed for speech with a 95 dB SPL cutoff. After the 95 dB SPL input, the curve begins to level off, indicating that the instrument is compressing this signal. The black line represents the same instrument but with the AGCinput cutoff moved to 110 dB SPL. In this case, the hearing instrument is not compressing the signals within the front end until they reach beyond 110 dB SPL.

[[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig6.jpg](NULL)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/core/lw/2.0/html/tileshop_pmc/tileshop_pmc_inline.html?title=Click%20on%20image%20to%20zoom&p=PMC3&id=4040855_10.1177_1084713812471906-fig6.jpg" \t "tileshopwindow)

[Figure 6.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig6-1084713812471906/) Input/output function with the level-shifting processing on and off for a 1 kHz sine signal

Even when the gain is increased by 4 dB in the hearing instrument, the effect is still clearly seen as shown in [Figure 7](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig7-1084713812471906/). To emphasize the functionality, an additional measurement with a 3 kHz sine signal was performed ([Figure 8](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig8-1084713812471906/)).

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig7.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/core/lw/2.0/html/tileshop_pmc/tileshop_pmc_inline.html?title=Click%20on%20image%20to%20zoom&p=PMC3&id=4040855_10.1177_1084713812471906-fig7.jpg" \t "tileshopwindow)

[Figure 7.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig7-1084713812471906/) Input/output function with the level-shifting processing on and off for a 1 kHz sine signal—gain increased by 4 dB compared to [Figure 6](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig6-1084713812471906/)

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig8.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/core/lw/2.0/html/tileshop_pmc/tileshop_pmc_inline.html?title=Click%20on%20image%20to%20zoom&p=PMC3&id=4040855_10.1177_1084713812471906-fig8.jpg" \t "tileshopwindow)

[Figure 8.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig8-1084713812471906/) Input/output function with the level-shifting processing on and off for a 3 kHz sine signal

The saturation knee point for the 3 kHz input is shifted toward lower input levels due to characteristics of the microphone resonances. Pure sine wave signals are not so common in music (except electronic music), so it is important to look at the effects that have been seen so far with recordings of music. In the following figures, we see recorded music displayed as waveforms with normalized amplitude on the y-axis and time on the x-axis. The black waveform is always the original signal while the gray represents the signal through the hearing instrument. In [Figures 9](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig9-1084713812471906/) and [​and10,10](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig10-1084713812471906/), two gray .wav files for a 110 dB SPL peak input are shown that are recordings from a selection of music from the first movement (Vivace) of Beethoven’s Symphony No. 7.

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig9.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig9-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 9.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig9-1084713812471906/) Recording with level-shifted processing; input level 110 dB SPL

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig10.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig10-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 10](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig10-1084713812471906/). Recording with reference processing; input level 110 dB SPL

[Figures 9](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig9-1084713812471906/) and [​and1010](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig10-1084713812471906/) clearly show the effect of the preserved dynamic range with the level-shifted processing in comparison with the reference signal where compression is applied to the signal at the input. This demonstrates that the natural dynamic characteristics will be converted into the digital domain with the level-shift. It is also of interest to see how the level-shifted processing affects smaller input levels. The following [Figures, 11](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig11-1084713812471906/) and [​and1212](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig12-1084713812471906/) show the recordings with the same input signal but with a level of 90 dB SPL.

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig11.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig11-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 11.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig11-1084713812471906/) Recording with level-shifted processing; input level 90 dB SPL

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig12.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig12-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 12.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig12-1084713812471906/) Recording with reference processing; input level 90 dB SPL

When the input is reduced, the effect heavily decreases and the reference processing can preserve the same dynamic behavior as the level-shifted processing. The effect has been shown so far by just one piece of orchestral music. To emphasize the effect, the following [Figures 13](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig13-1084713812471906/) and [​and1414](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig14-1084713812471906/) show a recording with a 110 dB SPL peak input of a small brass ensemble playing a traditional American Jazz piece, St. James Infirmary. Again, the preservation of the dynamic range is clearly shown in [Figure 13](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig13-1084713812471906/) compared to the reference processing in [Figure 14](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig14-1084713812471906/).

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig13.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig13-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 13.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig13-1084713812471906/) Recording with level-shifted processing; input level 110 dB SPL

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig14.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig14-1084713812471906/" \t "figure)

[Figure 14.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig14-1084713812471906/) Recording with reference processing; input level 110 dB SPL

These measurements were all made with recordings from CD sources (16-bit 44.1 kHz Stereophile and EMI) to ensure the reliability and repeatability of the measurements. It is possible, however, to predict that for live performances with a greater dynamic range the effects of the level-shift would be even greater.

## Side Effects From the Level-shift

Are there any negative effects to the level-shift? When making this level-shift, there is one side effect that is generated. By attenuating the AGCinput, all input levels are shifted and special care has to be taken into account for soft inputs. For hearing instrument users who have normal low-frequency hearing, the internal noise of the hearing instrument may be more audible in quiet environments than for a comparable program that is designed for speech without the level-shift. On the other hand, the level of the music (even pianissimo) is likely to be much more intense than the circuit noise, so any perceivable noise will probably be masked (M. Chasin, personal communication, October 19, 2012). To overcome this potential issue, in the level-shifted program, the threshold for the frequency-weighted expansion system was adjusted to compensate for this side effect. Expansion is the opposite of compression; more specifically, less gain is applied to soft sounds ([Venema, 2006](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr67-1084713812471906)). Expansion can reduce the internal noise within the hearing aid and additionally will also reduce low-level steady state environmental noise such as that produced by ventilation systems and so forth.

## Additional Considerations for Hearing Instrument Music Programs

It is possible to apply the input level-shift to different programs within a multimemory hearing instrument. The settings needed to make this change are, therefore, not global. So it is not necessary to have all end user settings with the level-shift engaged. The result is that a dedicated program can be used within the hearing instrument purely for music. In addition to the level-shift in the front end for higher input levels, is there anything else that can be done to make live music more enjoyable? With regard to a program for live music the following additional factors were considered: bandwidth and amplification, the use of automatic systems, and throughput delay.

### **Bandwidth and Amplification**

It is well known that for normal hearing listeners a wide frequency response contributes to the perceived naturalness of music ([Moore & Tan, 2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr47-1084713812471906)). Efforts were made to ensure that the frequency response of the hearing instruments using the level-shifts were as wide as possible—up to 10 kHz depending on the style and acoustic coupling method. It must be remembered, however, that hearing impaired listeners may not all prefer an extended high frequency response ([Franks, 1982](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr24-1084713812471906); [Punch, 1978](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr53-1084713812471906)). This may be due to the individual’s hearing loss, where individuals with milder hearing losses prefer more high frequency bandwidth ([Ricketts et al., 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr55-1084713812471906)). With regard to low-frequency amplification, [Franks (1982)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr24-1084713812471906) concluded that hearing impaired listeners prefer an extended low-frequency response when listening to music. However, due to the use of open fittings, much of the low-frequency amplification of the hearing instrument is reduced while more of the natural low-frequency information passes naturally through the acoustic coupling to the ear. For a further discussion on hearing instrument bandwidth issues and music please see [Moore (2012)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr45-1084713812471906).

In addition to a wider bandwidth, the amount of compression prescribed by the fitting algorithm for the hearing instrument user was reduced in the music program with the level-shift applied. Using offset tables, a more linear response was provided by the fitting software. This is consistent with the studies that suggest different amplification strategies could be applied to music in contrast to speech ([Chasin & Russo, 2004](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr11-1084713812471906); [Davies-Venn, Souza, & Fabry, 2007](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr18-1084713812471906); [van Buuren, Festen, & Houtgast, 1996](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr65-1084713812471906), [1999](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr66-1084713812471906)). The clinician can of course apply the gain and adjust the compression parameters that are desirable for a particular hearing instrument user with the fitting software, so issues such as comfort or other specific requests can be easily accommodated.

### **Automatic Features**

When listening to music, it is important that all automatic features such as noise reduction and adaptive directionality are turned off. This is important to prevent these systems from interpreting the music as noise that may affect the sound quality ([Chasin & Russo, 2004](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr11-1084713812471906); [Russo, 2006](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr57-1084713812471906)). When sitting in a concert hall, it is often the case that the people in the seats around the listener make extraneous noise. Perhaps they are explaining what is happening on stage to their neighbor. Or, perhaps they are opening a sweet wrapper, which can be very disruptive, no matter how slowly they do it ([Kramer, 2000](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr39-1084713812471906)). Applause can also be very loud and disruptive while wearing hearing instruments in a concert. It is desirable therefore to select a fixed directional microphone setting, if needed, in a live music program, to place the focus on stage and not so much on the activities of the audience members around the listener.

### **Throughput Delay**

A number of studies have investigated the effect of throughput delay on sound quality. This delay refers to the sum of delays inherent in the signal path of the hearing instrument and typically falls below 10 ms ([Dillon, Keidser, O’Brien, & Silberstein, 2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr19-1084713812471906)). Although studies testing delays in the range of 1 to >10 ms in simulation have demonstrated negative effects on sound quality as judged by normal and impaired hearing listeners ([Stone & Moore, 1999](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr60-1084713812471906), [2002](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr61-1084713812471906), [2003](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr62-1084713812471906), [2005](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr63-1084713812471906); [Stone, Moore, Meisenbacker, & Derleth, 2008](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr64-1084713812471906)), these negative effects were not evident when testing in real hearing instruments worn by hearing impaired listeners ([Groth & Sondergard, 2004](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr29-1084713812471906)). One study by [Zakis, Fulton, and Steele (2012)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr69-1084713812471906) examined the effect of throughput delay on the sound quality of music in real hearing instruments. In this study, an attempt was made to create a worst case scenario by using open-canal hearing instruments with the gain set such that the likelihood of comb filtering was maximized. Comb filter effects were anticipated when the amplified signal and direct signal paths are combined in the ear canal of the listener. Twelve trained musicians listened to two selected music passages under three delay conditions (1.4, 2, and 3.4 ms) and a no-delay condition. Although differences in sound quality could be described by the musicians for each delay condition, and in some cases strong preferences were recorded for individuals, no significant difference was found between preferences assigned to each delay condition compared to the no-delay condition.

## Experience With a Hearing Instrument Utilizing the Input Level-Shift

Dedicated programs for live music, which take account of the additional factors discussed above, are used in current hearing instruments. It is important to determine if subjective improvements can be found when the level-shift in the front end for higher input levels is implemented and used by individuals, who had reported previous poor experience with digital hearing instruments. [Hockley et al. (2010)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr31-1084713812471906) conducted a study which looked at the ratings of sound quality attributes by 9 professional musicians (8 males and 1 female). Four of these musicians were woodwind players (clarinet, saxophone, and flute); 3 played jazz, while the other was a classical musician. Three of the musicians were classical violinists who also played the viola. The final two musicians were both rock (electric) guitarists. These individuals were all current users of analog K-AMP™ custom canal hearing instruments ([Killion, 1990](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr36-1084713812471906), [1993](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr37-1084713812471906)). These individuals had not been able to wear digital hearing instruments due to their reports of unnatural sound quality, which ultimately disrupted the playing and enjoyment of music. The nine musicians were fitted with Micro BTE hearing instruments. Eight wore nonoccluding ear molds, while one used fully occluding earmolds.

The attribute scales used with the participants were based on the work of [Gabrielsson, Rosenberg, and Sjögren (1974)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr27-1084713812471906), [Gabrielsson and Sjögren (1979)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr28-1084713812471906), [Gabrielsson, Lindström, and Ove (1991)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr26-1084713812471906), and [Cox and Alexander (1983)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr15-1084713812471906). The scales consisted of qualitative descriptions of sound quality. Each participant gave a numerical rating toward the attribute that best suited what he or she experienced. Fullness is an example of an attribute that was used, where the perceptual dimension is from “full” to “thin.” Another example of an attribute that was measured is for naturalness, where the perceptual dimension is from “true to the source” to “artificial.” The participants were asked to compare, with the same hearing instruments, a program that applied the level-shift with a standard program that did not.

Overall, for the judgment of fullness, a program with the level-shift was judged to be significantly fuller than for the standard program without the level-shift. Overall fidelity for the level-shifted program was judged to be significantly better than for the standard program. There was no significant difference between the judgments of naturalness between the two programs due to a large variance in the response data; however, a trend was observed. In this small investigation it was concluded that the level-shift contributed to a better rating of sound quality for these musicians.

## Summary and Conclusions

Musicians and music enthusiasts have high expectations with regard to their hearing instrument performance for music. These expectations are rarely met. While continuing improvements in miniaturized transducers and bandwidth have helped, an opportunity exists to further improve performance for music by adapting the dynamic range of hearing instruments. This article described the implementation of a solution to accommodate the loud peaks of live music that would otherwise be compressed or even distorted before the A/D converter used in the 16-bit architecture applied in many hearing instruments today. The use of this level-shift preserves the dynamics of live music for musicians and music enthusiasts without affecting the battery life. As digital hearing instrument technology evolves toward 20-bit and even 24-bit architecture to accurately convey at least a 120 dB dynamic range, with less current consumption, then the use a level-shift will be obsolete. The use of a level-shift is the most practical solution for music for the hearing instrument architecture that is most commonly available today. The improvement was evident in the subjective assessment by a group of musicians who had previously rejected digital processing hearing instruments in favor of an analog instrument. As tested by [Hockley et al. (2010)](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/#bibr31-1084713812471906), the judgments of sound quality revealed that when wearing digital hearing instruments, these musicians preferred a program with the level-shift engaged for live music.

**Аналого-цифровое преобразование для учета динамики живой музыки в слуховых аппаратах**

**Реферат**

Конструкция слухового аппарата направлена на усиление громкости речи для уменьшения негативных последствий потери слуха. Многие профессиональные музыканты и любители, наряду с музыкальными энтузиастами, также требуют, чтобы их слуховые аппараты хорошо работали при прослушивании частых пиков высокой амплитуды живой музыки. Одно из ограничений в большинстве современных цифровых слуховых аппаратов с 16-разрядными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) заключается в том, что компрессор в аналого-цифровом преобразовании ограничивается 95 дБ (уровень звукового давления, далее - УЗД) или менее на входе. Это более чем достаточно для динамического диапазона речи; однако это не соответствует амплитудным пикам, присутствующим в живой музыке. Система сжатия входного сигнала слухового аппарата может быть настроена так, чтобы соответствовать амплитудам, присутствующим в музыке, которые в противном случае были бы сжаты аналого-цифровым преобразователем в слуховом аппарате. Методология данного технологического подхода будет представлена вместе с измерениями для демонстрации своей эффективности.

**Введение**

Слуховые аппараты описаны в общих чертах и, как представляется, уменьшают негативные последствия нарушения слуха; слуховой аппарат описывают так же, как обычно неинвазивный, приемлемый выбор для слушания людей с затрудненными возможностями, обладающий многочисленными потенциальными преимуществами. Слуховой аппарат также характеризуется как основное эффективное открытое лечение негативных последствий нарушения слуха, который повышает благосостояние, связанное с личной удовлетворенностью человека, уменьшая психические и социальные последствия сенсоневральной тягоухости. Чтобы справиться с этими проблемами личного удовлетворения, слуховые аппараты предназначены для того, чтобы значительно увеличить громкость речевых сигналов, и это является важным ключевым фактором для их продвижения. Существует широкий спектр исследований, предназначенных для характеристики атрибутов речи, и в этих направлениях создают усиленные «участки» в отношении восприимчивости и смягчения. Несмотря на это, пользователи слуховых аппаратов и потенциальные пользователи, требуют инструменты для прослушивания, которые усиляют незаписанную музыку, особенно в отношении динамических атрибутов незаписанной музыки. Эти люди могут быть опытными или начинающими исполнителями или даже энергичными зрителями. Музыка для некоторых людей может считаться необходимостью улучшить свое личное удовлетворение и, во всяком случае, их чувства благополучия. В сопроводительной статье будут рассмотрены некоторые ключевые соображения в отношении корректировки речи для решения проблем пользователей слуховых аппаратов, которые настроены на музыку. Это будет включать динамические атрибуты речи и музыки, наряду с разговором о нескольких ограничениях подготовки сигналов, которые возникают на фоне трансформации музыки от простого к автоматизированным пространств.

**Динамические характеристики речи и музыки**

Почему слуховые аппараты, как правило, терпят неудачу, когда дело доходит до воспроизведения динамики живой музыки? Речь имеет четко выраженную взаимосвязь между громкостью (психологическое впечатление от интенсивности звука) и интенсивностью (физическая величина, связанная с величиной или количеством звука). Для музыки эти отношения варьируются и сильно зависят от воспроизводимого музыкального инструмента (Часин, 2006a; Фабиани и Фриберг, 2011). Речь имеет множество акустических отличий от музыки, независимо от жанра, как было описано ранее в литературе (Часин, 2003; Часин и Руссо, 2004). Динамические характеристики музыки создают проблему для современного поколения цифровых слуховых аппаратов. Многие многозначные цифровые слуховые аппараты, которые доступны сегодня, имеют музыкальные программы. Но мало что отличается от других стандартных речевых программ, и поэтому музыкант не может испытать естественное восприятие динамики живой музыки (Часин, 2003; Закис и Фултон, 2009). В то время как врачи часто полагались на точную настройку программного обеспечения для улучшения качества звука воспроизведения музыки в цифровых слуховых аппаратах, результат не соответсвовал тому, что требуется, потому что существует множество ограничивающих факторов, присущих самому устройству (Часин, 2010). Такие факторы могут включать в себя качество миниатюрных преобразователей, полосу пропускания или частотную характеристику устройства и динамический диапазон, доступный в устройстве. В прошлом датчики, используемые в слуховых аппаратах, часто обвинялись в плохой передачи музыки.

Однако это неоднократно демонстрировалось не так (Киллион, 1988), и технология продолжает улучшаться. Увеличенная полоса пропускания в слуховых аппаратах также помогла устранить несоответствие между частотным откликом слухового аппарата (теперь до 10000 Гц) и частотами, представленными в живой музыке (до 20000 Гц). Там, где присутствует сенсорная потеря слуха, преимущество расширенных высоких частот в слуховом аппарате будет зависеть от остаточного слуха пользователя, и во многих случаях это будет значительно ограничено (Рикетс, Дитбернер и Джонсон, 2008). Динамический диапазон, с другой стороны, является фактором, присущим слуховым аппаратам с возможностью улучшения. Несмотря на то, что измерители слуховых аппаратов могут легко справляться с требованиями динамического диапазона в музыке, обычно эти возможности не используются.

Одним из ключевых различий между речью и музыкой является различие в интенсивности. Мягкая речь обычно рассматривается как имеющая долгосрочный среднеквадратичный уровень 50 дБ (УЗД), разговорная речь с уровнем громкости 65 дБ и громкая речь 80 дБ (УЗД).1 Эти входные классификации используются для отображения реакции усиления, обычно наблюдаемой при измерении с помощью коммерчески доступной измерительной системы зонда-микрофона, или при моделировании с помощью программного обеспечения производителя слухового аппарата. Хотя существует много разных индивидуальных вариаций в уровнях речи, даже крик мужского голоса обычно не превышает 89 дБ (УЗД) (Олсен, 1998). С другой стороны, музыка совсем различная и может легко достигать 105 дБ (A) и может иметь пики 120 дБ (A) или даже выше (Киллион, 2009; Павлыш Лужинский, Дударевич, Зaмойский, и Сливинско-Ковальский, 2010). Например, Киллион (2009) измерил пики симфонического оркестра в концертном зале с 114 до 116 дБ (C), а Флуграф (1969) измерил усиленную рок-музыку с уровнями 114 дБ (A). Следует отметить, что эти пики, особенно для оркестровой музыки, очень короткие по продолжительности и обычно выше уровней воздействия, которые инструменталисты подвергаются на долгосрочной основе (Бехар, Вонг и Кунов, 2006; Макдональд, Бехар , Вонг и Кунов, 2008; Филипс и Мейс, 2008; Пойсант, Фрейман, Макдональд и Нуньес, 2012; Ройстер, Ройстер и Киллион, 1991). Усиленная рок-музыка, однако, обычно может иметь долгосрочный средний уровень, который выше, чем для оркестровой музыки (Кларк, 1991).

Как правило, цифровой слуховой аппарат сжимает пики сигнала, когда они достигают 95 дБ (УЗД) перед аналого-цифровым преобразованием. Это основано на 16-разрядной аналого-цифровой архитектуре преобразования A / D, которая в настоящее время используется в большинстве слуховых аппаратов (Эгнью, 2002; Эдвардс, 2007; Хэтчер и др., 2005). Порог сжатия 95 дБ перед аналого-цифровым преобразователем более чем достаточен даже для громкой речи, даже если уровень измеряется близко к губам говорящего. Френч и Стейнберг (1947) обнаружили уровни громкости 90 дБ, 5,1 см (2 дюйма) от губ говорящего. Средние общие уровни ниже, как упоминалось ранее, но это может варьироваться в зависимости от метода измерения (Берн, 1977; Корнелисс, Гагне, & Зивалд, 1991; Данн и Вайт, 1940; Френч и Стейнберг, 1947; Лейдфог & МакКинни, 1963; Олсен, 1998). Для пиков живой музыки этот порог сжатия 95 дБ на входе слишком низок, и музыка может звучать сжатой, неестественной и даже слегка искаженной. Сжатие широко используется в индустрии звукозаписи, чтобы музыка звучала «громче», а также упрощала сокращение данных для хранения на портативных устройствах, но обычно не рекомендуется обычными слушателями слуха, когда им предоставляется выбор (Кроган, Архат, Кейтс, 2012). Таким образом, можно ли использовать низкие пороговые значения сжатия перед аналого-цифровым преобразователем в слуховых аппаратах, чтобы может быть похожим на опыт обычных слуховых аппаратов при прослушивании файлов с кодировкой с низкой скоростью передачи битов? Этот вопрос может быть рассмотрен в будущих исследованиях.

Нет ничего, что можно было бы сделать с помощью программного обеспечения для слухового аппарата, чтобы исправить или уменьшить влияние этого низкого порога сжатия ввода на сигнал. Получающиеся перцептивные искажения особенно являются недостатком для музыкантов в ансамблях, которые, возможно, пытаются услышать, как их коллеги-музыканты правильно играют. Мы обсудим методологию обработки цифрового сигнала, которая может адаптировать ограничение сжатия, специфичное для речи, на входе в аналого-цифровой преобразователь в конфигурацию, специфичную для музыки, наряду с измерениями, чтобы продемонстрировать ее эффективность.

**Основы A / D преобразования**

Преобразование A / D является передней частью цифрового слухового аппарата. Он состоит из источника входного сигнала, прежде всего микрофона слухового аппарата, и аналого-цифрового преобразователя (Чермак и Армстронг, 1999). Подробное обсуждение процесса преобразование A / D выходит за рамки данной статьи; однако короткое обсуждение этого вопроса помогает объяснить потенциальное решение этой проблемы. Ключевым элементом преобразования A / D, связанным с динамическим диапазоном, является квантование, которое классифицирует информацию об амплитуде сигнала (Агнью, 2002).

Чтобы кратко объяснить квантование, необходимо рассмотреть некоторые базовые определения. Бит (двоичная цифра) представляется как 1 или 0 и является наименьшей возможной частью цифровой информации (Агнью, 2000). Цифровая длина слова относится к числу бит, которые используются для представления сигнала. Поэтому 16-битное цифровое слово может выглядеть так: 1010111001100111. Без фокусировки на конкретной реализации размер шага квантования обычно определяется как длина двух цифровых слов (Агнью, 2002). На рисунке 1 показана зависимость квантования и разрешения. Серая кривая является частью синусоидального сигнала, нормированного на +/- 0,9, а черная линия представляет собой шаги дискретного квантования.

[An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig1.jpg](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040855/figure/fig1-1084713812471906/)

Рисунок 1. Шаги квантования для части простой формы сигнала

8-битное квантование создает 28 или 256 дискретных уровней для представления амплитуды сигнала, как схематически показано на левой стороне, тогда как 16-битное квантование, показанное справа, создаст 216 дискретных уровней или 65536 уровней. Чем больше уровней квантования, тем точнее разрешение для определения амплитуды. Каждый бит в цифровой системе представляет приблизительно 6 дБ динамического диапазона (Рейн и Тевари, 2009). Следуя этому правилу, в таблице 1 показана взаимосвязь между длиной цифрового слова и динамическим диапазоном.

В большинстве современных слуховых аппаратов используется 16-битное преобразование A / D. Однако, в зависимости от конструкции слухового аппарата, даже если цифровая система использует 16-битное преобразование A / D, динамический диапазон может быть ограничен только 12 битами, например, из-за других требований, таких как направленный микрофон и системы обработки обратной связи (Агнью, 2000). В результате, чтобы соответствовать пикам живой музыки, это может быть действительно представлено только цифровой системой слухового аппарата с использованием аналого-цифрового преобразования не менее 20 бит длины слова, в результате чего потенциальный динамический диапазон составляет 120 дБ.

В дополнение к представлению динамического диапазона сигнала при преобразовании сигнала от аналогового к цифровому, важно также знать об ошибке квантования (Лионс, 2004). Большое количество дискретных шагов может не дать бесконечной точности в представлении амплитуды из-за ошибки квантования. В связи с тем, что процесс квантования всегда будет округлен или округлен до ближайшего уровня, доступного (Агнью, 2000), поэтому может быть разница между фактическим сигналом и квантованным сигналом. Эта ошибка может привести к слышимому шуму, который может быть замаскирован шумом микрофона в слуховом аппарате. Увеличение количества доступных уровней квантования может быть достигнуто за счет увеличения длины цифрового слова, и это уменьшит ошибку квантования (Агнью, 2002). Это позволяет сделать более точным цифровое представление аналогового сигнала; однако для этого требуется увеличение подачи питания на слуховой аппарат. Чтобы сохранить время автономной работы, необходимо выполнить компромисс в дизайне цифрового слухового аппарата. Остается вопрос о том, что можно сделать для улучшения существующих цифровых систем слуховых аппаратов, которые используют 16-разрядные аналого-цифровые преобразователи.

**Преодоление текущих пределов динамического диапазона**

Интегральные схемы слуховых аппаратов должны быть эффективны с точки зрения разряда батареи, поэтому регулировка цифровой длины слова для учета речи является важным фактором в минимизации энергопотребления батареи. Это она из главных причин, почему 20 или 24-битное A/D преобразование не широко применяется в слуховых аппаратах, которые доступны сегодня. (Кейтс, 2008). Однако, это может измениться в будущем по мере того, как будут меняться технологии. До этого момента, если есть что-нибудь, что может быть сделано со слуховым аппаратом, перед входом в компрессор, для того, чтобы иметь возможность обрабатывать громкие пики музыки с 16-битной цифровой архитектурой? Ответ заключается в использовании 16-битного A/D преобразователя, при изменении максимального входного уровня, где слуховой аппарат работает более линейно, АРУ вход ( автоматическое регулирование усиления) не начинает компрессию, пока уровень микрофона не превысит 110 дБ (УЗД).(Часин, 2003). Эта основная идея изменения АРУ входа была реализована в коммерческом слуховом аппарате компанией Bernafon AG в 2010. В результате, большинство, если не все из верхних громкостей живой музыки не были компрессированы перед A/D преобразователем без значительно увеличения разряда батареи, которые были подтверждены исследованиями энергопотребления. На рисунке 2, можно увидеть схематическую разницу между измененной (черная кривая до 110 дБ (УЗД)) и эталонной обработкой (серая кривая достигающая 96дБ (УЗД)) по фронту. Предполагая, что серая кривая имеет уровень звукового давления на уровне 96 дБ (УЗД), серая в стрелка в АРУ входном контроллере блокирует индикацию отсечки. Входные сигналы с более высоким уровнем в дальнейшем не будут преобразованы в цифровой домен. Черная кривая показывает сигнал с характеристиками живой музыки как было описано выше. Черной стрелкой можно изменить АРУ вход изменением динамического диапазона ,делая уровень выше, используя при этом Δ(дельту). Однако диапазон между минимальным и максимальным значениями амплитуды остается таким же [-1:1-1/2^(длина слова -1)] и не увеличивается как наилучший путь решения с 20-битной системой. После A/D преобразования, эта Δ будет компенсирована в другом месте во время обработки сигнала в слуховом аппарате.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig2.jpg

Рисунок 2. Базовая блок-схема, показывающая путь сигнала для сеанса A/D

Другой способ рассмотрения данной идеи показан на рисунке 3, где поведение АРУ показано на диаграмме ввода/вывода. В исходном положении (черная линия) порог АРУ входа сокращается на 95дБ (УЗД), тогда как серая линия показывает состояние сдвинутого уровня, которое имеет порог на 110 дБ (УЗД), из-за реализованного затухания в -15дБ в АРУ входа. В последствии это будет называться “уровнем-сдвига”.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig3.jpg

Рисунок 3. Влияние поведения входа/выхода АРУ на опорную (черную линию) по сравнению со сдвигом уровня (серая линия)

Стоит подчеркнуть, что сдвиг уровня происходит на фронте перед усилением в слуховом аппарате. Поэтому максимальная испускаемая мощность не меняется. Пики музыки увеличивают выходной уровень сигнала. Кратковременные интенсивные звуки, превышающие 115дБ (УЗД) создают риск постоянного порогового сдвига(ППС), это обсуждалось в рамках акустического рефлекторного тестирования такими журналами как Хантер, Райс, Шлауч, Левин и Уорд (1999). МРО всегда основывается на реальных или вычисленных неудобных низких уровнях(ННУ) в слуховом аппарате, чтобы избежать возможных проблем с ППС или даже временного порогового сдвига(ВПС) для пользователя слухового аппарата. При установке MPO, независимо от входа, нужно соблюдать обычную осторожность.

**Акустические измерения с измененным входным АРУ**

Была проведена серия измерений для проверки эффективности сдвига уровня в цифровом передней части слухового аппарата**.**

**Метод, оборудование и настройка**

Все измерения проводились с той же настройкой. Использовался пользовательский запрограммированный инструмент записи LabVIEW 2010 SP1 (Корпорация National Instruments, Остин, Техас), который дает возможность проводить измерения ввода / вывода в режиме реального времени. Шасси (рама) от National Instruments (NI) MPXI-1024 со встроенным контроллером NI PXI-8108 и плата сбора и генерации аналогового сигнала NI PXI-4461 были интегрированы в установку, как показано на рисунке 4. Сигналы записывались через Bruel & Kjaer 2cc Coupler 4946 подключенный к GRAS микрофону AG 40 с G.R.A.S. Предусилитель типа 26 A и блок питания 12 AA. Сигналы были представлены в свободном поле через многоканальный усилитель мощности, RAM Audio T2408, подключенный к стойке Bose MA 12 Line Array громкоговорителя (LS).

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig4.jpg

Рисунок 4. Настройка измерения

Слуховой аппарат был помещен на подставку на расстоянии 40 см и направлен к середине громкоговорителя. Звукопоглощающая занавеска покрывала любые отражающие поверхности в тихой комнате 30 м2. Использовались два разных акустических стимула. Первый состоял из синусоидальных сигналов 1 кГц и 3 кГц, а второй состоял из смеси небольших записанных фрагментов музыки продолжительностью от 15 до 30 с, представляющих разные стили и жанры музыки с широкими динамическими изменениями (например, хор и оркестр: Элгар Мечта Геронтия). Все сигналы были нормализованы до +/- 1 с помощью Adobe Audition 3.0 (Adobe Systems Incorporated, Сан-Хосе, Калифорния). Записи использовались для контроля как можно большего числа переменных в тестовой комнате, а также для обеспечения надежности и повторяемости измерений. Встроенная процедура калибровки гарантировала, что желаемый уровень звука был применен в точке калибровки. Используемый слуховой аппарат был коммерчески доступным устройством BTE, выбранным случайным образом со склада.

Были сопоставлены два условия: во-первых, эталонная программа со всеми деактивированными всеми адаптивными функциями; и во-вторых, программа с сдвигом уровня с измененным AGCinput. Для сравнения, коэффициент усиления был установлен равным линейным значениям с помощью программного обеспечения для подгонки с минимальным усилением, чтобы максимально изолировать переднюю часть слухового аппарата (Часин, 2006b), как показано на рисунке 5. Система расширения была установлена максимально для преодоления возможных побочных эффектов внутреннего и внешнего шума. Никаких других специальных настроек не было.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig5.jpg

Рисунок 5. Моделирование линейного усиления имитации слухового аппарата

**Результаты**

Простой способ увидеть разницу между предусилителем эталонного и сдвинутого по уровню условий - это посмотреть на функцию ввода / вывода. На рисунке 6 мы видим функцию ввода / вывода для синусоидального сигнала 1000 Гц с настройкой усиления, показанной на рисунке 5. Серая линия представляет собой эталонную программу, предназначенную для речи с отсечкой (УЗД) на 95 дБ. После входа (УЗД) на 95 дБ кривая начинает выравниваться, указывая на то, что инструмент сжимает этот сигнал. Черная линия представляет один и тот же инструмент, но с отключением AGCinput до 110 дБ (УЗД). В этом случае слуховой аппарат не сжимает сигналы в передней чвсти, пока они не достигнут уровня (УЗД) 110 дБ.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig6.jpg

Рисунок 6. Входная / выходная функция с уровнем сдвига обработки включения и выключения для синусоидального сигнала частотой 1 кГц

Даже когда усиление увеличивается на 4 дБ в слуховом аппарате, эффект все еще отчетливо проявляется, как показано на рисунке 7. Чтобы подчеркнуть функциональность, было выполнено дополнительное измерение с синусоидальным сигналом 3 кГц (рисунок 8).

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig7.jpg

Рисунок 7. Входная / выходная функция с уровнем сдвига обработки включения и выключения для синусоидального сигнала частотой 1 кГц, увеличенного на 4 дБ по сравнению с рисунком 6

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig8.jpg

Рисунок 8. Входная / выходная функция с уровнем сдвига обработки включения и выключения для синусоидального сигнала частотой 3 кГц

Критическая точка загиба для входа 3 кГц смещается в сторону более низких входных уровней из-за характерных резонансов микрофона. Чистые синусоидальные сигналы не так распространены в музыке (кроме электронной музыки), поэтому важно посмотреть на эффекты, которые были замечены ранее при записи музыки. На следующих рисунках мы видим, что записанная музыка отображается в виде осциллограмм с нормированной амплитудой по оси y и по времени на оси x. Черная форма сигнала всегда является исходным сигналом, а серая - сигналом через слуховой аппарат. На рисунках 9 и 10,10 показаны две серых формы сигнала для входа пикового входа (УЗД) 110 дБ, которые представляют собой записи из набора музыки из первого движения (Vivace) симфонии № 7 Бетховена.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig9.jpg

Рисунок 9. Запись с обработкой со сдвигом по уровню; входной уровень 110 дБ (УЗД)

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig10.jpg

Рисунок 10. Запись с эталонной обработкой; входной уровень 110 дБ (УЗД)

На рисунках 9 и 10 четко показано влияние сохраненного динамического диапазона с обработкой сдвига уровня по сравнению с опорным сигналом, где сжатие подается на сигнал на входе. Это демонстрирует то, что естественные динамические характеристики будут преобразованы в цифровой домен со сдвигом уровня. Также стоит посмотреть, как обработка с сдвигом уровня влияет на меньшие уровни ввода. На следующих рисунках 11 и 12 показаны записи с одним и тем же входным сигналом, но с уровнем 90 дБ (УЗД).

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig11.jpg

Рисунок 11. Запись с обработкой со сдвигом по уровню; входной уровень 90 дБ (УЗД)

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig12.jpg

Рисунок 12. Запись с эталонной обработкой; входной уровень 90 дБ (УЗД)

Когда вход уменьшается, эффект сильно уменьшается, и эталонная обработка может сохранять то же динамическое поведение, что и обработка с сдвигом по уровню. Эффект был пока продемонстрирован только одним произведением оркестровой музыки. Чтобы подчеркнуть эффект, на следующих рисунках 13 и 14 показана запись с входным сигналом (УЗД) с напряжением 110 дБ небольшого латунного ансамбля, исполняющим традиционную пьесу American Jazz, лазарет Сент-Джеймс. Опять же, сохранение динамического диапазона ясно показано на рисунке 13 по сравнению с эталонной обработкой на рисунке 14.

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig13.jpg

Рисунок 13. Запись с обработкой с изменением уровня; входной уровень 110 дБ (УЗД)

An external file that holds a picture, illustration, etc.
Object name is 10.1177_1084713812471906-fig14.jpg

Рисунок 14. Запись с эталонной обработкой; входной уровень 110 дБ (УЗД)

Эти измерения были сделаны с записями из источников CD (16-бит 44,1 кГц Stereophile и EMI), чтобы обеспечить надежность и повторяемость измерений. Можно, однако, предсказать, что для живых выступлений с большим динамическим диапазоном эффекты сдвига уровня будут еще более значительными.

**Побочные эффекты от сдвига уровня**

Есть ли какие-либо негативные последствия для сдвига уровня? При выполнении этого сдвига уровня создается один побочный эффект. Ослабляя AGCinput, все входные уровни сдвинуты, и для мягких входов необходимо учитывать особую осторожность. Для пользователей слуховых аппаратов, с нормальным слухом низкой частоты, внутренний шум слухового аппарата может быть более слышимым в спокойной обстановке, чем для сопоставимой программы, предназначенной для речи без сдвига уровня. С другой стороны, уровень музыки (даже пианиссимо), вероятно, будет намного более интенсивным, чем шум схемы, поэтому любой воспринимаемый шум, вероятно, будет замаскирован (М. Часин, личное сообщение, 19 октября 2012 г.). Чтобы преодолеть эту потенциальную проблему, в программе со сдвигом уровня порог для системы с расширенным частотным диапазоном был скорректирован для компенсации этого побочного эффекта. Расширение противоположно сжатию; более конкретно, меньший выигрыш применяется к мягким звукам (Venema, 2006). Расширение может уменьшить внутренний шум в слуховом аппарате и, кроме того, также снизить уровень шума окружающей среды на уровне низкого уровня, например, в системах вентиляции и т. д.

**Дополнительные соображения для музыкальных программ для слуховых аппаратов**

Можно применить сдвиг входного уровня к различным программам в многопользовательском слуховом аппарате. Поэтому настройки, необходимые для этого изменения, не являются глобальными. Поэтому нет необходимости иметь все настройки конечного пользователя при включенном переключении уровня. В результате специальная программа может использоваться в слуховом аппарате исключительно для музыки. В дополнение к сдвигу уровня в передней части для более высоких уровней ввода, есть ли что-то еще, что можно сделать, чтобы сделать живую музыку более приятной? Что касается программы для живой музыки, были рассмотрены следующие дополнительные факторы: пропускная способность и усиление, использование автоматических систем и задержка пропускной способности.

**Пропускная способность и усиление**

Хорошо известно, что для обычных слуховых аппаратов широкий частотный отклик способствует воспринимаемой естественности музыки (Моор и Тан, 2003). Были предприняты усилия для обеспечения того, чтобы частотная характеристика слуховых аппаратов с использованием сдвигов уровня была как можно более широкой - до 10 кГц в зависимости от стиля и метода акустической связи. Однако следует помнить, что не все пользователи с нарушением слуха предпочитают расширенный высокочастотный отклик (Франкс, 1982; Панч, 1978). Это может быть вызвано потерей слуха человека, когда люди с более слабыми потерями слуха предпочитают более высокую полосу частот (Рикетс и др., 2008). Что касается низкочастотного усиления, Франкс (1982) пришел к выводу, что слушатели с нарушением слуха предпочитают расширенный низкочастотный отклик при прослушивании музыки. Однако из-за использования открытых фитингов большая часть низкочастотного усиления слухового аппарата уменьшается, в то время как большая часть естественной низкочастотной информации проходит естественным путем через акустическую связь с ухом. Для дальнейшего обсуждения проблем с пропускной способностью слухового аппарата и музыки см. Моор (2012).

В дополнение к более широкой полосе пропускания объем сжатия, предписанный алгоритмом подгонки для пользователя слухового аппарата, был уменьшен в музыкальной программе с примененным сдвигом уровня. Используя таблицы смещения, более линейный отклик был предоставлен программным обеспечением для подгонки. Это согласуется с исследованиями, в которых различные стратегии усиления могут быть применены к музыке в отличие от речи (Часин и Руссо, 2004; Дейвис-Венн, Соуза и Фабри, 2007; Ван Бюрен, Фесте и Хоугаст, 1996, 1999). Врачи могут, конечно, применять коэффициент усиления и корректировать параметры сжатия, которые желательны для конкретного пользователя слухового аппарата, с программным обеспечением для установки, поэтому такие вопросы, как комфорт или другие конкретные запросы, могут быть легко приспособлены.

**Автоматические функции**

При прослушивании музыки важно, чтобы все автоматические функции, такие как уменьшение шума и адаптивная направленность, были отключены. Это важно, чтобы эти системы не интерпретировали музыку как шум, который может повлиять на качество звука (Часин и Руссо,2004; Руссо, 2006). Когда вы сидите в концертном зале, часто бывает, что люди в местах вокруг слушателя делают посторонний шум. Возможно, они разговаривают о том, что происходит на сцене со своим соседом. Или, возможно, они развертывают фантик от конфеты, который может быть очень разрушительным, независимо от того, как медленно они это делают (Крамер, 2000). Аплодисменты также могут быть очень громкими и разрушительными при ношении слуховых аппаратов на концерте. Поэтому желательно выбрать настройку фиксированного направленного микрофона, если это необходимо, в живой музыкальной программе, чтобы сосредоточить внимание на сцене, а не на действиях членов аудитории вокруг слушателя.

**Пропускная способность**

В ряде исследований был изучен эффект задержки передачи по качеству звука. Эта задержка относится к сумме задержек, присущих сигнальному тракту слухового аппарата, и обычно падает ниже 10 мс (Диллон, Кейдсер, О´Брайн Силберштейн, 2003). Хотя исследования, связанные с задержками тестирования в диапазоне от 1 до> 10 мс в симуляции, продемонстрировали негативное влияние на качество звука, о чем свидетельствуют нормальные и слуховые аппараты с нарушениями (Стоун и Моар, 1999, 2002, 2003, 2005; Стоун, Моар, Мейсонбейкер, Дерлеф, 2008), эти негативные эффекты не были очевидны при тестировании на реальных слуховых аппаратах, которые носят люди с нарушением слуха (Гроф и Сондеград, 2004).

В одном исследовании Закис, Фултон и Стил (2012) рассмотрели эффект задержки на качество звука музыки в реальных слуховых аппаратах. В этом исследовании была предпринята попытка создать худший сценарий, используя слуховые аппараты с открытым каналом с набором усиления, чтобы вероятность максимальной фильтрации гребенки была максимальной. Эффекты гребенчатого фильтра ожидались, когда усиленный сигнал и прямые дорожки сигналов были объединены в ушном канале слушателя. Двенадцать обученных музыкантов слушали два выбранных музыкальных прохода в трех условиях задержки (1,4, 2 и 3,4 мс) и также при отсутствии задержки. Хотя различия в качестве звука могут быть описаны музыкантами для каждого условия задержки, и в некоторых случаях сильные предпочтения были записаны для отдельных лиц, не было обнаружено существенной разницы между предпочтениями, назначенными каждому условию задержки, по сравнению с условием отсутствия задержки.

**Опыт работы со слуховым аппаратом с использованием сдвига уровня ввода**

В современных слуховых аппаратах используются специальные программы для живой музыки, в которых учитываются дополнительные факторы, о которых говорилось выше. Важно определить, могут ли быть обнаружены субъективные улучшения, когда уровень сдвига в передней части для более высоких уровней ввода реализуется и используется отдельными лицами, которые сообщили о предыдущем плохом опыте работы с цифровыми слуховыми аппаратами. Хокли и др. (2010) провели исследование, в котором рассмотрены оценки качества звука 9 профессиональными музыкантами (8 мужчин и 1 женщина). Четверо из этих музыкантов были духовыми игроками (кларнет, саксофон и флейта); 3 играл джаз, а другой был классическим музыкантом**.** Три музыканта были классическими скрипачами, которые также играли на альте. Последние два музыканта были рок-гитаристами. Эти люди были постоянными пользователями аналоговых слуховых аппаратов K-AMP ™ (Киллион, 1990, 1993). Эти люди не смогли носить цифровые слуховые аппараты из-за неестественном качестве звука, что в конечном итоге нарушило игру и наслаждение музыкой. У девяти музыкантов были установлены слуховые аппараты Micro BTE. Восемь носили неразъемные формы для ушей, в то время как один использовал полностью закрывающиеся ушными вкладышами**.**

Шкалы атрибутов, используемые с участниками, были основаны на работах Габриэльссона, Розенберга и Шегрена (1974), Габриельссона и Шегрена (1979), Габриельссона, Линдстрема и Ове (1991) и Кокса и Александра (1983). Весы состояли из качественных описаний качества звука. Каждый участник дал количественный рейтинг по отношению к атрибуту, который наилучшим образом соответствует тому, что он или она испытал. Полнота - пример атрибута, который использовался, где перцептивное измерение от «полного» до «тонкого». Другой пример атрибута, который был измерен, - это естественность, где перцептуальное измерение от «истины до источника» до «Искусственный». Участникам было предложено сравнить с теми же слуховыми аппаратами программу, которая применяла сдвиг уровня со стандартной программой, которая этого не делала.

В целом, для оценки полноты, программа со сдвигом уровня была оценена как более полная, чем для стандартной программы без сдвига уровня. Общая достоверность программы со сдвигом уровней была оценена значительно лучше, чем для стандартной программы. Не было существенной разницы между суждениями о естественности между двумя программами из-за большой дисперсии данных ответа; однако наблюдалась тенденция. В этом небольшом исследовании был сделан вывод, что смена уровня способствовала лучшему рейтингу качества звука для этих музыкантов.

**Заключение и выводы**

Музыканты возлагают большие надежды на их слуховой аппарат для музыки. Эти ожидания редко оправдываются. Несмотря на то, что дальнейшие улучшения в миниатюрных преобразователях и пропускной способности помогли, появилась возможность для дальнейшего повышения производительности музыки, адаптируя динамический диапазон слуховых аппаратов**.** В этой статье описывается реализация решения размещения громких пиков живой музыки, которые в противном случае были бы сжаты или даже искажены до того, как аналого-цифровой преобразователь, используемый в 16-разрядной архитектуре, применялся сегодня во многих слуховых аппаратах. Использование этого уровня сдвига сохраняет динамику живой музыки для музыкантов и любителей музыки, не затрагивая время автономной работы. Поскольку технология цифрового слухового аппарата развивается в направлении 20-битной и даже 24-битной архитектуры, чтобы точно передавать динамический диапазон не менее 120 дБ с меньшим потреблением тока, то использование сдвига уровня будет устаревшим. Использование сдвига уровня является наиболее практичным решением для музыки в слуховом аппарате, которая доступна сегодня. Улучшение было очевидным в субъективной оценке группы музыкантов, которые ранее отказались от обработки цифровых слуховых аппаратов в пользу аналогового цифрового преобразователя. Как было проверено Хокли (2010), суждения о качестве звука показали, что при ношении цифровых слуховых аппаратов эти музыканты предпочитали программу с переключением уровня, предназначенную для живой музыки.

|  |  |
| --- | --- |
| Abort | Сбрасывать |
| Accept | Принять |
| Accommodate | Вмещать |
| Adapt | Адаптировать |
| Adequate | Достаточный |
| Advanced | Продвинутый |
| Advantages | Преимущества |
| Agc (automatic gain control) | Автоматическая регулировка усиления |
| Algorithm | Алгоритм |
| Amount | Количество |
| Amplify | Усиливать |
| Analog | Аналоговый |
| Analog-to-digital converter | Аналого-цифровой преобразователь |
| App platforms | Программная платформа |
| Approximate | Приблизительный |
| Apps | Приложения |
| Architecture | Архитектура |
| Aspect ratios | Соотношение сторон |
| Asynchronous transmission | Асинхронная передача |
| Attempt | Делать попытку |
| Attenuation | Затухание |
| Audibility | Слышимость |
| Audible | Слышимый |
| Background | Фон |
| Bandwidth | Пропускная способность |
| Battery drain | Потребление батареи |
| Benefit | Польза |
| Binary | Бинарный |
| Bit | Бит |
| Buffer | Буфер |
| Byte | Байт |
| Cancel | Отменить |
| Capability | Возможность |
| Categorization | Категоризация |
| Characteristic | Характеристика |
| Checksum | Контрольная сумма |
| Circuit | Цепь |
| Classification | Классификация |
| Commercial solutions | Коммерческие решения |
| Component-based | Основанный на компонентах |
| Compression | Сжатие |
| Compute | Вычислить |
| Concept | Концепция |
| Cons | Минусы |
| Consideration | Рассмотрение |
| Conversion | Преобразование |
| Date input | Ввод данных |
| Decoder | Декодер |
| Default | По умолчанию |
| Define | Определять |
| Definition | Определение |
| Delete | Удалять |
| Demand | Требовать |
| Develop | Разрабатывать |
| Development | Развитие |
| Device | Устройство |
| Digit | Цифра |
| Digital | Цифровой |
| Disable | Отключить |
| Discrete | Дискретный |
| Discussion | Обсуждение |
| Distort | Искажение |
| Domain | Сфера |
| Download | Загрузка |
| Drawback | Недостаток |
| Dynamic range | Динамический диапазон |
| Echo | Эхо |
| Emulators | Эмуляторы |
| Enhance | Усиливать |
| Erasing | Стирание |
| Examine | Проверять |
| Exposure | Воздействие |
| Extend | Расширять |
| Extension | Расширение |
| Feedback | Обратная связь |
| Fidelity | Достоверность |
| Fine-tuning | Тонкая настройка |
| Format | Формат |
| Formatting | Форматирование |
| Frame | Кадр |
| Frequency | Частота |
| Grid | Сетка |
| Hearing device | Слуховой аппарат |
| Hexadecimal | Шестнадцатеричный |
| High-level programming language | Язык высокого уровня программирования |
| Hybrid app | Гибридоное приложение |
| Impression | Впечатление |
| Inherent | Свойственный |
| Inner implementations | Внутренняя реализация |
| Install | Установить |
| Instruction | Инструкция |
| Integrated development environments (ides) | Интегрированная среда разработки |
| Intensity | Интенсивность |
| Interpreter | Интерпритатор |
| Interrupt | Прервать |
| Involve | Включать |
| Join | Соединение |
| Label | Метка |
| Letter | Буква |
| Level-shift | Уровень сдвига |
| Library | Библиотека |
| Life time | Срок службы |
| Lifecycle | Дизненный цикл |
| Limitation | Ограничение |
| Limitations | Ограничения |
| Loudness | Громкость |
| Magnitude | Величина |
| Measurement | Измерение |
| Memory | Память |
| Merged | Смешанный |
| Message | Сообщение |
| Miniature | Крошечный |
| Mismatch | Несоответствие |
| Modeling | Моделирование |
| Modem | Модем |
| Modify | Видоизменять |
| Mpo (maximum power output) | Максимальная выходная мощность |
| Multimedia | Мультимедиа |
| Negative effects | Негативные последствия |
| Network | Сеть |
| Node | Узел |
| Noninvasive | Бесконтактый |
| Oblige | Обязывать |
| Output | Выход |
| Overflow | Переполнение |
| Package | Набор инуструментов |
| Peak | Пик |
| Perception | Восприятие |
| Peripheral | Периферийный |
| Permission | Разрешение |
| Portable | Переносимый |
| Power supply | Источник питания |
| Precision | Точность |
| Probe-microphone | Акустический зонд |
| Processing | Обработка |
| Processing | Преобрабование |
| Pros | Плюсы |
| Protocol | Протокол |
| Pts (permanent threshold shift) | Постоянный сдвиг порога |
| Publishing | Публикация |
| Quality | Качество |
| Quantization | Квантование |
| Quarter | Четверть |
| Reading | Считывание |
| Record | Запись |
| Reduction | Сокращение |
| Repeatedly | Неоднократно |
| Reproduce | Воспроизводить |
| Requirements | Требования |
| Research | Исследование |
| Residual | Остаточный |
| Responsibility | Ответственность |
| Return | Возврат |
| Round | Округлять |
| Router | Маршрутизатор |
| Scheme | Схема |
| Sensorineural | Нейросенсорный |
| Signal | Сигнал |
| Simulate | Моделировать |
| Skin | Оболочка |
| Solution | Решение |
| Solutions | Решения |
| Source code | Исходный код |
| Source code reuse | Переиспользование кода |
| Spl (sound pressure level) | Уровень звукового давления |
| Standalone | Закрытое приложения |
| Storage | Хранилище |
| Sub-approaches | Подподход |
| Subsections | Подраздел |
| Support | Поддержка |
| System | Система |
| Technology | Технология |
| Temporary | Временный |
| Testing | Тестирование |
| Thoroughly | Подробно |
| Threshold | Порог |
| Tool | Инструмент |
| Tools | Инструменты |
| Touch-screen | Сенсорный экран |
| Trans-compiler | Транс-компилятор |
| Transducer | Преобразователь |
| Transforms | Преобразовывать |
| Transparency | Прозрачность |
| Treatment | Лечение |
| Tts (temporary threshold shift) | Временный сдвиг порога |
| Ui | Интерфейс пользователя |
| Update | Обновление |
| Url | Интернет адрес |
| Utilize | Использовать |
| Vendors | Поставщики |
| Version | Версия |