

Recent Advances on Perforated Panels for Sound Absorption Applications

Jesús Carbajo, Nicholas Xuanlai Fang and Sang-Hoon Nam

Abstract—Perforated panel sound absorbers have become one of the most promising passive noise control solutions not only because of their excellent sound absorption performance but also because of their high structural strength and durability. These features make them an interesting eco-friendly alternative to traditional porous fibrous media or foams, especially in those scenarios implying aggressive environmental agents (e. g. strong wind, heavy rain...) or severe working conditions (e. g. turbines, jet engines...). Many engineering applications of these systems can be found in practice ranging from noise barriers and room acoustics conditioning to the design of muffler devices and MRI scanners. This work briefly reviews the fundamentals of classical perforated panel sound absorbers and reports some recent advances in their use for sound absorption applications.

Index Terms—Acoustics; sound absorption; perforated panels.

I. INTRODUCTION

Noise pollution is a problem of major concern because of the harmful effects on human health and the negative impact on the environment. In this context, the scientific community together with industrial partners and public authorities are working together on the development of systems that let reduce noise. Among these, passive sound absorbers have become one of the most-extended solutions, being the perforated panel sound absorbers of great interest due to their improved structural features when compared to conventional porous media. Although generally used as a protective covering for such media, when backed by an air cavity the resulting panel system may work as an acoustic resonator for sound absorption itself. To improve the low-frequency absorption performance and absorption bandwidth of these resonators, many authors have proposed different configurations throughout the years. Maa [1] proposed the use of panels whose perforations are sub-millimetric in size resulting in the so-called Micro-Perforated Panel (MPP) sound absorbers. Subsequently, he analyzed their wideband capabilities by using double-layer MPP arrangements [2]. Some other examples are the study of perforated panels with viscous energy dissipation enhanced by orifice design carried out by Randeberg [3], taking advantage of the vibrational

response of thin perforated panels [4], the use of multiple sizes of holes investigated experimentally by Miasa et al. [5], or the parallel arrangement of MPPs [6]. All of these and many other studies served to a great extent as a reference to further developments on this topic, a brief review of the fundamentals of classical perforated panel sound absorbers, and a summary of some recent works being the main aim of this work.

II. CLASSICAL PERFORATED PANEL SOUND ABSORBER

A perforated panel typically consists of a flat rigid surface with periodically arranged perforations such as circular holes or slits, the attenuation of sound being produced by viscothermal losses in these holes (i. e. viscous friction and thermal conduction in the inner air of the perforations). When backed by an air cavity and a rigid wall, a resonant sound absorber is achieved. Let us consider the schematic representation of a classical perforated panel sound absorber as that depicted in Fig. 1. The sound absorption performance of this perforated panel absorber for the case of circular perforations is mainly determined by the radius of the holes, R , the spacing between perforations, b , the panel thickness, d , and the backing air cavity depth, D . Note that the spacing between perforations can be directly related to the perforation rate in the case of periodically distributed perforations by $\phi = \pi R^2/b^2$. In brief, by reducing the radius of the holes the absorption bandwidth can be widened, whereas an increase in the panel thickness or the air cavity depth shifts the peak frequency to lower frequencies.

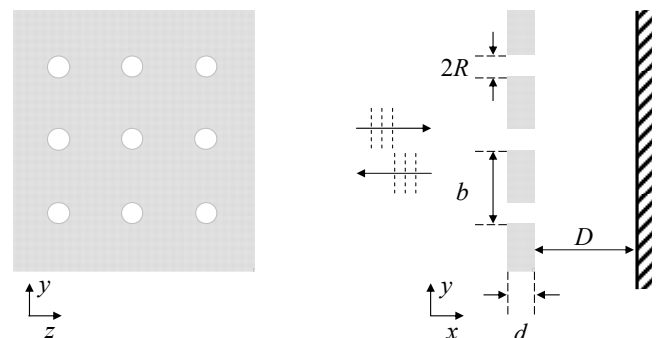


Fig. 1. Schematic representation of a classical perforated panel sound absorber. Left: frontal view. Right: lateral view.

Under plane wave incidence along the x -direction, the acoustic impedance Z of the resonator system is given by

Jesús Carbajo is with the Department of Physics, Systems Engineering and Signal Theory, University of Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain (e-mail: jesus.carbajo@ua.es).

Nicholas X. Fang and S-H. Nam are with the Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 02139 Cambridge (Massachusetts), USA (e-mails: nicfang@mit.edu, shnam@mit.edu).

$$Z = Z_{pp} - jZ_0 \cot(k_0 D). \quad (1)$$

where Z_{pp} is the transfer impedance of the perforated panel and D is the backing air cavity depth, being Z_0 and k_0 the characteristic impedance and wavenumber in air, respectively.

Once the acoustic impedance of the resonator is obtained, it is straightforward to calculate its sound absorption coefficient as

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2. \quad (2)$$

Much research has been dedicated to determining the transfer impedance of perforated panels throughout the years. Based on early works by Crandall [7] and Rayleigh [8] on sound propagation in narrow tubes, several authors have proposed theoretical models that let predict the acoustic behavior of the whole resonator system [9]. Some relevant contributions are the end correction terms suggested by Ingard [10] to account for the finite thickness of the panels, the formulas for MPPs proposed by Maa [1], or the derivation of an equivalent fluid model as that proposed by Atalla and Sgard [11]. Moreover, some works have analyzed the acoustic properties of perforated panels at high sound pressure levels [12] or orifices under grazing flow conditions [13]. Unfortunately, the above models may present some limitations for the analysis of complex configurations (e. g. a panel with non-uniform perforations). Nevertheless, the high development of computers over the last decades has paved the way for implementations based on numerical methods such as the Finite Element Method (FEM) that allow dealing with those cases. Some recent examples are the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) models for the analysis of tapered perforations [14] or the adoption of a full linearized Navier-Stokes formulation for the analysis of a non-homogeneous distribution of the perforations [15].

On the other hand, the acoustic characterization of such absorbers is an essential task both to assess the validity of a predictive model and to analyze extra dissipation phenomena (e. g. the structural resonances). One of the most extended methods to determine their sound absorption coefficient is the transfer function method, whose measurement procedure can be found in the ISO 10534-2 standard [16]. Alternatively, a transfer matrix approach as that described in detail in the ASTM E2611-09 [17] can be used to derive their transfer impedance. Given that the estimation of these acoustic indicators using a prediction model depends on a set of geometrical parameters, it is also common to obtain the values of the latter by using an optimization procedure (e. g. the Nelder-Mead direct search method [18]) that let obtain the best fit between the measured data and the theoretical predictions.

III. INNOVATIVE PERFORATED PANEL SOUND ABSORBERS

Even though classical perforated panel sound absorbers

may show an excellent sound absorption performance, apart from interesting aesthetical and structural features, there has been some representative research over the last years that not only show their great capabilities, but also the potential of these devices to be used in diverse scenarios. A representative selection of six of these research works is briefly outlined next.

A. Parallel-Arranged Extended Tubes (PPET)

Perforated Panels with Extended Tubes (PPET) have been reported to significantly improve the sound absorption in the low frequencies. The use of extended tubes not only let increase the “effective length” of the panel but also achieves a wider bandwidth when combining parallel-arranged PPETs with different cavities (see Fig. 2a). A theoretical investigation into the performance of the PPET was carried out by Li et al. [19], serving this analysis to obtain an optimal design for practical application in the low-frequency range (120-250 Hz). For this purpose, an optimization procedure based on the simulated annealing algorithm was used to derive a configuration of four parallel-arranged PPETs in a constrained space of 100 mm. Experimental validation of the proposed design was performed by manufacturing a prototype which was tested using an impedance tube setup, results showing a reasonable agreement when compared to predictions.

B. Coiled Coplanar Air Chamber

Most perforated panel sound absorbers have a total thickness comparable to the peak absorption wavelength, this being a drawback when designing absorbers for low frequencies. Li and Assouar [20] showed that by coiling up space into the air cavity of the perforated panel absorber an extremely low-frequency acoustic resonator can be achieved. The absorber system consisted of a metasurface composed of a perforated plate combined with a coiled air chamber formed with solid beams as depicted in Fig. 2b. Simulations based on fully coupled acoustic with thermodynamic equations and theoretical impedance analysis were carried out to further understand the underlying physic phenomena. The resulting metasurface possessed a deep subwavelength thickness down to a feature size of $\lambda/223$ achieving perfect sound absorption at 125.8 Hz for a total thickness of the system of 12.2 mm. Furthermore, perfect sound absorption was achieved at the design target frequency. The high efficiency of this type of structure and easy fabrication, when compared to labyrinthine metasurfaces, encourages their use in many applications.

C. Perforated Honeycomb-Corrugation

Tang et al. [21] showed that an ultra-lightweight sandwich panel with perforated honeycomb corrugation in its core as shown in Fig. 2c can be an excellent sound absorber. By using small perforations on the top face sheet and the corrugation of a sandwich panel in the inner cavity, an improvement in both the sound absorption within the frequency band 250-2000 Hz and the mechanical performance of the structure (stiffness and strength) was achieved. Additionally, a theoretical model for sound

absorption was used to show that wideband sound absorption performance can be also achieved if multiple acoustic resonators are introduced. The resulting multi-functional structure showed to be promising for many engineering applications requiring lightweight constructions with both great acoustic and mechanical properties.

D. Compressed and Micro-Perforated Metal

As an alternative to typical perforated panels, Bail et al. [22] proposed a panel fabricated by compression and micro-perforation of a porous metal. The compressed and micro-perforated porous metal panel absorber let achieve better sound absorption than the un-compressed porous metal or a simply micro-perforated spring steel panel. A fourth-order polynomial function was proposed to express the superposition absorption effect resulting from the simultaneous action of the porous and micro-perforated structures. An analysis of the micro-morphology (see Fig. 2d) of the fabricated panel samples provided intuitive explanations of the improvement, which was attributed to the irregular micro-vias from the micro-pores to the micro-perforation.

E. Panel with Oblique Perforations

A perforated panel design that uses perforations aligned obliquely to the panel surface as illustrated in Fig. 2e was proposed in a recent work by the authors [23]. Similar to the PPET, an increase of the “effective length” of the panel allow both improving the low-frequency sound absorption and dealing with limiting space constraints common in many practical scenarios. In doing so, not only a frequency shift of 730 Hz of the resonance frequency of the absorber towards low frequencies can be achieved but also an increase in the peak absorption amplitude provided the geometrical characteristics of the panel are properly chosen. A simple predictive model that relies on the fluid-equivalent theory was developed to investigate the acoustic properties of these absorbers, modified expressions for the geometrical tortuosity and flow resistivity being proposed. Measurements in an impedance tube over additive manufactured samples confirmed previous assertions showing a good agreement when compared to prediction data. Unlike coiled or labyrinthine solutions avoids addressing the air cavity design, which may pose an advantage in terms of further development for practical purposes.

F. Graded spherical perforations

In a recent work by Sailesh et al. [24], the influence of spherical bubble perforations and their grading was investigated by preparing different samples with 3D printed biodegradable material. Both the sound absorption and sound transmission performance of these panel designs were assessed by using the impedance tube method and finite element numerical simulations (see Fig. 2f). Results for different sizes of the spherical bubbles and different types of patterns of graded perforations revealed an enhanced sound absorption performance in the low-frequency range up to

1000 Hz. The authors suggest that these solutions can be effectively used in soundproofing applications in the building and transportation sectors.

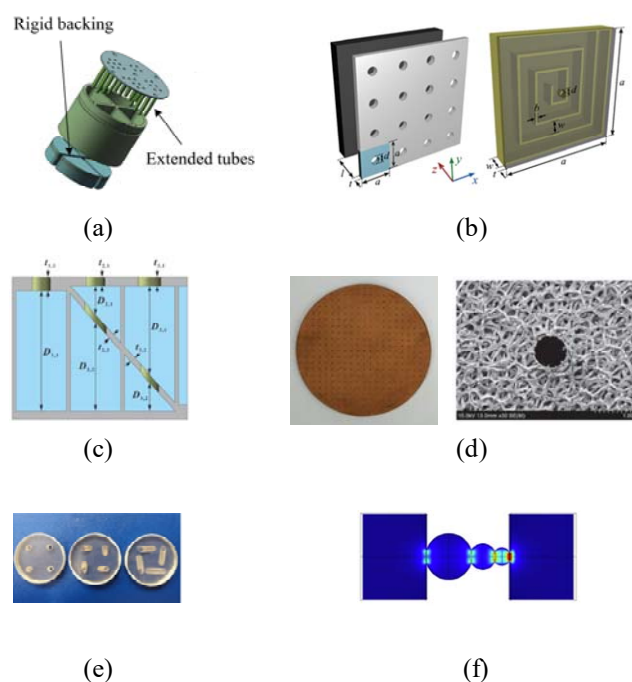


Fig. 2. Innovative perforated panel sound absorbers: (a) parallel-arranged extended tubes (PPET) [19]; (b) coiled coplanar air chamber [20]; (c) perforated honeycomb-corrugation [21]; (d) compressed and micro-perforated metal [22]; (e) panel with oblique perforations [23]; and (f) graded spherical perforations [24].

IV. CONCLUSION

In summary, perforated panel sound absorbers show higher durability and structural strength capabilities than conventional porous media. These advantages make these resonator systems provide a wide range of possibilities in many research fields and disciplines of engineering. On the other hand, the incessant development of additive manufacturing techniques poses a new scenario for the conception of innovative designs like those reviewed in this work. In this regard, it may turn out of great interest to also develop new characterization procedures and perhaps to define additional absorption performance indicators. All the same, there is still a need for cost-effective fabrication processes that ease these fabrication procedures to be more extensively adopted in practice. Extending these techniques into the acoustic materials industry will presumably be a challenge to be faced in the forthcoming years.

ACKNOWLEDGMENT

J. C. would like to thank the Organizing Committee of IcETTRAN 2022 for the invitation to the Section of Acoustics and also express gratitude to dr. Dejan G. Ćirić for the proposal.

REFERENCES

- [1] D. Y. Maa, "Theory and design of micro-perforated sound-absorbing constructions," *Scientia Sinica*, vol. 18, pp. 55-71, 1975.
- [2] D. Y. Maa, "Microperforated-panel wideband absorbers," *Noise Control Eng J*, vol. 29, no. 3, pp. 77-84, 1987.
- [3] R. T. Randeberg, "Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design," Ph.D. dissertation, Trondheim, Norway, 2000.
- [4] Y. Y. Lee, E. W. M. Lee, C. F. Ng, "Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity," *J Sound Vib*, vol. 287, pp. 227-43, 2005.
- [5] I. M. Miasa, M. Okuma, G. Kishimoto, T. Nakahara, "An experimental study of a multi-size microperforated panel absorber," *J Syst Des Dyn*, vol. 1, no. 2, pp. 331-9, 2007.
- [6] C. Q. Wang, L. X. Huang, "On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panels with different cavity depths," *J Acoust Soc Am*, vol. 130, pp. 208-18, 2010.
- [7] I. B. Crandall, *Theory of vibrating systems and sound*, New York, USA: Van Nostrand, 1926.
- [8] L. Rayleigh, *Theory of Sound*, New York, USA: Dover Publications, 1945.
- [9] J. F. Allard, N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media. Modelling Sound Absorbing Materials*, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2009.
- [10] K. U. Ingard, *Notes on sound absorption technology*, New York, USA: Noise control foundation, 1945.
- [11] N. Atalla, F. Sgard, "Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models," *J Sound Vib*, vol. 303, pp. 195-208, 2007.
- [12] T. H. Melling, "The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels," *J Sound Vib*, vol. 29, no. 1, pp. 1-65, 1973.
- [13] A. Cummings, "The effect of grazing turbulent pipe flow on the impedance of an orifice," *Acustica*, vol. 61, pp. 233-42, 1986.
- [14] T. Herdtle, J. S. Bolton, N. N. Kim, J. H. Alexander, R. W. Gerdes, "Transfer impedance of microperforated materials with tapered holes," *J Acoust Soc Am*, vol. 134, no. 6, pp. 4752-62, 2013.
- [15] J. Carbajo, J. Ramis, L. Godinho, P. Amado-Mendes, J. Alba, "A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects," *Appl Acoust*, vol. 90, pp. 1-8, 2015.
- [16] *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*, ISO 10534-2, 1998.
- [17] *Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method*, ASTM E2611, 2019.
- [18] J. A. Nelder, R. Mead, "A simplex method for function minimization," *Comput J*, vol. 7, no. 4, pp. 308-13, 1965.
- [19] D. Li, D. Chang, B. Liu, "Enhancing the low frequency sound absorption of a perforated panel by parallel-arranged extended tubes," *Appl Acoust*, vol. 102, pp. 126-32, 2016.
- [20] Y. Li, B. M. Assouar, "Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness," *Appl Phys Lett*, 063502, 2016.
- [21] Y. Tang, F. Li, F. Xin, T. J. Lu, "Heterogeneously perforated honeycomb-corrugation hybrid sandwich panel as sound absorber," *Mater Des*, vol. 134, pp. 502-12, 2017.
- [22] P. Bai, X. Yang, X. Shen, X. Zhang, Z. Li, Q. Yin, G. Jiang, F. Yang, "Sound absorption performance of the acoustic absorber fabricated by compression and microperforation of the porous metal," *Mater Des*, vol. 167, 107637, 2019.
- [23] J. Carbajo, "Sound absorption of acoustic resonators with oblique perforations," *Appl Phys Lett*, vol. 116, 054101, 2020.
- [24] R. Sailesh, L. Yuvaraj, M. Doddamani, L. B. M. Chinnapandi, J. Pitchaimani, "Sound absorption and transmission loss characteristics of 3D printed bio-degradable material with graded spherical perforations," *Appl Acoust*, vol. 186, 108457, 2022.

Real-time Speaker Independent Recognition of Bimodal Produced Speech

Boris Malčić, Vlado Delić, Jovan Galić and Nebojša Babić

Abstract—This paper presents the initial results in recognition of neutral speech and whispering in real-time, independent of a speaker. The speech database used for training is Whi-Spe. The system for training and testing is based on the Sphinx-4 recognition platform. The experiments in recognition showed average recognition accuracy of 86.2% (for normal speech) and 66.2% (for whisper). Compared to the recognition in controlled conditions, significant drop of the performance is observed in real-time recognition, for both speech modes.

Keywords—Speech recognition; Whi-Spe speech database; Sphinx-4; whispered speech.

I. INTRODUCTION

Recent advances in automatic speech recognition (ASR) systems have brought many benefits in man-machine speech interaction. Despite good performance in controlled conditions, relatively high sensitivity in adverse conditions is the main reason for low robustness and poor use in real-life scenarios [1-2]. Speech technologies are intended for commonly used modes of speech, i.e. normally phonated speech (normal speech). Other speech modalities include shouted speech, louder speech, soft speech and whisper. The parameters for distinction of these 5 modes are sound pressure level (SPL), sentence duration and silence percentage, frame energy distribution and spectral tilt [3]. Whispered speech is pronounced as an alternative to neutral speech for a number of reasons: when someone does not like to disturb others, when loud speech is prohibited or unpleasant, when the information to speak is secret, when someone wishes to hide identity etc. Also, whispered speech can be produced due to health problems (laryngitis or rhinitis) [4]. Whisper as a speech mode is characterized by a lack of glottal vibration, noisy excitation of the vocal tract and in general, the changes of the

vocal tract structure. Recent studies demonstrated performance gain in whispered speech recognition using data augmentation techniques [5-6], denoising autoencoders [7], as well as voice conversion [8].

The goal of the research study presented in this paper is to present initial results in real-time speaker independent recognition of bimodal produced speech (isolated words in neutral speech and whisper) for Serbian. The ASR system for training and testing is based on CMU Sphinx platform [9]. The remainder of this paper is organized in the following manner. In Section 2 a short overview of Hidden Markov Models (HMM) is given. Section 3 presents a speech database, the training of the ASR system and experiment setup for testing. In Section 4 we give results of experiments as well as its discussion, whereas concluding remarks and direction for future studies are stated in Section 5.

II. HIDDEN MARKOV MODELS

Modern ASR systems are inconceivable without Markov models that are combined with a model of a mixture of Gaussian distributions, or with deep neural networks that have become increasingly popular in recent times. The HMMs have become one of the most useful statistical methods for modeling speech signals [10]. Moreover, HMM is often defined by a parameter set $\Lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$ where are denoted: a transition probability matrix as $\mathbf{A} = [a_{ji}]$; an output probability matrix as $\mathbf{B} = [b_j(m)]$, $b_j(m) = P(X_t = o_m | x_t = j)$; and an initial state distribution matrix as $\boldsymbol{\pi} = [\pi_j]$. Furthermore, with a fully connected (ergodic) HMM, transition from any state to any other state is possible. On the other hand, due to the dynamic nature of the speech signal, in modern ASR systems, the serial structure dominates in which transition is possible only to a state with the index higher than the current one. An example of such structure is shown in Fig. 1 where the inactive states (null states) are shaded and located at the beginning and at the end of the sequence, while the output (ultimate) probabilities at the final moment $t = T$ (we observe a series of T feature vectors) are defined by $\eta_j = P(x_T = j)$, $1 \leq j \leq M$, $\eta_j + \sum_{i=1}^M a_{ji} = 1$, $\forall j$ for a certain state sequence $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_T\}$.

In HMM-based speech recognizers, model parameters can be obtained using the Viterbi algorithm in training and the expectation maximization (EM) algorithm. Improved values are obtained by the EM algorithm using the method of Lagrange multipliers to determine the local extremum of a multivariate function. This procedure is called the iterative Baum-Welch (BW) training algorithm. Moreover, it is

Boris Malčić is with the Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka, Department of Electronics and Telecommunications, Banja Luka, Patre 5, Bosnia and Herzegovina (e-mail: boris.malctic@etf.unibl.org), (<https://orcid.org/0000-0002-7476-5140>).

Vlado Delić is with the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia (e-mail: vdelic@uns.ac.rs), (<https://orcid.org/0000-0002-4558-9918>).

Jovan Galić is with the Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka, Department of Electronics and Telecommunications, Banja Luka, Patre 5, Bosnia and Herzegovina (e-mail: jovan.galic@etf.unibl.org), (<https://orcid.org/0000-0002-2487-7136>).

Nebojša Babić is with the Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka, Department of Informatics, Banja Luka, Patre 5, Bosnia and Herzegovina (e-mail: nebojsa.baabic@gmail.com).

important to emphasize that the BW algorithm does not guarantee reaching a global maximum but only a local one, and the iterative procedure is repeated while the joint probability of training data increases.

In order to be able to apply the previous discrete HMM methodology for speech signal recognition, continuously distributed HMMs have been introduced where the probabilities of emitting discrete symbols are changed as a function of the probability density of observations. Since the probability density function of any random variable can be approximated by the sum of N Gaussian random variables, the multivariate Gaussian mixtures are used in HMM recognizers.

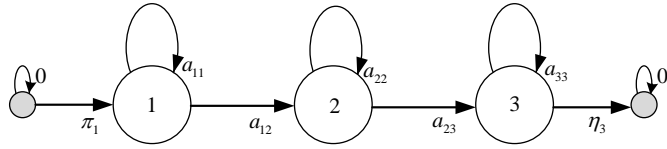


Fig. 1. An example of the serial left-right topology with 3 active states without the possibility of skipping a state

III. SYSTEM FOR RECOGNITION

A. Speech database

There are a relatively small number of languages with available speech databases created in modes other than neutral [11-13]. The Whi-Spe database was created for research activities needed for human-machine interaction in Serbian for bimodal produced speech [14]. In its initial form, the database contains recordings of 50 different words from 10 speakers (5 female and 5 male). The vocabulary of 50 words is divided in three groups: basic colors (6 words), numbers (14 words) and phonetically balanced words (30). Each word is repeated 10 times in both speech modes. Finally, the database includes 10.000 utterances (*wav* records) in a total duration of 2 hours. The sampling frequency of speech samples is 22050 Hz and 16 bits per sample (mono PCM *wav* format). More details about the database (recording, segmentation procedure, labeling and quality control) can be found in [14].

B. ASR training system

The task of the automatic speech recognition system (ASR) is to extract words from the speech signal in the order in which they are spoken. The block diagram of the ASR system based on HMM is shown in Fig. 2. Moreover, in section III c. we present a graphical interface of our program implemented in Java, and based on Fig. 2. First, in the feature extraction block, the speech signal is transformed into a series of feature vectors. The task of the feature extraction block is also to eliminate various variations caused by changes in speakers, ambience or channels. The task of the recognizer is to find the sequence of words that (according to a predetermined criterion) best corresponds to what was actually said.

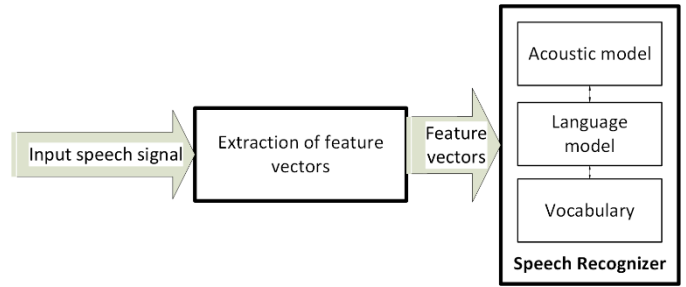


Fig. 2. The operation principle of a general ASR system

From a statistical point of view, the recognizer finds a string (i.e. $\hat{W} = w_1, w_2, \dots, w_M$) of M words which maximizes a posteriori probability $P(W|X)$ where $X = x_1, x_2, \dots, x_T$ is an array of T features. Namely, the language model describes the relationship between words taking into account the grammar of the language for which the recognizer is intended, while the description of the statistical point of view of speech behavior in the feature vector space is presented with an acoustic model. In ASR systems, the basic units for modeling are phonemes, and from their point of view in speech communications, the smallest acoustic unit that a person can perceive is a phoneme. In context-independent recognition, each phoneme is modeled independently, and that modeling unit is called a monophone. However, due to coarticulation, the pronunciation of a particular phoneme largely depends on neighboring phonemes, and then triphones (rarely biphones) are usually used, which are derived using the monophones in a way which takes into account the previous and next phonemes. When using the same, there is a need for a huge training database, which is also one of the main disadvantages of using triphones, and due to the relatively small Whi-Spe database used in this research paper, we only were able to train the acoustic model using the monophones.

Furthermore, let us now mention that speech recognition is divided into two phases: 1st phase of system training, 2nd phase of speech recognition or system testing. Common to both of these phases is that they need to perform feature vector extraction. In doing so, the feature vector should describe as adequately as possible the envelope of the amplitude spectrum of the spoken phoneme, because the information about the spoken phoneme is precisely contained in that envelope. In the training phase, we divided speech into frames (smaller segments) of 25 ms duration within which the speech signal can be considered quasi-stationary. Also, adjacent frames are shifted 10 ms to better track changes in the speech signal spectrum. The most commonly used features in speech recognition are the mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs), and Fig. 3 presents the block diagram for the extraction of MFCC feature vectors.

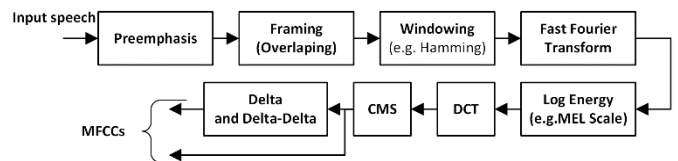


Fig. 3. Process for the MFCCs feature vector extraction

Fig. 3. depicts that several steps need to be performed in the processing chain to extract MFCCs from the input speech signal. Some of these steps are Fast Fourier Transform (FFT) over speech signal frames. Next, the signal spectrum is passed through a filter bank (describing the operation of the basilar membrane) whose filters are distributed evenly on the mel-frequency scale. Furthermore, Discrete Cosine Transform (DCT) replaces inverse FFT and is used to calculate cepstral coefficients because the speech is a real signal and its amplitude spectrum is an even function. Then, to increase the robustness of the system, normalization with Cepstral Mean Subtraction (CMS) is performed, because by subtracting the mean value from Cepstral coefficients, a significant separation of excitation and transfer function of the vocal tract is achieved. This procedure is very useful in whisper recognition. Finally, with the last block in the processing chain on Fig. 3 we single out the dynamic features using which are better monitored the time characteristics of the speech signal, and that achieves less correlation between adjacent frames. For this purpose are used the so-called delta (Δ) features that represent the first derivative (rate of feature change) of static features, and also the delta-delta ($\Delta\Delta$) features that are obtained as a second derivative and represent the acceleration with which static features are changed.

In order to train the acoustic model for CMUSphinx, we followed in detail the procedure described in [15]. First, following the procedure all the necessary files (*an4.dic*, *an4.filler*, *an4.phone*, *an4_train.fileids*, *an4_train.transcription*) for training are created. For that purpose, the phonemes used in training the acoustic HMM for Serbian are presented in Table I. Next, in Table I phonemes {CC, CH, Dj, DZ, SH, ZH} are in Serbian {Ć, Č, Đ, Dž, Š, Ž}, and the notation Y is used for the phoneme SCHWA. Furthermore, an example of the phonetic transcription for only three words (of all 50 words in the Whi-Spe that are used in the process of training for the Serbian ASR system), is shown in Table II.

TABLE I
PHONEMES USED FOR MODEL TRAINING

A	B	C	CC	CH	D	Dj	DZ
E	F	G	H	I	J	K	L
Lj	M	N	Nj	O	P	R	S
SH	T	U	V	Y	Z	ZH	SIL

TABLE II
AN EXAMPLE OF PHONETIC TRANSCRIPTION FOR THREE WORDS

Word	Phonetic transcription
CRNA	C Y R Y N A
TRI	T Y R I
ZGRADE	Z G Y R A D E

Second, we prepared the directory **an4** (i.e. our appropriate directory where we created the *wav* subdirectory inside which

are all *wav* records). In our case, 10,000 *wav* records are used from the training Whi-Spe database. After that, using the terminal, we positioned into the **an4**, and executed the command **sphinxtrain -t an4 setup**.

The previous command created a subdirectories **an4** and **feat** in the directory **an4** and the subdirectory **feat** was not visible in the file system, but it was visible in the terminal which could be checked with the commands **ls** and/or **la**. Please note that in relation to the steps of the official instructions, it is important that in the **etc** directory (created previously) from our database (which we called **an4**) we store all the necessary files for training, namely: *an4.dic*, *an4.filler*, *an4.phone*, *an4_train.fileids*, *an4_train.transcription*, *sphinx_train.cfg*. Next, be sure to create a *wav* directory in the directory of the database (**an4**), and place in it all *wav* records. Furthermore, we need to modify the configuration file (**sphinx_train.cfg**) by replacing the following lines (paths) in the configuration file:

```
$CFG_BASE_DIR = "/home/user/Desktop/sphinx-source/an4";
$CFG_SPHINXTRAIN_DIR = "/home/user/Desktop/sphinx-source/sphinxtrain";
```

Also, in the configuration file we need to set

```
# (yes / no) Train contextually dependent models
$ CFG_CD_TRAIN = 'no';
```

Moreover, this previously modified **sphinx_train.cfg**, and all other files from the **etc** file within **an4**, should be copied and moved to the **etc** folder within the folder **/home/user/Desktop/sphinx-source/sphinxtrain**. Finally, after all the previous preparation steps, we started the model training by calling **perl** scripts. Specifically, we go to the terminal in the **sphinxtrain** folder which is inside the **sphinx-source** directory (within that directory there are also **an4**, **sphinxbase** and **pocketsphinx** directories which we prepared earlier). Next, we observed that differences in github's **sphinxtrain** versions manifested by writing keyword **scripts** instead of the original **scripts_pl** in the training commands, and by changing the numbers of **perl** scripts equivalent to those in the training internals sections [15], so for example instead of the command **perl scripts_pl / 10.vector_quantize / slave.VQ.pl** now it is necessary to write **sudo perl scripts / 05.vector_quantize / slave.VQ.pl**. The previous is mentioned because we pulled the edge CMU Sphinx toolkit packages from github, and not used the recommended (5prealpha) releases [16]. Finally, after being positioned in the **sphinxtrain** directory, we executed the following commands in terminal for model training:

```
user@ ubuntu: ~ / Desktop / sphinx-source / sphinxtrain $
sudo perl scripts / 000.comp_feat / slave_feat.pl
user@ ubuntu: ~ / Desktop / sphinx-source / sphinxtrain $
sudo perl scripts / 00.verify / verify_all.pl
```

```
user@ ubuntu: ~ / Desktop / sphinx-source / sphinxtrain $
sudo perl scripts / 05.vector_quantize / slave.VQ.pl
user@ ubuntu: ~ / Desktop / sphinx-source / sphinxtrain $
sudo perl scripts / 20.ci_hmm / slave_convq.pl.
```

After executing the last command, we got the parameters of the Context Independent (CI) trained model as in Fig. 4.

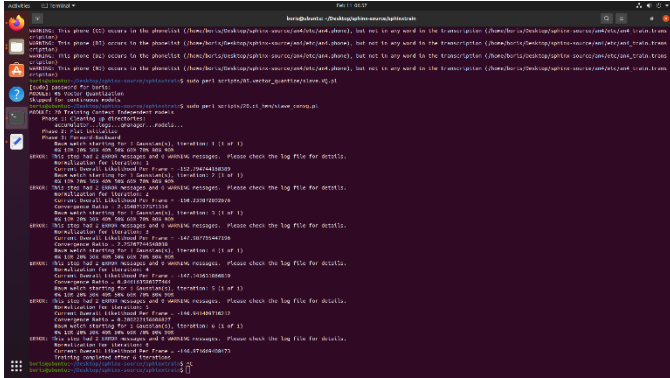


Fig. 4. An example of output CI training in the Ubuntu 20.04.3 LTS terminal

To sum up, we finally created new directories in **an4**, such as the **model_parameters** directory within which is located directory **an4.ci_cont** containing 7 files obtained during the training process, i.e.: **feat.params**, **mdef**, **mean**, **mix_weights**, **noisedict**, **transition_matrices**, **variances**. From the **feat.params** file is visible the number of filters in filterbank is 25. Then, as a feature vector, a 39-dimensional dynamic feature vector is used (13-static + Δ + $\Delta\Delta$). The number of Gaussian mixtures is 8. For each utterance, cepstral mean normalization (cmn) is performed. The number of monophones is 32 (of which 30 corresponding to the 30 phonemes in Serbian, then phoneme SCHWA and silence -SIL). As a result, the models of monophones are initialized with global mean value and variance (flat-start initialization). These all files in **an4.ci_cont** represent the CI continuous HMM that will be used in the following section by the application for the process of testing.

C. ASR recognition (testing) system

Fig. 5. shows the main window of the interface. Labeled with numbers, the components are as follows: 1. Main menu, 2. The list of words available in the model but left out, 3. The list of words chosen for the test, 4. Buttons for managing lists 2 and 3, 5. Most commonly used commands available in the main menu, 6. Output console, and 7. Console-related commands.

The main menu holds all options needed to run the test, load the language model, overview of the used grammar and management of extra words and sentences for the test. The application is packaged with the language model, but also any other compatible language model can be tested through the application. By default, the list of available words is displayed using the language model's dictionary.

When loading the custom model, the user can choose whether to use a grammar definition instead of relying on the language model.

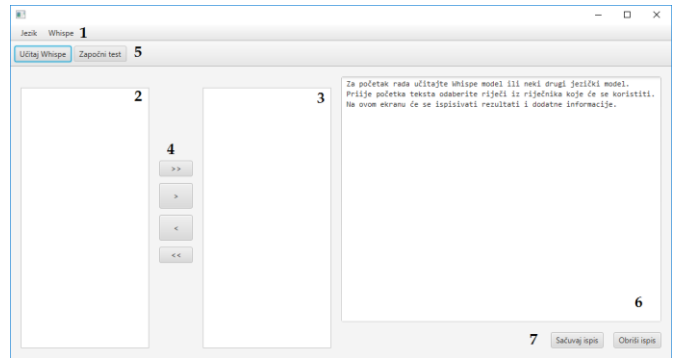


Fig. 5. The main window of the interface

As the list of available words loaded from the dictionary cannot match any but the most basic of grammars, the user can load sentences to use in the test. Each loaded sentence file is treated as a group of sentences where each sentence is one line in the text file. Each loaded file has the box (☐) icon next to the name to indicate that the selected keyword is actually a container of multiple test entries.

When the user wants to run a test, they have an option of shuffling and/or repeating the words multiple times. The user can also decide to save logs into a file instead of relying on the console for the test results. The console will show the results regardless of this setting. When performing many consecutive tests with the same settings, the user can instead provide the configuration through a file. When the file *testConfig.txt* is provided in the same directory as the application, the test settings step is skipped.

The test process screen is shown on Fig. 6. The test process aims to be as simple as possible. The left side of the window shows the instructions of what to pronounce. On each pronunciation, the next word or sentence is shown. The test can be stopped at any time for partial results. The right side of the window shows the test result logs. On each pronunciation, a line with a timestamp, the detected and the correct word will show. When the test is finished, the statistical result will also show, stating the overall accuracy. The console output can be saved or cleared at any time using the buttons below the console.

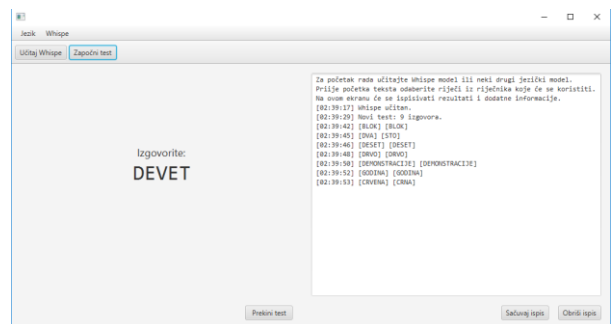


Fig. 6. The application window in the testing phase

IV. RESULTS

The accuracy and correctness of speech recognition are tested on 10 people, i.e. 5 male testing examinees enumerated as {M1, M2, M3, M4, M5}, and 5 female examinees marked as {F1, F2, F3, F4, F5}. All the above respondents pronounced the words from Whi-Spe. The testing was performed in a room with SPL of 30-35 dB(A).

For this purpose, first the parameters of the HMM trained on the entire Whi-Spe for the normal speech, are loaded into the application, and then the testing scenario is repeated for the whisper speech. Exactly, these models are tested on all 10 examinees and this scenario is denoted as **full**. Then, we tested a new scenario denoted as **match** in which the parameters of HMMs were obtained by training only over part of the Whi-Spe (i.e. only on *female/male* speakers in the database), and the obtained models for normal speech (n) and whisper (w) are tested only on 5 *female/male* respondents, respectively. For all those models 8 Gaussian mixtures were used in the configuration file for the training. Next, for all different scenarios (*n_full*, *n_match*, ..., *w_match*), the obtained corresponding results for the accuracy (**Acc**[%]), and the correctness (**Corr**[%]) are calculated in Table III and in Table IV, using the following expressions[17]

$$Corr[\%] = \frac{N-D-S}{N} \times 100\%, \quad (1)$$

$$Acc[\%] = \frac{N-D-S-I}{N} \times 100\%, \quad (2)$$

where: *N* is the total number of words in the reference transcriptions, *D* is the number of deletion errors, *S* is the number of substitution errors, and *I* is the number of insertion errors in each of the tested HMMs. From Table III it is calculated the mean value of recognition accuracy (*Acc_n_full*) of 86.4% with a mean absolute deviation (MAD) equal to 3.52% in the case of normal speech recognition on female examinees in the case of a full scenario (i.e. *n_full*), while for the whisper speech the mean *Acc_w_full* is 62.8% with the average correctness (*Corr_w_full*) of 90.8%. Furthermore, from Table IV, the mean of *Acc_n_match* is 88% (mean value of *Corr_n_match* is 93.6%) with MAD = 4% for testing the male examinees of normal speech for the **matched** (i.e. trained on utterances of male speakers, and tested on male examinees) case.

TABLE III
RESULTS OF SPEECH RECOGNITION ON FEMALE EXAMINEES FOR DIFFERENT SCENARIOS

Examinee	F1	F2	F3	F4	F5
<i>Acc_n_full</i> [%]	88	84	92	80	88
<i>Acc_n_match</i> [%]	74	88	74	70	62
<i>Acc_w_full</i> [%]	70	64	72	54	54
<i>Acc_w_match</i> [%]	50	58	66	56	60
<i>Corr_n_full</i> [%]	90	84	94	82	94
<i>Corr_n_match</i> [%]	86	92	88	84	92
<i>Corr_w_full</i> [%]	72	64	76	60	70
<i>Corr_w_match</i> [%]	58	72	74	68	78

TABLE IV
RESULTS OF SPEECH RECOGNITION ON MALE EXAMINEES FOR DIFFERENT SCENARIOS

Examinee	M1	M2	M3	M4	M5
<i>Acc_n_full</i> [%]	94	84	88	74	90
<i>Acc_n_match</i> [%]	84	86	84	94	92
<i>Acc_w_full</i> [%]	76	58	72	62	80
<i>Acc_w_match</i> [%]	76	76	82	62	80
<i>Corr_n_full</i> [%]	98	94	90	78	94
<i>Corr_n_match</i> [%]	94	94	88	96	96
<i>Corr_w_full</i> [%]	80	62	76	68	80
<i>Corr_w_match</i> [%]	80	84	86	64	88

Next, in the matched case for recognizing males' whispers the mean correctness is 80.4% with MAD = 6.72% and word error rate (WER) of 24.8%. Of course, in the case of the larger (with more different speakers) training database it would be logical to get better testing results in the match case, but for our research the relatively small Whi-Spe database was only available. Moreover, there is an evident reduction in real-time recognition accuracy compared to the controlled conditions (quiet environment and same recording equipment) in closed set speaker independent recognition based on HMM where accuracy was 98.3% (for neutral speech) and 96% (for whisper) [18]. As well, recognition of whisper in real-time is with significantly lower success than recognition of neutral speech. As can be seen from results in Tables 3 and 4, average recognition rate (accuracy and correctness) is higher for male speakers, but this is not statistically confirmed, despite the same training database. Variations among different speakers are high for both speech modes. For the determination of statistically significant parameters which contribute to high deviation of performance among speakers, a higher number of speakers is needed.

V. CONCLUSION

Speech recognition of mode other than neutral is by all means a serious challenge for modern ASR systems. In this paper, the experiments on real-time speech recognition in normal and whisper mode for Whi-Spe speech database and HMM algorithm, are conducted. Obtained results suggest that for recognition in real world scenarios, the larger speech database is needed for training. Future studies will be focused on the analysis of data augmentation techniques in multimodal speech recognition. Finally, the further research will also be based on deep neural networks (DNNs) because using *n*-gram language model from randomly initialized DNN with lattice-free maximum mutual information is possible WER relative reduction around 25% with respect to the best HMMs based ASR system [19].

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, #6524560, AI-S-ADAPT Ministry of

Education, Science and Technological Development of Serbia: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences (MPNTR - 451-03-68/2020-14/200156).

The authors would like to thank all examinees for participation in speech recognition tests.

REFERENCES

- [1] M. P. Fernández-Gallego, D. Toledano, A Study of Data Augmentation for ASR Robustness in Low Bit Rate Contact Center Recordings Including Packet Losses, *Applied Sciences*, vol.2, no. 3, 1580, 2022.
- [2] J. Holms, W. Holms, *Speech Synthesis and Recognition*, Taylor & Francis, London, United Kingdom, 2001.
- [3] C. Zhang, J. H. L. Hansen, "Analysis and classification of Speech Mode: Whisper through Shouted," *Proceedings of Interspeech 2007*, pp. 2289-2292, 2007.
- [4] T. Ito, K. Takeda, F. Itakura, "Analysis and recognition of whispered speech," *Speech Communication*, vol. 45, no. 2, pp. 139–152, 2005.
- [5] P. R. Gudepu, G. P. Vadiseti, A. Niranjana, K. Saranu, R. Sarma, M. Ali Basha Shaik, and P. Paramasivam. "Whisper Augmented End-to-End/Hybrid Speech Recognition System - CycleGAN Approach." *INTERSPEECH*, 2020.
- [6] H. Hikaru, and C. Pajot, "Data Augmentation for ASR using CycleGAN-VC.", *Computer Science*, 2021.
- [7] Đ. Grozdić, S. Jovičić, M. Subotić, "Whispered speech recognition using deep denoising autoencoder", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 59, pp 15-22, 2017.
- [8] M. Cotescu, T. Drugman, G. Huybrechts, J. Lorenzo-Trueba, A. Moinet, Voice Conversion for Whispered Speech Synthesis, *IEEE Signal Processing Letters*, 2020.
- [9] P. Lamere, P. Kwok, E. Gouvêa, B. Raj, R. Singh, W. Walker, M. Warmuth, P. Wolf, "The CMU SPHINX-4 Speech Recognition System", *ICASSP*, 2003.
- [10] X. Huang, A. Acero, H-W. Hon, *Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development*, 1st ed. New Jersey, USA, Prentice Hall PTR, 2001.
- [11] P. X. Lee, D. Wee, H. S. Yin Toh, B. P. Lim, N. Chen, B. Ma, "Whispered Mandarin Corpus for Speech Technology Applications," *Proceedings of Interspeech 2014*, pp. 1598–1602, 2014.
- [12] T. Tran, S. Mariooryad, C. Busso, "Audiovisual corpus to analyze whisper speech," presented at the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 8101–8105, 2013.
- [13] F. Cummins, M. Grimaldi, T. Leonard, J. Simko, "The chains corpus: Characterizing individual speakers," *Proceedings of International Conference on Speech and Computer SPECOM*, St. Petersburg, Russia, pp. 421–435, 2006.
- [14] B. Marković, S. T. Jovičić, J. Galić, Đ. Grozdić, "Whispered speech database: design, processing and application," In: Habernal, I., Matousek, V. (eds.), *TSD 2013*, LNAI 8082, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 591–598, 2013.
- [15] N. Shmyrev, 'Training an acoustic model for CMUSphinx'. [Online]. Available: <https://cmusphinx.github.io/wiki/tutorialam/>. [Accessed: 11-Feb-2022].
- [16] N. Shmyrev, 'CMU Sphinx downloads'. [Online]. Available: <https://cmusphinx.github.io/wiki/download/>. [Accessed: 10-Feb-2022].
- [17] S. Young, G. Evermann, M. Gales, T. Hain, D. Kershaw, X. Liu, G. Moore, J. Odell, D. Ollason, D. Povey, V. Valtchev, P. Woodland, *The HTK Book (for HTK Version 3.4)*, Cambridge University Engineering Department, 2006. [Online]. Available: <http://htk.eng.cam.ac.uk/prot-docs/htkbook.pdf>.
- [18] J. Galić, S. Jovičić, V. Delić, B. Marković, D. Šumarac Pavlović, Đ. Grozdić: "HMM-based Whisper Recognition Using μ -law Frequency Warping", *SPIIRAS Proceedings*, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online), Issue No. 3(58), pp. 27-52, 2018.
- [19] V. Delić, Z. Perić, M. Sečujski, N. Jakovljević, J. Nikolić, D. Mišković, N. Simić, S. Suzić, and T. Delić, "Speech Technology Progress Based on New Machine Learning Paradigm," *Comput Intell Neurosci.*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6614991/>. [Accessed: 05-Apr-2022].

Feature Analysis for Industrial Product Sounds Using Discrete Meyer Wavelet

Đorđe Damnjanović, Dejan Ćirić and Dejan Vujičić

Abstract—The process of wavelet decomposition into approximation and detail coefficients is used in many research fields, especially when signal de-noising is in focus. Extraction of features of different signal types is also an area where wavelets are often mentioned. Different wavelet families provide interesting results in feature analysis and further classification. In that regard, a wavelet that has attracted a significant interest is discrete Meyer. This paper presents the usage of discrete Meyer wavelet for feature analysis of industrial product sounds. More than 100 sounds of 6 different industrial products are tested. The most representative results are given here.

Index Terms—Audio feature analysis; Discrete Meyer wavelet; Approximation coefficients; Detail coefficients; Industrial product sound.

I. INTRODUCTION

Wavelets are often mentioned in literature as an algorithm that solved some problems in the Fourier transform [1-2]. If short time Fourier transform (STFT) and wavelet algorithms are compared, the window function are used in both cases for purpose of analysis and processing of signals. However, in the case of wavelets, window function is not of a fixed size. Width of the wavelet window can be changed as the transform is computed for every single spectral component, and that is the main difference in comparison with STFT [1-2].

Applicability of wavelets can be considered to be one of their advantages since a number of applications are made based on the wavelet algorithms. Some of them include echo cancelation, noise control, speech recognition, de-noising of audio and image signals, unknown system detection and others. Applications can be found in different fields, such as biomedical engineering, telecommunications, signal processing, computer engineering, etc [3-6].

The process of wavelet decomposition into approximation and detail coefficients (Fig. 1) is often used nowadays in feature extraction and analysis. Authors of this paper already presented the results of feature extraction method using wavelets for DC motor sounds in [7-9], where focus is on differences between non-faulty and faulty motors. In that regard, a lot of wavelet families are used, such as Haar,

Daubechies, Coiflet, Symlet, biorthogonal, reverse biorthogonal and Meyer.

In the discrete wavelet processing, the decomposition process is done using the discrete wavelet transform (DWT), (see Fig. 1). This process is based on the use of low-pass (LP) and high-pass (HP) filters. Here, “A” stands for the approximation coefficients, “D” stands for the detailed coefficients and $2\downarrow$ is the down-sampling. Fig. 1 presents only decomposition up to level 2, but the whole process can be extended to a higher level of decomposition [4-5,10-11].

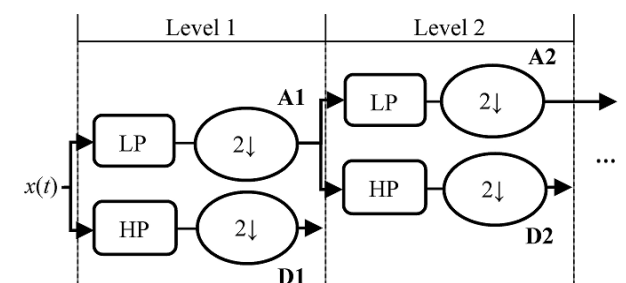


Fig 1. Block diagram of wavelet decomposition.

This paper presents usage of the discrete Meyer wavelet for the purpose of feature extraction from different industrial product sounds. More than 100 sounds organized into 6 different classes (categories) are tested: fan, gearbox, slider, toy car, toy train and valve. Those sounds are taken from the DCASE 2021 challenge (task 2) [12]. The goal is to find certain similarities of the extracted features within the same class and certain differences among the classes in order to prepare the obtained features for future classification. The analysis is done in Matlab software package.

II. MEYER WAVELET

In 1985, Yves Meyer developed the first nontrivial orthogonal wavelet basis. This wavelet is in-group of orthogonal wavelets where are also Daubechies, Coiflet and Symlet wavelets. The main idea was to define wavelet and scaling function in the frequency domain using trigonometric functions. Both wavelet and scaling functions are presented in (1) and (2) [11,13-15]:

$$\hat{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{j\frac{\omega}{2}} \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{3}{2\pi}|w|-1\right)\right) & \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{3}{4\pi}|w|-1\right)\right) & \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & |\omega| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right] \end{cases} \quad (1)$$

Đorđe Damnjanović is with the University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Svetog Save St. 65, 32000 Čačak, Serbia (e-mail: djordje.damnjanovic@ftn.kg.ac.rs).

Dejan Ćirić is with the University of Niš, Faculty of Electronic Engineering in Niš, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

Dejan Vujičić is with the University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Svetog Save St. 65, 32000 Čačak, Serbia (e-mail: dejan.vujicic@ftn.kg.ac.rs).

$$\hat{\phi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \frac{2\pi}{3} \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} v\left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right) & \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ 0 & |\omega| \geq \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (2)$$

where the function v can be changed for the purpose of obtaining different wavelets, for example as done in (3) [12,14]:

$$v(a) = a^4(35 - 84a + 70a^2 - 20a^3), a \in [0,1]. \quad (3)$$

The wavelet function, presented in (1), is symmetrical around point $1/2$, while the scaling function (2) is symmetrical around the point 0 [12-14]. What is also important to mention is that the Meyer wavelet is an indefinitely differentiable with infinite support. In Fig. 2, the discrete Meyer wavelet function (which is often used in software packages) is presented.

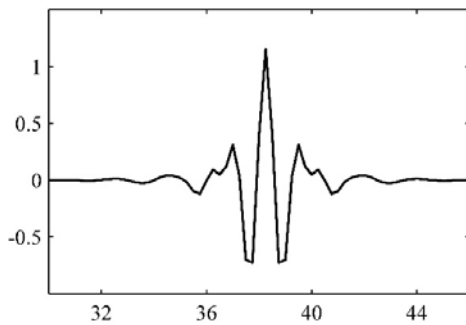


Fig 2. Discrete Meyer wavelet function.

III. METHODS OF ANALYSIS

Within the task 2 (Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring under domain shifted conditions) of DCASE 2021 challenge [12], a number of sounds of 7 different industrial machines (products) - fan, gearbox, pump, slide rail (slider), toy car, toy train and valve are available. For each of the mentioned products, there are three datasets – development, additional training and evaluation datasets. The development dataset is split into three subsets, and in overall these development datasets contain more than 4000 sound samples of normal and anomalous operating product modes.

Among those sounds from the development datasets, about 100 sound samples from 6 classes – from all classes mentioned above except pump (approximately around 17 sounds per product) are chosen here for initial analysis. All sounds are recorded using the sampling frequency of 16 kHz. Length of the recorded signals is 10 s, and they include both the sounds of a machine and its associated equipment as well as environmental noise [12]. In this paper, the following abbreviations will be used: fan-f, gearbox-g, slider-s, toy car-tc, toy train-tt, valve-v.

At the very beginning, all chosen sounds are analyzed in

the time and frequency domain. Then, segmentation process is applied. Size of segments is 50 ms. In this paper, the overlap between neighbor segments of 50% (25 ms) is chosen like in some other previous papers [7-9,16]. Size of segments and overlap can vary from research to research. In some studies, authors propose no overlap between segments [17-18].

After segmentation, the signals are decomposed using the discrete Meyer wavelet. This wavelet is a unique wavelet in the sense that there are no more variations, as for instance in the Coiflet wavelet family, where there are 5 different types in Matlab or in the Symlet wavelet having 45 types, etc [19]. The Meyer wavelet is chosen here having in mind the previous authors' researches [8-9] where this wavelet gave interesting results. The detail coefficients obtained through the wavelet decomposition with different levels of decomposition (from 1 up to 8) are used for further analysis

At each decomposition level and for every segment, the absolute values of the detail coefficients are calculated, and then the mean value of these absolute values is obtained. The set of the mean values of the details coefficients generated in the described way is used as a representative audio feature (wavelet-based feature). In some researches, such as [7-9,20-21], it is presented that the standard deviation can also be used, but authors of this paper showed previously, see [8-9], that the results based on the mean values and standard deviation are similar. This is why the standard deviation is omitted here.

The analysis is carried out in Matlab software package. When the wavelet decomposition is in focus, it is worthwhile to mention a few functions: *wavedec* for wavelet decomposition, *appcoef* and *detcoef* for obtaining the approximation and detail coefficients, *abs* and *mean* for calculating absolute and mean values, respectively.

A specific measure (quantity) named feature difference is introduced in certain isolated cases. It is calculated as the mean value of a difference between wavelet-based features for different industrial products taken from all segments and normalized by the mean feature value [8-9]. This measure is used to indicate more closely the numerical differences among the obtained features in addition to what is shown graphically.

IV. RESULTS

The initial analysis starts with observation of signals in the time and frequency domain. In Fig. 3, six random audio signals (one from each type of the industrial products) are presented in the time domain. If the graphs are closely observed, it can be pointed out that differences between these signals are small. Thus, the time domain signals of fan and gearbox are very similar. The same is valid for the signals of slider, toy car and valve, although some more transients are present here. An exception is the signal of toy train, which has a rather different shape and amplitude comparing to others. In the next four figures, lines associated to these products are plotted by the same color scheme as done in Fig. 3: red color for fan, blue color for gearbox, black color for slider, green color for toy car, magenta color for toy train, cyan color for

valve.

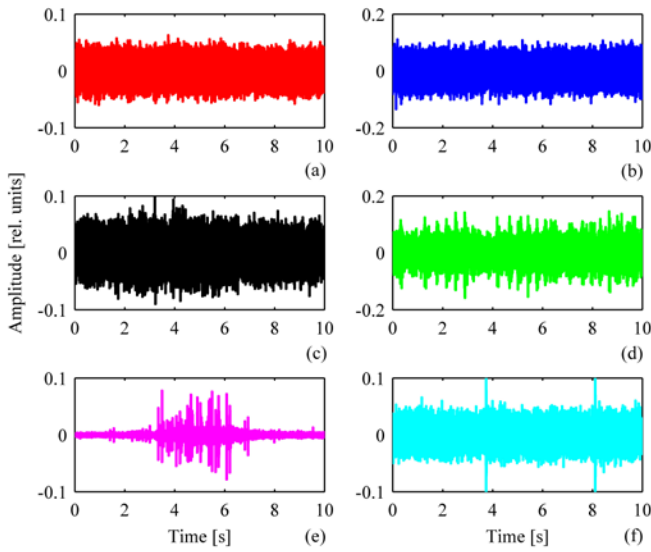


Fig 3. Audio signals (sounds) of industrial products in time domain: (a) fan, (b) gearbox, (c) slider, (d) toy car, (e) toy train and (f) valve.

Spectra of the signals from Fig. 3 are presented in Fig. 4. In the frequency domain, the situation is rather different and differences between spectra are more prominent than in the time domain. Again, like in the time domain, the sound of toy train product sound stands out from the others (see Fig. 4). The trend in spectra for all other products is similar in the frequency range above 125 Hz, where the maximum deviation of any spectra of these products is not greater than approximately 10 dB. On the other hand, the spectrum of toy car shows a significant rolloff below 125 Hz, which is not the case with spectra of other products.

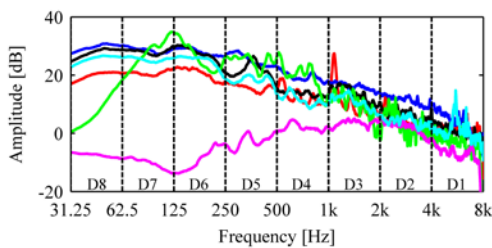


Fig 4. Spectra of audio signals (sounds) of industrial products (the same colors are used as in Fig. 3).

The results obtained in the frequency domain indicate a very favorable trend of what could happen when the signal decomposition by the discrete Meyer wavelet is done. In Fig. 4, the areas from D1 to D8 (from right to left) are also indicated. Those areas are related to the frequency ranges of the detail wavelet coefficients after decomposition at a particular level. Thus, the frequency range from 4 kHz to 8 kHz is correlated with the detail coefficients at the decomposition level 1 (D1). At the next decomposition level, the lower frequency range (up to 4 kHz) is split into two halves, so that the detail coefficients at the decomposition

level 2 (D2) are extracted from the frequency range from 2 kHz to 4 kHz. This trend continues through the next decomposition levels [9] up to the last one, which is here the level 8. For all 8 decomposition levels, the related frequency ranges are given in Table I.

The illustration of the product sound characteristics in both time and frequency domain is given through the spectrograms presented in Fig. 5. The trend seen in the spectra given in Fig. 4 of the level reduction with frequency is also visible in the spectrograms. However, here some unique time-stamps of the signals are stressed, such as fluctuation in time of the slider or non-stationary amplitude of the toy train.

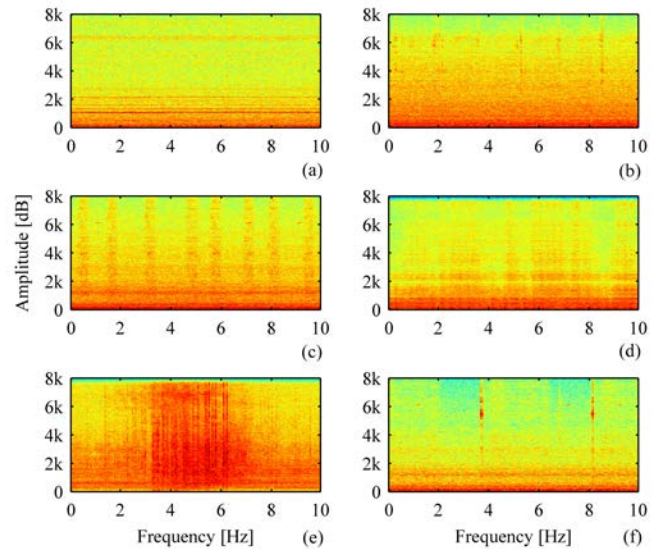


Fig 5. Spectrograms of audio signals (sounds) of industrial products: (a) fan, (b) gearbox, (c) slider, (d) toy car, (e) toy train and (f) valve.

TABLE I
DEPENDENCE OF THE WAVELET DECOMPOSITION LEVEL TO THE FREQUENCY RANGE

Decomposition level	Frequency range
1	4 kHz – 8 kHz
2	2 kHz – 4 kHz
3	1 kHz – 2 kHz
4	500 Hz – 1 kHz
5	250 Hz – 500 Hz
6	125 Hz – 250 Hz
7	62.5 Hz – 125 Hz
8	31.25 Hz – 62.5 Hz

After analysis in the time and frequency domain, the chosen signals are decomposed using the discrete Meyer wavelet. Fig. 6 presents the values of the extracted wavelet-based feature for all six products, that is, signals whose time and frequency representations are given in Figs. 3, 4 and 5. All signals are segmented, wavelet decomposed and then the mean value of the absolute values of the obtained detail coefficients is calculated for each particular segment. At each decomposition level, some differences between the wavelet-based features (detail coefficients) of different products can be observed.

These differences are smaller for some decomposition levels and comparing certain products, while they are larger at some other levels and for some other products. Also, the stationarity of the features of different products is not the same, and it might be used as one more parameter for differentiating the products. The previously mentioned emphasizes the need to make a more detailed analysis between the signals and the detail coefficients (wavelet-based features).

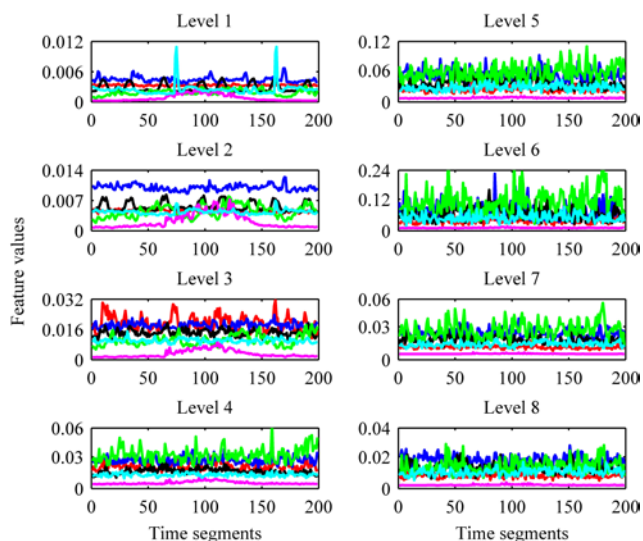


Fig 6. Wavelet-based features generated from the detail coefficients obtained after applying discrete Meyer wavelet to segmented signals and using the decomposition levels from 1 to 8.

In Tables II and III, the numerical values of the feature difference measure are summarized, where indexes in the numerical values represent the level of decomposition from which that specific case is obtained. These differences can be used to consider more closely the relations between particular products. Table II presents the feature differences between the products belonging either to the same class or different classes, where these differences are prominent. On the other hand, Table III presents the feature differences between the products where the differences are rather small when the products belong to the same class, but also when the products belong to different classes.

TABLE II
PROMINENT DIFFERENCES BETWEEN INDUSTRIAL PRODUCT SOUNDS REGARDING THE FEATURE DIFFERENCE MEASURE

Diff.	f	g	s	tc	tt	v
f	0.79 ₁	1.12 ₂	1.15 ₂	1.35 ₇	1.76 ₈	1.01 ₂
g	1.12 ₂	0.86 ₄	1.13 ₁	1.32 ₁	1.84 ₆	1.24 ₄
s	1.15 ₂	1.13 ₁	0.76 ₂	1.31 ₆	1.91 ₆	0.85 ₁
tc	1.35 ₇	1.32 ₁	1.31 ₆	0.84 ₂	1.91 ₇	1.36 ₆
tt	1.76 ₈	1.84 ₆	1.91 ₆	1.91 ₇	1.06 ₅	1.73 ₈
v	1.01 ₂	1.24 ₄	0.85 ₁	1.36 ₆	1.73 ₈	1.03 ₃

TABLE III

SMALL DIFFERENCES BETWEEN INDUSTRIAL PRODUCT SOUNDS REGARDING THE FEATURE DIFFERENCE MEASURE

Diff.	f	g	s	tc	tt	v
f	0.007 ₈	0.005 ₂	0.009 ₃	0.008 ₁	0.24 ₂	0.004 ₅
g	0.005 ₂	0.002 ₂	0.001 ₇	0.005 ₂	0.84 ₃	0.002 ₄
s	0.009 ₃	0.001 ₇	0.001 ₆	0.03 ₂	0.71 ₂	0.001 ₂
tc	0.008 ₁	0.005 ₂	0.03 ₂	0.005 ₇	0.53 ₂	0.001 ₂
tt	0.24 ₂	0.84 ₃	0.71 ₂	0.53 ₂	0.001 ₁	0.5 ₂
v	0.004 ₅	0.002 ₄	0.001 ₂	0.001 ₂	0.5 ₂	0.007 ₈

Analyzing Table II, it can be concluded that the smallest feature difference is obtained within the same class, that is going along the diagonal except for the product valve denoted as “v”, which has slightly smaller values for fan and slider meaning that this feature of the valve is more similar to the feature of those two products - fan and slider. But, in other products, it can be clearly seen that the features are much more similar within the class than between the classes.

The trend seen in Table II can not be seen in Table III where the features differences are rather small independently whether the compared products belong to the same class or different classes. The only exception is the product toytrain that has considerably larger feature differences when the product is compared to other product belonging to other classes. All these trends seen in the feature difference measure are in line with the noticed specific properties of spectra of these products.

Fig. 7 presents the feature differences from Tables II and III in the plot format. Differences having moderate values (called prominent differences) are given by blue curves, while small differences are given by red curves. Here, Fig. 7(b) presents only 6 cases randomly extracted from Tables II and III used to illustrate prominent and small differences between the classes. The values for prominent differences are smaller within the same class, Fig. 7(a) and diagonal elements of Table II, in comparison with the values between the classes, Fig. 7 (b). On the other hand, the values for small differences are rather small independently whether are calculated within the same class or between the classes except for the toytrain as discussed above. The latter shows that the differences of the wavelet-based feature between the classes can be small in some extreme cases representing minority of all cases.

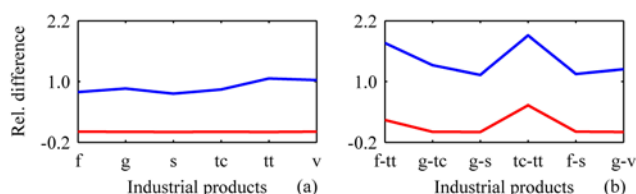


Fig 7. Differences between wavelet-based features (values of the feature difference measure): (a) prominent (blue) and small (red) differences between signals from same class, (b) prominent (blue) and small (red) differences between signals from different classes (products).

It is beneficial to look at the differences in the obtained detail coefficients (wavelet-based features) from different

angles. As in all other cases of the wavelet-based features presented here, these features are obtained by applying the discrete Meyer wavelet to each signal segment. Fig. 8 presents prominent differences in the detail coefficients at some decomposition levels between the signals from same class (the same product type). The level of decomposition and class are indicated in the title of each graph, as it is also done for next figures of the same type. The blue curve is related to the first signal (product), while the red curve is related to the second signal (product). The presented differences are obvious, like the ones given in Table II.

A rather specific situation is presented for the toy car in Fig. 8, where the detail coefficients of these two toy car signals differ in a part of the segments (part of the signal), while this is not the case in the rest of the segments (rest of the signal) where the differences are negligible.

The opposite case is given in Fig. 9 presenting the negligible differences between the detail coefficients obtained from the signals belonging to the same class (the same type of industrial product). This figure can be used as a graphical confirmation of the results listed in Table III.

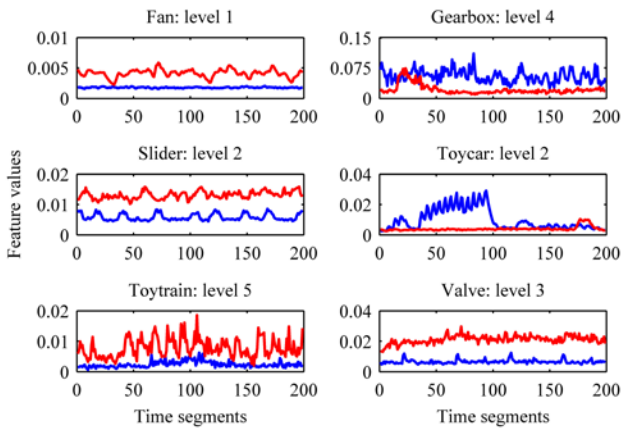


Fig 8. Wavelet-based features generated from the detail coefficients after applying discrete Meyer wavelet to segmented signals obtained for signals from the same class (type of industrial product); the case where the differences are obvious.

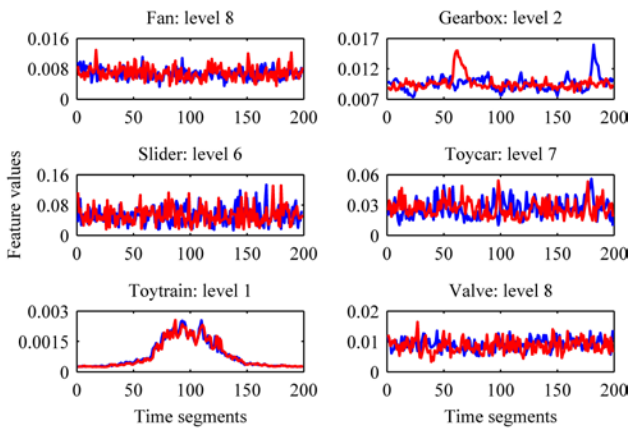


Fig 9. Wavelet-based features generated from the detail coefficients after applying discrete Meyer wavelet to segmented signals obtained for signals from the same class (type of industrial product); the case where the differences are negligible.

Fig. 10 presents some illustrative examples of the wavelet-based features - detail coefficients at particular levels of decomposition where the differences between the signals from different classes (types of industrial products) are obvious. Those differences are rather prominent, and they are greater than differences seen between the products belonging to the same class. Smaller differences between the detail coefficients (wavelet-based features) for signals from different classes (types of industrial products groups) are shown in Fig. 11. The found differences could not be considered to be negligible. They are smaller than those given in Fig. 10, but greater than those given in Fig. 9. What is also worth mentioning is that these wavelet-based features have some specific behavior along the time axis. For some of the classes (product types), such as the toy train and toy car, it is not an easy task to find small differences between the wavelet-based features. These signals are not as stationary in time as other signals, and this is why their wavelet-based features show significant fluctuations of values along the time axis, that is, going through the segments.

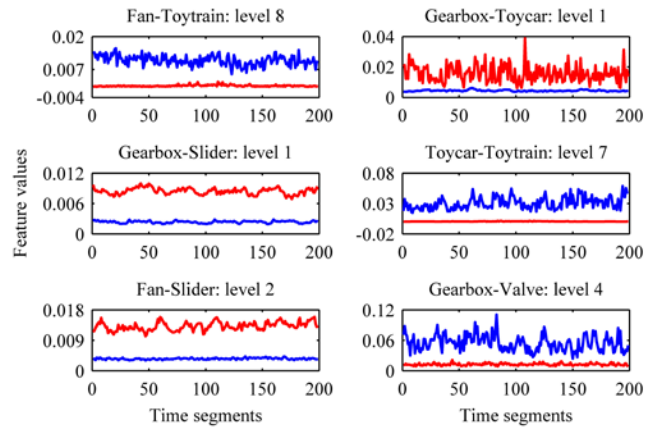


Fig 10. Wavelet-based features generated from the detail coefficients after applying discrete Meyer wavelet to segmented signals obtained for signals from different classes (types of industrial products) (extracted illustrative examples); the case where the differences are obvious.

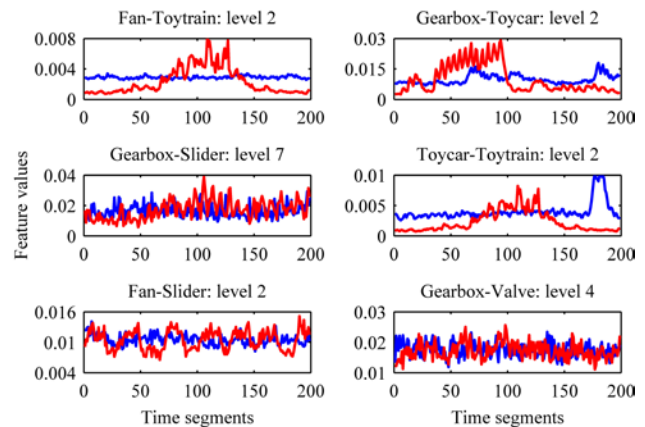


Fig 11. Wavelet-based features generated from the detail coefficients after applying discrete Meyer wavelet to segmented signals obtained for signals from different classes (types of industrial products) (extracted illustrative examples); the case where the differences are small.

Analyzing Figs. from 8 to 11, it can be concluded that the presented prominent differences between the wavelet-based features are related to the cases when the feature curves differ from each other, while the negligible differences are related to the cases where the feature curves are overlapped (or close to each other) in the majority of time segments.

V. CONCLUSION

Wavelets represents a technique that is more and more popular nowadays in diverse application including audio feature extraction. Since there are a number of different wavelet families, it is a rather difficult task to select the most appropriate one for a particular purpose. This paper presents usage of the discrete Meyer wavelet in signal decomposition to approximation and detail coefficients, where the latter are used as the wavelet-based features. The goal is to get relevant audio features able to provide a large enough distinction among industrial products based on sound they generate.

More than 100 sound samples of industrial products (machines) belonging to six different classes are used in this study. The decomposition of every sound using the discrete Meyer wavelet goes from level 1 to level 8. All signals are first segmented, where the overlap between two segments is 50% of the segment length.

In this phase of the research, only manual numerical and graphical analysis is performed. The results show that the detail coefficients used as a wavelet-based feature provide a significant difference between the classes (types of industrial products) in majority of cases. Certain differences exist even between the sound samples from the same class, but typically they are smaller than the ones between the classes. Some illustrative examples showing small differences both within the same class and between different classes are identified and presented. This confirms that even when different industrial products are analyzed, it is possible to get very similar characteristics in the time and frequency domain, but also in the domain of audio features (in this case wavelet-based feature). This is why a more detailed analysis of statistics of the extracted wavelet-based features will be done in the next phase of the research.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (the results are parts of the Grant No. 451-03-68/2022-14/200132 with University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences Čačak and University of Niš - Faculty of Electronic Engineering) as well as by the Science Fund of the Republic of Serbia, 6527104, AI-Com-in-AI.

REFERENCES

[1] M. Sifuzzaman, M. R. Islam, M. Z. Ali, "Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform", *Journal of Physical Sciences*, vol. 13, pp. 121-134, 2009.

[2] R.J.E. Merry, "Wavelet Theory and Applications: a literature study", Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, June 7, 2005.

[3] S. Berry, "Practical wavelet signal processing for automated testing", AUTOTESTCON, International Automatic Testing Conference, pp. 653-660, San Antonio, TX, USA, 30 Aug.-2 Sept. 1999.

[4] B. Ergen, "Signal and image denoising using wavelet transform", Chapter 21 in: *Advances in wavelet theory and their applications in engineering. Physics and Technology, In-Tech* (2012), pp. 495-515.

[5] Đ. M. Damjanović, D. G. Ćirić, B. B. Predić, "De-Noising of a Room Impulse Response by Applying Wavelets", *Acta Acustica United With Acustica, Journal of the European Acoustics Association (EAA) - International Journal on Acoustics*, Vol. 104, No. 3, pp. 452 - 463, May/June 2018.

[6] G. Kaushik, H.P. Sinha, L. Dewan, "Biomedical signals analysis by dwt signal denoising with neural networks", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 62, No.1, pp. 184 - 198, 10th April 2014.

[7] Đ. Damjanović, D. Ćirić, Z. Perić, "Analysis of DC Motor Sounds Using Wavelet-Based Features", *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering "(Ic)ETLAN 2019"*, Srebrno jezero, ISBN 978-86-7466-785-9, pp. 17-22, Serbia, June 3 - 6, 2019.

[8] Đ. Damjanović, D. Ćirić, M. Miletić, D. Vujičić, "Usage of Different Wavelet Families in DC Motor Sounds Feature Analysis", *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering "(Ic)ETLAN 2020"*, Belgrade, Niš, Novi Sad and Čačak, Serbia, pp. AKI 1.2.1-1.2.6., September 28 - 30, 2020.

[9] Đ. Damjanović, D. Ćirić, Z. Perić, "Wavelet-Based Audio Features of DC Motor Sound", *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics*, vol. 34, no. 1, pp. 71-88, March 2021.

[10] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi, *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB, COPYRIGHT 1997-2019 by The MathWorks, Inc.*

[11] D. Radunović, *Wavelets - from Math to Practice*, Belgrade, Serbia: Springer with Academic Mind, 2009.

[12] IEEE AASP Challenge on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) 2021 (Task2): <https://dcase.community/challenge2021/index>.

[13] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, Elsevier Inc., October 9, 2008.

[14] V. V. Valenzuela, H. M. de Oliveira, "Close expressions for Meyer Wavelet and Scale Function", XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicacoes SBRT 2015, January 2015.

[15] T. Xudong, L. Xinyuan, D. Yiqing, L. Jianru, "Design of Orthonormal Filter Banks based on Meyer Wavelet", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, Vol. 6, No. 7, 2015.

[16] M. C. Sezgin, B. Günsel, G. K. Kurt, "Perceptual audio features for emotion detection", *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, No. 16, pp. 1-21, 2012.

[17] A. Glowacz, "Diagnostics of direct current machine based on analysis of acoustic signals with the use of symlet wavelet transform and modified classifier based on words", *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, vol. 16, no. 4, pp. 554-558, 2014.

[18] A. Glowacz, "DC Motor Fault Analysis with the Use of Acoustic Signals, Coiflet Wavelet Transform, and K-Nearest Neighbor Classifier", *Archives of Acoustics*, vol. 40, no. 3, pp. 321-327, 2015.

[19] The MathWorks, Inc., "Wavelet filters". [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wfilters.html>

[20] G. Tzanetakis, G. Essl, P. Cook, "Audio Analysis using the Discrete Wavelet Transform", In *Proceedings of the WSES International Conference Acoustics and Music: Theory and Applications (AMTA 2001)*, pp. 318-323, Skiathos, Greece, January 2001.

[21] Y. Shi, G. Wang, J. Niu, Q. Zhang, M. Cai, B. Sun, D. Wang, M. Xue, X. D. Zhang, "Classification of Sputum Sounds Using Artificial Neural Network and Wavelet Transform", *International Journal of Biological Sciences*, vol. 14, Issue 8, pp. 938-945, 2018.

Multidisciplinarnost u istraživanju slike i zvuka u sakralnom prostoru

Jelena Erdeljan, Ljubica Vinulović

Apstrakt— Multidisciplinarnost u istraživanju studija vizuelne kulture u poslednje dve decenije imala je ključnu ulogu. Kombinovanje metoda različitih naučnih oblasti poput istorije umetnosti, etnologije, istorije liturgike, muzikologije, digitalnih tehnologija i inženjerstva, posebno inženjera akustike doprinelo je potpunijem razumevanju odnosa koji su zvuk i slika imali u oblikovanju sakralnog prostora srednjovekovne crkve. Knjiga Bisere Penčeve *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, pruža podatke o višegodišnjim istraživanjima odnosa slike i zvuka i njihovoj ulozi u rekreaciji autentičnog srednjovekovnog akustičnog ambijenta.

Ključne reči—multidisciplinarnost; slika; zvuk; sakralni prostor; vizuelna kultura, auralnost

I. UVOD

Novija istraživanja vizuelne kulture tj. slike (*imago*), prevazilaze tradicionalne okvire ikonografskih pa i ikonoloških studija, koje su, izvesno, značajno doprinele njenom proučavanju. Ona danas uključuju široki opseg materijala koji se proučava kao što su predmeti vizuelne kulture, efemerni spektakli, film, televizija, opera, pozorište, multimedijalne instalacije, video igre, a oslanjaju se na metode i istraživačke postupke velikog broja disciplina – od istorije umetnosti preko studija kulture, performativnosti, do muzikologije i etnomuzikologije, te psihologije muzike i kognitivnih neuro-nauka.

Knjiga profesorke Bisere Penčeve, profesorke istorije vizantijske umetnosti sa univerziteta Stenford (SAD), *Ikone zvuka* (u originalu *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*), predstavlja zbornik tekstova od izuzetnog značaja za proučavanje performativnosti tj. odnosa između slike i zvuka u sakralnom prostoru srednjovekovne crkve [1]. Eseji autora govore o višegodišnjim istraživanjima u okviru projekta profesorke Penčeve koji ona vodi od 2008. godine na Stenford Univerzitetu. Ključ istraživanja odnosa i slike i zvuka leži u multidisciplinarnom i interdisciplinarnom pristupu. Na projektu je okupljen tim vodećih stručnjaka iz različitih naučnih oblasti kao što su istorija umetnosti, etnologija, istorija liturgike, muzikologija, digitalne tehnologije i inženjerstvo, a posebno inženjeri koji se bave pitanjem akustike [2]. Njihova zajednička istraživanja

Jelena Erdeljan – Odeljenje za istoriju umetnosti, Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18–20, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: jerdelja@f.bg.ac.rs).

Ljubica Vinulović – Odeljenje za istoriju umetnosti, Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18–20, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: ljvinulovic91@gmail.com).

doprinela su formiranju krajnjeg cilja projekta a to je kako umetnost i slika postaje oživotvorena putem zvuka i glasa. Merenja zvuka u crkvi Svete Sofije u Carigradu doprinela su jasnijem razumevanju na koji način se zvuk kretao kroz prostor crkve i kako se u vidu „vodopada“ odbijao od pojedinih tačaka u crkvi, na koji način je to oživljavalo mozaike i ono što je najvažnije, kako je to sadejstvo slike i zvuka imalo uticaj na doživljaj vernika [3]. Istraživanja na ovom projektu pokazala su da je putem zvuka slika prestajala da bude dvodimenzionalna i da je oživljavala pred očima vernika. Angažovanje profesionalnog hora Kapela Romana čiji su pojci pojali iz originalnih sačuvanih srednjovekovnih notnih zapisa omogućilo je ovom timu stručnjaka da rekreira autentičan akustični ambijent srednjovekovnih sakralnih prostora, pre svega sakralnog prostora Svete Sofije. Današnja dostignuća digitalne tehnologije omogućila su da se izvođenje liturgije i različitih službi službenih na originalnom grčkom jeziku snimi i postavi na youtube kako bi se ljudi mogli da osete deo autentične srednjovekovna atmosfere [4]. Istraživanja predstavljena u radovima obuhvataju izuzetno veliku geografsku širinu, od srednjovekovne Francuske, Španije i Italije do Vizantije i Jermenije. Hronološki raspon obuhvaćen u radovima je od 9. do 16. veka.

II. METOD

Metodologija studije vizuelne kulture kombinovana je sa metodologijom studija muzikologije, istorije liturgike, etnologije i inženjeringa s obzirom na to da su njihovi rezultati a posebno rezultati muzikologije i inženjeriga opipljivi i empirijski ih je moguće izmeriti i zabeležiti [1]. Rezultati obrađeni u okviru ove knjige su čistoća zvuka, rasipanje zvučne energije, jačina zvuka i njegova reverberacija. Merenje, prikupljanje i obrada ovih podataka omogućilo je kreiranje akustičnog modela odabranih sakralnih prostora i stvaranje njihove auralne atmosfere, kao što je to slučaj sa Svetom Sofijom. Ova istraživanja omogućena su upravo uključivanjem hora Kapela Romana koji je pojava određene originalne srednjovekovne službe od kojih su neke od njih posebno pisane za Svetu Sofiju. Merenja su vršena tokom njihovog pojanja i istraživači su mogli da utvrde kojom brzinom zvuk putuje kroz prostor crkve, koja mu je jačina u određenim tačkama prostora kao i koliko traje reverberacija [3]. Ovakva istraživanja nisu mogla da budu obavljena bez uključivanja inženjera čija je uska specijalnost akustika. Njihova istraživanja spojena sa vizuelnom kulturom su istoričari umetnosti, muzikolozi i istoričari liturgike stavili u

kontekst i dali su im interpretaciju kako bi rekonstruisali i oživeli prošlost.

III. GLAVNI REZULTATI

Knjiga je podeljena na tri „neopipljiva“ aspekta koji su međusobno povezani. To su liturgijski glas (liturgijsko pojanje), zvučni identitet prostora i reverberacija. Ova tri aspekta zajedno čine auralnu dimenziju sakralnog prostora koja komunicira sa slikama na zidu [2]. Tehnička merenja jačine zvuka i njegove reverberacije omogućila su da se rekonstruiše autentična atmosfera srednjovekovnih sakralnih prostora. Digitalni zapisi omogućili su da se ljudi bliže upoznaju sa akustikom srednjovekovnih prostora od kojih je danas veliki broj „gluv“ prostor s obzirom na to da se tu više ne vrše službe ili su oni pretvoreni u muzeje ili džamije kao što je to danas slučaj sa velikim brojem vizantijskih crkava. Sva istraživanja povezana su sa krajnjom svrhom liturgijskog pojanja i slika svete istorije u crkvi, a to je spasenje kroz realno Božije prisustvo koje se ogleda upravo u zvuku i slici. U ovom doživljaju su pored čula sluha, ogromnu ulogu imala i druga ljudska čula kao i ljudska psiha i moć imaginacije. Nekoliko radova fokusirano je na sferu imaginalnog i taktilnog, kao ključne aspekte za rekonstrukciju korelacije zvuka i slike a u cilju da se spasenje definiše u pojmu auralnosti koji omogućava da se Bog čuje [2].

Kroz radove se istražuje odnos između zvuka, umetnosti i arhitekture i njihovi zajednički uticaj na ljudsku imaginaciju i doživljaj sakralnog prostora [1,5]. Ključno pitanje ovih radova je koju je ulogu zvuk imao u pojanju u sakralnom prostoru i njegovom oblikovanju kao i u percepciji metafizičkog i aktiviranju veze između fizičke slike i imaginacije. Još od vremena autora iz ranog srednjeg veka kao što je Sveti Benedikt hor monaha koji poje predstavljao je odraz hora anđela. Pojanje u okviru sakralnog prostora simbolise prisustvo anđela kao i Boga koji prebiva u okviru crkve ili manastira. Na ovaj način su vernici istovremeno slušajući pojanje i gledajući slike ostvarivali kontakt sa Bogom.

Francisko Prado-Vilar jedan od autora posebno se u svom radu fokusirao na moć imaginacije i ulogu koji zvuk kako imaginarni tako i realni ima u tome [6]. Predmet njegovog istraživanja je takozvani Porta Francigena, severni portal hodočasničke crkve Santijago de Kompostela koji se nalazi u Galiciji na severu današnje Španije. Ova crkva u kojoj se čuvaju mošti Svetog Jakova Zavedejeva jednog od dvanaest Hristovih učenika u srednjem veku je pored Jerusalima i Rima predstavljao jednu od najvažnijih hodočasničkih tačaka i krajnji cilj hodočasnika na zapadu. Svoju pažnju je posebno fokusirao na mermerni stub. Na njemu su u vidu friza duž celog stuba u nekoliko registra predstavljene scene iz Odiseje. U pitanju je antička scena *Nostos* koja priča priču o Odisejevom povratku kući na rodnu Itaku i poteškoćama koje su zadesile Odiseja i njegovu posadu tokom putovanja. Na stubu je posebno istaknut Odisejev susret sa sirenama i morskim nemanima Scilom i Haribdom na uzburkanom moru. Stub je nekada činio sastavni deo severnog portala koji je

predstavljao glavni ulaz za hodočasnike koji su dolazili na poklonjenje moštima Svetog Jakova. Predstave sa stuba komunicirale su sa scenama koje su se nalazile na timpanonu portala. To su Stvaranje Adama i Adamov izgon iz Raja kao i Blagovesti Bogorodici. Autor posebno ističe moć taktilnog u ljudskoj imaginaciji, s obzirom na to da su hodočasnici mogli da dodirnu stub i uzborkane talase mora koji su isklesani na njemu i na taj način da evociraju šum i miris mora. U tome im je mnogo pomagao prirodni ambijent i prirodni zvukovi jer se sama crkva nalazi na obali Atlantskog okeana. Realni šum i miris okeana bili su okidači za kontemplaciju vernika pred ovim portalom na kojem je noseća tema putovanje kući, koje u hrišćanskoj interpretaciji predstavlja putovanje čoveka u porazi za iskupljenjem čoveka, njegovo pomirenje i susret sa Bogom i povratak u Raj. U rekreaciji ovog susreta čoveka i Boga ključnu ulogu imao je zvuk vode, kiše i vetra koji je oživljavao Božiji glas i njegovo realno prisustvo u scenama na portalu. Ljudska čula zajedno sa slikom i zvukom kako prirodnim tako i imaginarnim oblikuje sakralni prostor u kojem se pred očima vernika prepliću realno i metafizičko.

IV. ZAKLJUČAK

Uloga zvuka imala je ključnu ulogu u aktivaciji slike kreirajući na taj način sakralnu dramu u kojoj su uslugu imali pojci, svećenici, slike na zidovima crkava i vernici koji su prosustvovali liturgiji i drugim sakralnim obredima za koje su pisane posebne službe. Odnos zvuka, slike i osvetljenja oživljavao je sakralni prostor u kojem prebiva Bog i Božija sila. Zvučna atmosfera srednjovekovnih crkava stvaranja je kroz pojanje i molitve. Slike i osvetljenje prostora predstavljale su neizostavni deo ove atmosfere. Tokom merenja utvrđeno je da su se određeni tonovi sa određenim slogovima odbijali od određenih tačaka na mozaicima ili freskama [3]. Na ovaj način su dodatno davali život ovim slikama. U sadejstvu zvuka sa osvetljenjem stvaran je pokret i tako su vernici pred svojim očima videli žive, oživotvorene svetitelje i postajali su realni svedoci svete istorije koja je predstavljena na zidovima crkve u vidu mozaika ili fresaka. Ova međusobna povezanost zvuka, slike i osvetljenja predstavlja štimung jednog sakralnog prostora.

LITERATURA

- [1] B. V. Pentcheva, *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, 1th ed. New York, NY: Routl, 2021.
- [2] B. V. Pentcheva, *Aural Architecture in Byzantium: Music, Acoustic, and Ritual*, 1th ed. New York, NY: Routl, 2018.
- [3] B. V. Pencheva, "The Glittering Sound of Hagia Sophia and Feast of the Ecalation of the Cross in Constantinople," in *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, ch. 3, pp. 52–100, New York, NY: Routl, 2021.
- [4] F. Prado-Vilar, "The Marble Tempest: Material Imagination, the Echoes of Nostos, and the Transfiguration of Myth in Romanesque Sculpture", in *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, ch. 7, pp. 152–205, New York, NY: Routl, 2021.

- [5] B. V. Pencheva, "Introduction," in *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, pp. 1–18, New York, NY: Routl, 2021.
- [6] D. Howard, "Sound, Space, and the Sensory Perception: The Eastern Mass in the Liturgy of San Marco, Venice," in *Icons of Sound: Voice, Architecture, and Imagination in Medieval Art*, ch. 6, pp. 135–151, New York, NY: Routl, 2021.

acoustical engineering, has contributed to a more encompassing understanding of the relation between image and sound in the shaping of the sacral space of medieval churches. The volume *Icons of Sound Voice, Architecture and Imagination in Medieval Art* edited by Bissera Pentcheva offers insight into years of research in the field of correlation between image and sound and their role in the process of recreating authentic medieval acoustical (aural) ambiances and bringing the past back to the present.

ABSTRACT

The multidisciplinary approach to the research in the field of study of visual culture has been prevalent over the last two decades. A combination of methods of various fields of research such as art history, ethnology, liturgical history, musicology, digital technologies and engineering, and in particular electrical and

Multidisciplinary approach in the study of image and sound in sacral space

Jelena Erdeljan and Ljubica Vinulović

Auralizacija sakralnih prostora i likovni programi: nove perspektive i mogućnosti istraživanja

Vuk Dautović, Jakov Đorđević

Apstrakt—Doživljaj prisustva svetosti bio je gotovo pretpostavljeno čulno iskustvo za srednjovekovne ljude. Poslednjih decenija istraživanja uloge svetla, mirisa i performativnih aspekata likovnih programa u dočaravanju prisustva svetosti unutar srednjovekovnih crkava omogućila su nove perspektive u razumevanju sakralne vizuelne kulture. Interdisciplinarna grupa naučnika okupljena oko projekta *Soundscapes of Byzantium* doprinela je jasnijem uvidu o važnosti zvuka kada je reč o oblikovanju vizantijskih sakralnih prostora istraživanjem auralizacije osam crkava u Solunu. Ne samo da je potvrđeno kako su promene u arhitekturi i likovnim programima išle paralelno sa promenama u bogoslužjenju i pojanju već je utvrđena i veza između likovnih programa i akustičkih karakteristika crkava.

Ključne reči—auralizacija; sakralni prostor; obred; likovni program; multidisciplinarnost; zvučna slika.

I. UVOD

Positivistička podela na jasno definisane i kruto odvojene discipline odavno se pokazala nedovoljnom za sticanje saznanja iza kojih stoje složenija pitanja o ljudskoj prirodi, kreativnom delovanju i svetu imaginarnog. Pristup svetosti i doživljaj svetog već decenijama privlače pažnju naučnika koji nominalno ne pripadu isključivo krugu antropologa. Tako se istorija religioznog slikarstva pomerila od jednostavnog objašnjenja likovnih izvedbi njihovim svođenjem na „Bibliju za nepismene“, a istorija arhitekture sakralnih zdanja od potrebe za hronološkim praćenjem promena arhitektonskih formi kvalitativno okarakterisanih kroz prizmu napretka i stagnacije. Štaviše, kada je konkretno reč o crkvama, istraživanja poslednjih godina donose sve više rezultata koji opravdavaju novu perspektivu njihovog posmatranja kao multimedijalnih instalacija. Pored osnovne funkcije pružanja mesta kolektivne molitve, crkve su podizane i oblikovane sa namerom da vernicima obezbede manifestaciju prisustva svetosti i čulno učešće u njoj.

Grupa naučnika okupljena na projektu *Soundscapes of Byzantium*, imajući u vidu da glas predstavlja osnovno sredstvo molitve, postavila je kao svoj osnovni predmet istraživanja ulogu zvuka u kreiranju sakralnih prostora Vizantijskog carstva. Ovaj interdisciplinarni tim predvođen

Vuk Dautović – Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18-20, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: vukdau@gmail.com).

Jakov Đorđević – Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18-20, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: jakovdj@gmail.com).

Šeron Gerstel (profesorka vizantijske umetnosti i arheologije na Univerzitetu u Kaliforniji, Los Angeles) i Krisom Kiriakakisom (direktor Imersivne audio laboratorije na Univerzitetu Južne Kalifornije) odabrao je osam srednjovekovnih crkava u Solunu kao polaznu tačku svog ispitivanja [1]. Budići da je reč o gradu sa drevnom istorijom koji i danas čuva mesta hrišćanske molitve još od kasnoantičkog razdoblja, Solun je pružio priliku za analizu akustičkih svojstava crkava različitih perioda hiljadugodišnjeg carstva, a time i razmatanje nove pretpostavke uslovljenosti promena u arhitekturi i slikarstvu uvođenjem novina u crvenom bogoslužjenju i stilu pojanja [1, 2].

II. PRISTUP ISTRAŽIVANJU

Istraživanje sprovedeno u okviru projekta *Soundscapes of Byzantium* počiva na merenju impulsnih odziva na različitim mestima unutar crkava. Odabir odgovarajućih pozicija za izvore zvuka i mikrofone za snimanje određivan je na osnovu nekoliko kriterijuma: 1) položaju specifičnih arhitektonskih formi koje potvrđeno doprinose oblikovanju posebnih akustičkih efekata; 2) pozicijama određenih likovnih predstava koje nagoveštavaju vezu sa crkvenim pojanjem; 3) mestima koja su posebno izdvojena u vizantijskim bogoslužbenim knjigama kao tačke odigravanja specifičnih obrednih radnji. Kako bi se postigla što objektivnija kvalifikacija, merenja su ponavljana svakog dana u isto vreme, obraćajući pažnju na eventualne promene prouzrokovane različitim temperaturama i vlažnošću prostora. Sprovedena analiza dobijenih podataka omogućila je razmatranje auralne atmosfere svake sakralne građevine ponaosob, ali i komparativno sagledavanje svih osam solunskih crkva. Takođe je pridata pažnja utvrđivanju čistoće zvuka i varijacijama koje uvodi izgovorena reč u odnosu na otpevan ton, kao i razlikama koje donosi izvedba soliste nasuprot horskom pevanju. Budući da je reč o pokušaju rekreiranja originalne estetike zvučne slike i njene sinergije sa likovnim programom i arhitektonskim karakteristikama prostora, psihoakustička razmatranja predstavljala su kranji cilj analize. Prikupljeni podaci upoređeni su sa opservacijama pojaca angažovanih na projektu baš kao i pažljivo pozicioniranih slušalaca. Najzad, empirijsko sagledavanje i pojedinačne impresije omogućile su novu perspektivu za preispitivanje opisa akustičkih doživljaja zabeleženih u vizantijskim izvorima [1-3].

Ovim merenjima prethodila su jasno formulisana metodološka stanovišta koja su na teorijskom planu pripremila i uporedila različita znanja o shvatanju zvuka i njegovoj ulozi u oblikovanju verske stvarnosti. Pošavši od premise da je savremeni čovek izložen brojnim auditivnim doživljajima i da su muzika i zvuk prisutniji od tišine, za razliku od čoveka vizantijskog doba koji se sa muzikom i pevanjem u najveličajnijem vidu mogao sresti tokom bogoslužjenja u samim crkvama ali i tokom molitvenih procesija koje su hristijanizovale spoljni prostor, te tokom kojih su svi senzorni aspekti bili jednako važni, udruživši vizuelnost, auditivno i olfaktorno u performativnom činu krsnog hoda ili litije. Konačno sama crkva shvaćena je kao muzički instrument odnosno „rezonantna kutija“ koja zvuku kroz svoja akustička svojstva daje konačan pečat [3, 5].

Teorijsko poznavanje tumačenja auditivnog, pre svega teoloških spisa i patristike istočne crkve uporedo je posmatrano sa akustičkim mogućnostima solunskih crkava shvatanih kao odraz „nebesa na zemlji“. Upravo je veza sa mističnom teologijom istočne crkve i poznavanje angelologije kao teološke discipline koja se bavi karakterom i prirodom bestelesnih nebesnih sila u fokus stavila zvuk kao neposredni emanator nevidljivog sveta, što potvrđuju brojni istorijski izvori. Važna ideja na kojoj počiva recepcija zvuka bogoslužjenja jeste učenje po kome se nebeska i zemaljska liturgija odvijaju istovremeno i jedinstveno na beskonačnom broju oltara. Pisanje savremenika, Solun XIV veka opisuje kao „još jedno nebo“, što je značajna polazišna osnova pri tumačenju akustičkih osobnosti njegovih hramova. Izvođenje crkvenih himni svetiteljima i pevanje psalama, karakteristični za svakodnevicu srednjevekovnog razdoblja pružali su u javnim manifestacijama pobožnosti priliku za „kolektivan emocionalni odušak“ naročito vezano za praznike povezane sa Hristovim Vaskrsenjem, te su glasnost i jauci jednako oblikovali auditivni svet medijskih ljudi. U tom smislu i sam grad koji je mogao biti prepešačen u vremensmom okviru od 45 minuta postaje svojevrstan muzički instrument ili rezonator u njemu proizvedenog kolektivnog zvuka [3].

Znanja o vizantijskoj liturgici, i sve promene koje se tiču poretka molitava i pesama koje se tokom bogoslužjenja izvode jesu od značaja za šire tumačenje povezanosti likovnih programa i vizuelizacije izvođenja crkvenih pesama ili još detaljnije pojedinih trenutaka u liturgiji na njima prikazanih. Upravo je smeštanje određenih molitava poput *Trisvete pesme* u izabrani segment unutar sakralne topografije hrama stvaralo mogućnost da kroz načine komponovanja ali i akustička svojstva odbijanja zvuka efekte udvojenih glasova ili „andeoskih horova“ [3, 5].

Naglašavanje muzike i auditivnog bilo je postignuto kreiranjem paralelnih narativnih scena u kojima su anđeli obučeni poput đakona sa ripidima i svicima izvodili određene molitve bivajući veza sa mističnom stvarnošću koja verniku iznova nudi „multimedijalni“ doživljaj bogoslužjenja. Ovakve slike javljaju se u brojnim umetničkim medijima od veza preko bogoslužbenih predmeta od metala i sveth slika, pojačavajući značaj vizuelno-auditivnog polja. Pomenuta uporišta u kulturno istorijskoj praksi vizantijskog sveta,

hmnografiji, liturgici te istoriji muzike i istoriji vizantijske umetnosti stavljena su u službu posmatranja crkvenog prostora kao akustičkog sistema koji prima glas kao zvučni impuls emitujuću zvuk koji je modifikovan akustičkim svojstvima same građevine. Upravo je kroz multidisciplinarnost ove vrste izvršena demonstracija načina na koje društveno-humanističke i tehničke nauke mogu doprineti polju episteme otvarajući unutar njega nove perspektive.

III. NOVE PERSPEKTIVE

Uvođenje sve većeg broja svetiteljskih figura sa svitcima na kojima se čitaju odlomci stihova crkvene poezije, baš kao i pojava doslovne vizualizacije sastava crkvenog pesništva u vidu složenih kompozicionih rešenja i ciklusa, samo su neke od karakteristika oblikovanja likovnih programa crkava kasnijih epoha Vizantijskog carstva. Navedene predstave sa svojim naslikanim tekstovima neretko su korišćene za obeležavanje posebno važnih obrednih tačaka u hramu sa ciljem definisanja emocionalnog iskustva vernika koji prisustvuje službi. Gotovo dramski iscenirani prizori često su praćeni rečima zahvalnosti, tugovanja, radosti ili strahopoštovanja i njihovim čitanjem vernik bi ih prisvajao postajući učesnik u ritualnom rekreiranju događaja iz svete istorije prilikom liturgije. Monumentalna kompozicija Oplakivanja Hrista u crkvi Svetog Pantelejmona u Nerezima brižljivo dočarava ekspresije bola na licima aktera scene, podstičući empatiju posmatrača. Sa druge strane, figure svetih himnografa pod freskom drže u rukama poetske sastave čije čitanje ne samo da nagoveštava teološke premise ovog događaja već verbalizuje i poželjne emocionalne odgovore vernika. Međutim, budući da je reč o performativnim tekstovima, odnosno onima koji su čitani ili pevani naglas makar jednom u toku liturgijske godine, ispisane reči bile bi animirane glasom. Predstave svetih himnografa u crkvi u Nerezima nalaze se u severnoj pevnici i bile su delimično zaklonjene grupom pojaca koji su sa tog mesta pevali za vreme službe, uznoseći stihove svitaka u molitvenoj pesmi [4]. U paraklisu Hrista Hore u Carigradu, funerarnoj kapeli namenjenoj čuvanju uspomene na tu sahranjene preminule, zapadni travej nosi kupolu sa pandantifima na kojima su prikazani sveti sastavljači stihova čitanih prilikom komemorativnih službi [4]. Reči njihovih svitaka mogle su da se čuju prilikom izvedbe navedenih obreda. Stoga, likovni programi vizantijski crkava mogli su da ukažu na konkretne prostorne tačke namenjene izvedbi pojanja, ali i na prirodu molitve, „režirajući“ pozicije okupljenih kao i njihov duhovni doživljaj [4, 5].

Kada je reč o „animiranju“ naslikanih figura, zanimljivo ispitivanje proizašlo je iz akustičke analize u crkvi Svetog Nikole Orfanosa u Solunu. Severni krak ophodnog broda originalno je bio zatvoren zidom sa zapadne strane obrazujući zasebnu kapelu prislonjenu uz jezgro crkve. Bogorodičin akatist, likovni ciklus sačinjen od ilustracija stihova himne posvećene Hristovoj majci, nekada je pokrivaio sve zidove kapele izuzev istočnog zida. Danas su kompozicije Akatista

opstale jedino na južnom zidu i to u registru koji teče neposredno iznad dva prolaza u glavnu crkvu – njen oltarski prostor i naos. Kako je reč o vizualizaciji pesničkog sastava, članove tima *Soundscapes of Byzantium* zainteresovao je odnos izvedbe pojaca i slike. Prva analiza bazirana je na ispitivanju akustičkih svojstava prostora na osnovu pojanja u samom severnom kraku ophodnog broda. Činjenica da je nekadašnja kapela izgubila originalni zid sa zapadne strane svakako je doprinela potpunoj promeni prvobitnog akustičkog okruženja i pokazalo se da je „nedostatak rezonancije podjednako nezadovoljavajuć i za pojce i slušaoc“ [4]. Premda je teško utvrditi originalnu zvučnost kapele, eksperiment pozicioniranja jednog pojca okrenutog prema istoku sa zapadne strane oltarske pregrade glavne crkve (mesta sa kojeg bi kretalo pojanje u pojedinim trenucima liturgijske službe), pokazao je da je svakako postojala svest o promišljanju akustičkih svojstava u sprezi sa osmišljavanjem likovnog programa. Istočni prolaz koji povezuje kapelu i crkvu pojačao je jačinu glasa koji je dolazio u kapelu. Na osnovu opisa iskustva prisustva bogoslužnju iz izvora i dosadašnjih istraživanja kontemplativnog stanja monaha pred slikom, ukazala se mogućnost specifične zamisli pri planiranju programa: namera da se stvori utisak kao da pojanje dolazi od naslikanih figura Akatista koje su i prikazane kako pesmom proslavljaju mladog Hrista na prestolu nad lučnim prolazom [4].

Ovakve „zvučne slike“, odnosno predstave koje bi bile animirane glasom, prema istraživanju projekta *Soundscapes of Byzantium*, obeležavale su posebna mesta namenjena okupljanju kongregacije u okviru odgovarajuće službe. Nad ulazom u središnji deo naosa crkve Svetih Apostola u Solunu iz severnog kraka ambulatorijuma, koji je funkcionisao kao kapela Svetog Jovana Krstitelja, naslikana je kompozicija Božićnog tropara. Monumentalna freska obavlja gornji deo lučnog prolaza prikazujući anđele koje se u pesmi spuštaju kroz otvorene nebeske vratnice i monahe koji poju podeljeni u dve grube pri dnu kompozicije (sa obe strane ulaza u naos). Kako su vizantijski pojci bili podeljeni u desnu i levu pevnicu, navedena predstava ne samo da je obeležavala mesto izvedbe službe na božićnom jutrenju, nakon čega bi svi ušli u naos, već je nudila i model okupljenima, poistovećujući posmatrača sa akterima scene. Slika je mogla da se čuje, a glasu je pružana vizija više duhovne stvarnosti gde su nebeske sile saučestvovala u obredu [4, 5].

Projekat *Soundscapes of Byzantium* uložio je posebne napore da razmotri da li je mistično tumačenje liturgije kao zajedničke službe neba i zemlje moglo da bude i doslovno opaženo čulom sluha putem postignutih akustičkih efekata [3]. Kupole, apside i svodovi, pored činjenice da prema stepenovanju svetosti predstavljaju prostore najviše sakralnosti, takođe su pojačavali i usmeravali glasove. Akustička svojstva apside doprinosila su čujnosti glasa sveštenika okrenutog prema istoku, a važnost prostora kupole i kao najrezonantnijeg dela crkve ogleda se u vizantijskim liturgijskim priručnicima koji daju instrukcije da se posebni delovi službe upravo tu odigravaju [5]. Sprovedena akustička merenja na različitim pozicijama unutar solunskih crkava i

psihoakustička razmatranja pružila su nove poglede kada je u pitanju sama percepcija. Zahvaljujući postojanju galerije sa pogledom na naos, crkva Proroka Ilije omogućila je uvud i u razlike prisustva bogoslužnju kada se vernik nalazi na uzvišenom mestu. Utisak da je zvuk na galeriji čistiji i jasniji potvrđen je poređenjem impulsnih odziva. Iz toga proističe da su galerije, budući namenjene osobama višeg dostojanstva, omogućavale, pored neometanog pogleda na naos, i privilegovani položaj za slušanje [1]. Međutim, testiranjem zvuka solunskih crkva uočeni su i posebno zanimljivi akustički obrasci koje su pojci opisali kao prisustvo „betelesnih glasova“ [3]. Prema opisu, čuli su melodijsku liniju za oktavu višu istovremeno sa sopstvenim pojanjem. Zapravo, u akustičkom smislu, ono što su čuli bio je prvi oberton iz niza kao posledicu reverberacije građevine. Zabeležen doživljaj sličan je vizantijskim teološkim opisima zajedničkog služenja liturgije nebeskih sila sa vernicima na zemlji [3].

IV. ZAKLJUČAK

Premda je sagledavanje originalne auralizacije drevnih zdanja otežano zbog njihovih kasnijih prepravki, dogradnji i oštećenja, pri čemu je čest gubitak izvornog materijala sa svojim prirodnim svojstvima reflektovanja i upijanja zvuka ostavio trajne posledice [2, 4], grupa predvođena Šeron Gerstel i Krisom Kiriakakisom donela je veoma važne rezultate i postavila dragocene smernice za buduća istraživanja. Komparativna ispitivanja osam crkava u Solunu potvrdila su visoku svest o važnosti akustike pri oblikovanju sakralnih prostora u Vizantijskom carstvu. Štaviše, promene u planu, obliku i likovnim programima vizantijskih crkava išle su paralelno sa promenama u bogoslužnju i pojanju kao neraskidivi splet koji je trebalo da ostvari multisenzorno iskustvo učešća u svetosti [1, 2]. Nije slučajno da se novi tip pojanja sa mnoštvom ukrasa i težnjom ka apstrakciji pojavio u XIII veku – periodu kada počinju da se slikaju raskošne kompozicije inspirisane crkvenim pesništvo [1, 4, 5]. Projekat *Soundscapes of Byzantium* doneo je važan materijal za dalja komparativna istraživanja crkava na drugim područjima koja bi u budućnosti mogla da daju još detaljniji i dublji uvid u duhovne potrebe, kreativnost i svet imaginarnog srednjovekovnih ljudi, ali i da odrede preciznije karakteristike verske kulture na području Evrope.

LITERATURA

- [1] S. Antonopoulos, S. E. J. Gerstel, C. Kyriakakis, K. T. Raptis, J. Donahue, "Soundscapes of Byzantium," *Speculum*, vol. 92, no. S1, pp. S321-S335, Oct., 2017.
- [2] S. E. J. Gerstel, C. Kyriakakis, K. T. Raptis, S. Antonopoulos, J. Donahue, "Soundscapes of Byzantium: The Acheiropoietos Basilica and the Cathedral of Hagia Sophia in Thessaloniki," *Hesperia*, vol. 87, no. 1, pp. 177-213, Jan.-Mar., 2018.
- [3] S. E. J. Gerstel, C. Kyriakakis, S. Antonopoulos, K. T. Raptis, J. Donahue, "Holy, Holy, Holy: Hearing the Voices of Angels," *Gesta*, vol. 6, no. 1, pp. 31-49, Spr., 2021.
- [4] S. E. J. Gerstel, "Images in Churches in Late Byzantium: Reflections and Directions," in *Visibilité et présence de l'image dans l'espace ecclesial*, ch. 6, pp. 93-120, Paris, France, Édit. de la Sorb., 2019.

- [5] S. E. J. Gerstel, "Monastic Soundspaces: The Art and Act of Chanting," in *Resounding Images Medieval Intersections of Art, Music, and Sound*, ch. 6, pp. 135-152, Turnhout, Belgium, Brep., 2015.

ABSTRACT

The presence of the sacred was experienced by the senses in the Middle Ages. In the last decades, the research on the role of light, smell, and the performative aspects of pictorial programs in evoking the presence of holiness within the medieval churches provided new perspectives in understanding the sacral visual culture. The interdisciplinary group of scientists gathered around the project Soundscapes of Byzantium contributed to better insight into the

importance that sound had in fashioning Byzantine sacred spaces by researching the auralization of the eight churches in Thessaloniki. It is not only attested that changes in architecture went hand in hand with the changes in liturgical rite and chanting but the connection between pictorial programs and acoustical characteristics of the churches has also been shown.

Auralization of sacral spaces and pictorial programs: new perspectives and possibilities of research

Vuk Dautović, Jakov Đorđević

Istraživanje zvučnog ambijenta srpskih sakralnih prostora kao višemedijskog fenomena

Miomir Mijić, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Tatjana Miljković, Filip Pantelić

Apstrakt — Istraživanje zvučnih ambijenata u istorijskom kontekstu iznedrilo je posebnu oblast akustike nazvanu arheoakustika. Pored mnogih značajnih istorijskih objekata, tema takvih istraživanja bile su povremeno i akustičke karakteristike verskih prostora. Sintezom akustičkih, istorijskih i teoloških činjenica o srpskim sakralnim prostorima dolazi se do zaključka da je njihov koncept višemedijska tema u kojoj je zvuk samo jedna, mada važna komponenta. Da bi se dao smisao mogućnostima koje savremena akustička analiza može pružiti u tumačenju sakralnih prostora neophodno je izaći iz okvira fizike i posmatrati sadejstva zvuka sa ostalim korišćenim medijima kao što su slikarstvo, arhitektura, muzika, koreografija, svetlost. Ovaj rad razmatra mesto i ulogu akustike u kontekstu mogućih multidisciplinarnih istraživanja srpskih sakralnih prostora. Fokus se usmerava na nekoliko karakterističnih inženjerskih tema: na korelaciju impulsnih odziva i fizičkih formi sakralnih prostora, na auralizaciju zvučnog polja u njima kako bi se omogućilo izmeštanja istraživanja u laboratorijske uslove, na uticaj akustičkog ambijenta sa pozicije pojaca i sveštenika, kao i na akustičku karakterizaciju šireg fizičkog ambijenta iz kojeg vernici ulaze u domen sakralnog prostora i u koji se iz njega vraćaju.

Ključne reči — akustički ambijent; arheoakustika, crkve, impulsni odziv, sakralni prostor, *stage support*

I. UVOD

Jednom prigodom neko je zanimljivo primetio da je istorija sve do dvadesetog veka zapravo bila nema. Zvuk je oko čoveka oduvek nastajao, ali i nestajao u istom trenutku, ostajući dostupan samo neposredno prisutnim oko mesta gde se javio. Zbog toga se istorijsko proučavanje nužno fokusiralo na artefakte koji traju u vremenu, na građevine, predmete i zapise, dok su zvuci koji su pratili život ljudi, kao i informacije koje su ti zvukovi nosili, ostali trajno nedostupni. Tek sa audiotehnikom, koja se pojavljuje na prelazu iz devetnaestog u dvadeseti vek, i njenim razvojem čovečanstvo i civilizacija počinju da ostavljaju reativno trajne zvučne otiske koji o minulim događajima i ljudskim odnosima svedoče na svoj način i pružaju dodatne informacije [1].

S razvojem novih tehničkih mogućnosti, neumitno se postepeno javilo zanimanje za akustičke fenomene i u istorijskom kontekstu, što je učinilo da se s vremenom izdvoji nova multidisciplinarna oblast nazvana „arheoakustika“. Njena

najšira definicija kaže da se „arheoakustika bavi odnosima između ljudi i zvuka kroz istoriju“ [2]. Ilustrativna je i definicija koja naglašava upravo njenu multidisciplinarnost, i po kojoj se arheoakustika bavi „akustikom na arheološkim lokalitetima u različitim kulturama koristeći i kombinujući u svom pristupu fiziku, antropologiju i arhitekturu“ [3]. U tom kontekstu su i akustičke karakteristike srpskih crkvenih prostora povremeno bivale predmet istraživanja [4-10].

Pregledom naslova publikovanih radova u akustičkoj literaturi saznaje se da je arheoakustika došla u fokus istraživača krajem dvadesetog veka. To se može objasniti činjenicom da poslednje dekadeprošlog veka koincidiraju sa eksplozivnim razvojem računara i raznih softverskih alata od značaj za tu oblast: za simulaciju zvučnog polja, za snimanje i analizu impulsnog odziva prostora, a kasnije i za auralizaciju. Postalo je jednostavno da se za razne istorijski značajne prostore dobije detaljna akustička karakterizacija. Ta mogućnost potoji čak i za prostore koji danas više ne postoje, samo ako su njihova geometrija i materijalizacija dovoljno detaljno dokumentovane.

U obilju danas dostupnih tehničkih mogućnosti nametnula se ideja traganja za širim smislom koju mogu dobiti izmerene ili izračunate akustičke informacije o prostoru, a koje su po pravilu predstavljene „autističnim“ numeričkim podacima. Naime, zvuk se uvek pojavljuje u nekom kontekstu i nosi informacije o tome koje čulo sluha čoveka dekoduje. Zvučne informacije se neumitno povezuju sa ostalim perceptivnim inputima koji se istovremeno stiču u moždanim centrima, pa je doživljaj čovekovog okruženja rezultat multisenzorske percepcije. U takvom kontekstu zvuk pod određenim okolnostima može dobiti jedan širi i složeniji smisao.

Možda najintrigantniji fenomen pojave zvuka javlja se u sakralnim prostorima. Crkvena služba koja se u njima odvija, sa vizuelnim dimenzijama prizora i narativom koji ih prati, tipičan su primer višemedijske forme koja kod ljudi aktivira multisenzorsku percepciju. U sakralnom prostoru zvuk je u sprezi sa drugim primenjenim medijima: slikarstvom, arhitekturom, svetlošću, muzikom, koreografijom. Da je u pitanju višemedijski efekat dokazuje, na primer, jasna razlika između doživljaja pri slušanju snimka nekog pojanja emitovanog s kućnog sistema za reprodukciju zvuka u atmosferi dnevne sobe i slušanja istog pojanja uz fizičko prisustvo službi u nekoj crkvi.

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).

Filip Pantelić – Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija, Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: filipp@viser.edu.rs).

Razlika u doživljaju koja je u navedenom primeru prilično jasna objašnjava fenomen multisenzorske percepcije u sakralnim prostorima. Višemedijsku prirodu pravoslavne crkvene službe istoričari su razmatrali dokazujući da je u tome evidentno združeno dejstvo monumentalnog slikarstva na zidovima, zvuka pojanja i specifičnog akustičkog odziva prostora crkve koji nastaje pri takvoj zvučnoj pobudi [11]. Šaron Gerstel u jednom svom članku konstatuje: "U ovoj maloj crkvi zvuk pojanja, reči koje se izgovaraju i sakralne slike povezane su na neočekivani i sofisticiran način" [12]. Specifične efekte produžene reverberacije i mešanje različitih zvukova koji nastaju u atmosferi crkvene službe neki istoričari su prepoznavali kao „mešanje nebeskih i ljudskih glasova“ [13].

U tehničkom domenu višemedijska priroda crkvene službe može se prepoznati kao najraniji pojavni oblik multimedijalnih događaja. Danas je savremena tehnologija, pogotovo ona najsofisticiranija, u multimedijalnim produkcijama prebacila poentu na tehnički spektakl, a ponekad i na spektakl tehnologije po sebi, ali sâm koncept događaja osmišljenog da podstakne multisenzorsku percepciju očigledno potiče od davnina.

Zvučna dimenzija crkvene službe zasniva se na ljudskom glasu i nekim specifičnim zvukovima koji prate određene radnje kao što su zvukovi posuda sa tamjanom, zvona, klepala. Neki istraživači srednjeg veka ukazuju da su Vizantinci bili pod uticajem zvuka i naglašavaju moguće psihološke dimenzije raznih zvučnih fenomena. U literaturi je zabeležen stav da je prijem zvuka kod publike bio faktor koji je uticao na organizaciju oslikavanja i postavljanje slika tematski povezanih sa pojanjem u određenim zonama crkve [13].

Sa aspekta fiziološke i psihološke akustike čulo sluha čoveka u predmodernom dobu bilo je isto kao i danas. To je suviše kratak vremenski period da bi evolucija unela neke fiziološke promene, što daje za pravo da se zaključuje savremenih istraživanja primene i na tumačenja reakcija ljudi suočenih sa višemedijskim delovanjem sakralnih prostora u srednjem veku. Uprkos postepene promene karaktera zvučnih ambijenata, pre svega značajnom povećanju ukupnog nivoa buke u životnoj sredini nastalom od početka industrijskog doba, čulo sluha je centralno svojstvo ljudskog iskustva danas kao što je bilo i za srednjovekovnog čoveka.

Istraživanje zvučne komponente ambijenta sakralnih prostora ne može se odvojiti od njihove višemedijske prirode. To zahteva postavljanje pravih pitanja koja ne smeju biti rezultat isključivo inženjerskih shvatanja teme. Traganje za odgovorima otvara nekoliko važnih istraživačkih pitanja. Prvo, to je utvrđivanje osnovnih karakteristika akustičkog odziva prostorija koji čine deo sakralnih prostora i njihovog odraza na subjektivni doživljaj slušalaca. Za postojeće prostore do tog saznanja se može doći neposrednim snimanjem impulsnih odziva, a za prostore koji su vremenom devastirani ili potpuno uništeni do toga se može doći metodama simulacije zvučnog polja (ako postoje zapisi sa dovoljno informacija o njihovoj geometriji i materijalizaciji).

Drugo, to je stvaranje baze snimaka onoga što ljudi slušaju tokom službe, snimljenih na različitim mestima u crkvama različitih veličina i formi. Glavni cilj toga je stvaranje mogućnosti da se u laboratorijskim uslovima primenom

auralizacije analizira priroda auditornih doživljaja u okvirima sakralnih prostora.

Treće, postoji izvestan uticaj zvučnog ambijenta na one koji pevaju, sveštenike, pojce i horove. U kontroli njihovog pevanog glasa oni se prilagođavaju onome kako sebe čuju, što zavisi od akustičkog odziva prostora. Povratna sprega koja neumitno postoji upravlja kontrolom glasa, a u ovom slučaju verovatno i na vokalnu interpretaciju.

Najzad, širi obuhvat sakralnih prostora, to jest ambijent u kome se nalaze verski objekti, ima neke svoje akustičke karakteristike. Tokom dolaska ljudi u crkvu one možda imaju ulogu u njihovoj pripremi za kompleksni doživljaj službe, a takođe predstavljaju ono što ih u zvučnom smislu dočekuje nakon završetka službe.

U ovom radu su detaljnije razmatrane četiri opisane istraživačke putanje u arheoakustičkom pristupu sakralnim prostorima i njihove veze sa tangentnim naučnim oblastima u kojim se analiziraju iste teme.

II. IMULSNI ODZIVI SAKRALNIH PROSTORA

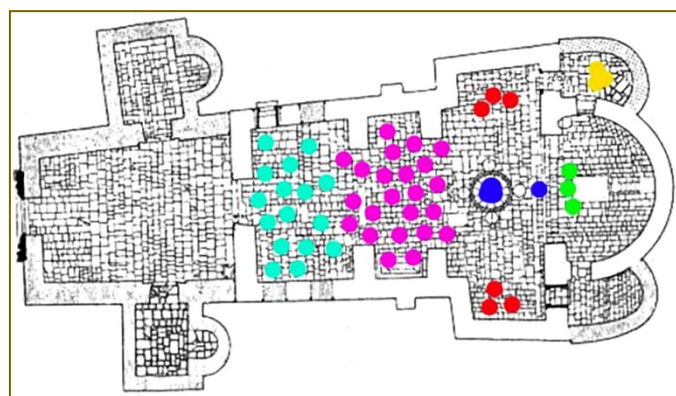
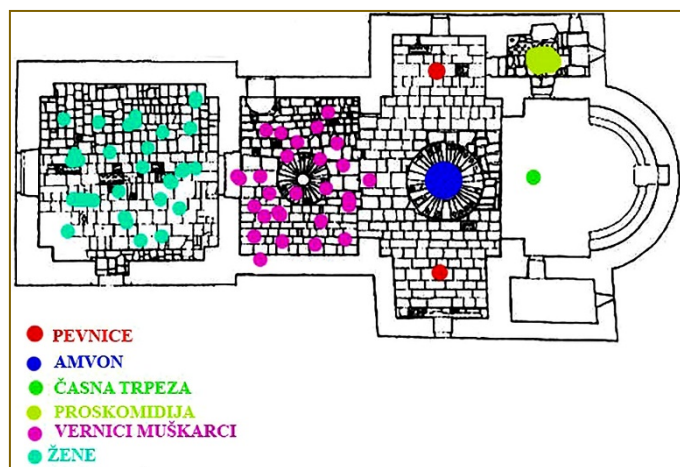
Od samog nastanka moderne akustike pre stotinak godina istraživanja su bila usmerena na pokušaje da se procesi u prostorijama na neki način numerički karakterišu, a sve sa ciljem da se u nekom sledećem koraku utvrde veze između dobijenih brojeva i dimenzija koje u subjektivnom doživljaju zvuka i estetike zvučne slike prepoznaje slušalac. Najveći zamah u tom domenu dalo je istraživanje koncertnih i operskih sala i pokušaji da se inženjerski izmerene veličine, što znači numerički pokazatelji, povežu sa subjektivnim doživljajem estetike onoga što slušalac čuje u sali tokom muzičkih izvođenja [14,15]. Saznanja o tome koja su stečena do danas predstavljaju dobru osnovu za istraživanje sakralnih prostora u kojima je zvuk element crkvene službe, i gde čulo sluha takođe na svoj kompleksan način vrednuje ono što prima.

Osnovni prikaz procesa u kome zvuk iz nekog izvora stiže do slušaoca je impulsni odziv prostora u kome se taj proces dešava. Zato prvi korak u istraživanju sakralnih prostora podrazumeva utvrđivanje karaktera impulsnog odziva u crkvama od interesa. Definicija impulsnog odziva podrazumeva da su u prostoru definišu pozicije izvora zvuka i prijemnika, a to su slušaoci. Njihove pozicije su relativno precizno određene liturgikom i arhitekturom crkve. Dva primera njihovih pozicija prikazani su na slici 1. Uzeti su primeri crkve Preobraženja u manastiru Pridvorica (12. vek) i crkve Vaszesenja Gospodnjeg u manastiru Mileševa (13. vek). Vidi se da postoji jasna podela na zonu u kojoj se nalaze potencijalni slušaoci i relativno lokalizovane pozicije izvora zvuka: pevnice, amvon i časna trpeza. To u izvesnom smislu pojednostavljuje pristup snimanju impulsnih odziva i svodi taj istraživački korak na relativno ograničen broj parova tačaka izvor zvuka – prijemnik zvuka.

III. AURALIZACIJA AMBIJENTA SAKRALNIH PROSTORA

Auralizacija je termin koji je uveden kao analogija pojmu vizuelizacije, pa se može slikovito reći da je to „renderovanje“ zvučnog polja [16]. Taj proces podrazumeva reprodukciju zvuka pomoću slušalica, jer je koncept zasnovan na pripremi binauralnih signala. Cilj auralizacije je da se kod slušaoca u laboratorijskim uslovima generiše auditorni događaj kakav bi

doživeo u različitim prostorima kada bi se u njima fizički nalazio, slušajući pri tome zvučne sadržaje koji se mogu proizvoljno birati. Auralizacija omogućava rekonstrukciju onoga što se čuje u nekom prostoru bez potrebe da se u njemu fizički nalazi, i što je u istraživačkom smislu posebno važno, da se to preslušava proizvoljan broj puta.



Sl.1. Osnova crkve Preobraženja u manastiru Pridvorica (gore) i crkve Vaznesenja u manastiru Mileševa (dole) sa naznačenim tačkama od značaja za snimanje impulsnih odziva.

Za auralizaciju je potrebno raspolagati binauralno snimljenim impulsnim odzivima prostora koji se želi predstaviti, a to znači sa signalima impulsnog odziva registrovanim na pozicijama levog i desnog uva neposredno prisutnog slušaoca. Takvi odzivi su označeni kao impulсни odzivi glave (HRTF – Head Related Transfer Function). Oni se u praksi dobijaju snimanjem impulsnog odziva pomoću veštačke glave ili pomoću takozvanih binauralnih mikrofona.

Veštačka glava je uređaj koji se izrađuje od tvrde gume ili sličnih materijala, i u geometrijskom smislu ima sve attribute ljudske glave [17]. Njene dimenzije i oblik kopiraju osnovnu formu prosečne ljudske glave utvrđene statistički, s posebno detaljno modelovanim ušnim školjkama. U unutrašnjosti veštačke glave, na poziciji ušiju, nalaze se mikrofoni čiji izlazni signali predstavljaju zvučne pritiske koji se javljaju na levom i desnom uvu slušaoca. Tako dobijeni signali sadrže u sebi uticaj glave kao prepreke, što je neophodno čulu sluha za dekodovanje prostornih dimenzija zvučnog polja. Veštačka

glava se postavlja na stativ na poziciji gde se želi registrovati signal.

Binauralni mikrofoni su minijaiturni mikrofoni koji se postavljaju u uši poput slušalica kakve se koriste uz mobilne telefone. Kao i veštačka glava, oni daju signale koji odgovaraju onome što deluje na uši slušaoca kada se nalazi u nekom zvučnom polju. Razlika je samo u tome što se glava pravi prema statistički utvrđenim dimenzijama i sa pojednostavljenom geometrijom lica, a binauralni mikrofoni daju signale koji su personalizavani, jer se pri snimanju nalaze na realnoj osobi.

Pobuda prostora pri snimanju impulsnog odziva vrši se neusmerenim zvučnikom postavljenim na odabranoj poziciji realnog izvora zvuka, to jest sveštenika ili pojca. Preko njega se reproduku posebno pripremljeni veštački signali koji su označeni kao MLS i *sweep*, i koji su napravljeni numerički. Kroz odgovarajuću numeričku proceduru iz takvog procesa dobija se signal impulsnog odziva za odabrani par tačaka izvor zvuka – prijemnik, to jest zvučnik i veštačka glava.

U istraživanju sakralnih prostora, a posebno u multidisciplinarnom pristupu njihovoj višemedijskoj prirodi, auralizacija može biti značajan istraživački alat, posebno u slučaju istraživanja istovremenog dejstva više medija na čoveka. Takav alat se može koristiti u dva važna domena. Prvo, beleženjem akustičkog odziva u prostorima od interesa moguće je u laboratorijskim uslovima auralizacijom stvoriti kod slušaoca auditorni utisak kakav bi bio kada bi se nalazio u tom prostoru. Pri tome, moguće je napraviti binauralne snimke sa bilo kojim muzičkim i drugim signalima, kao što su glas sveštenika, pojanja sa pevnica, zvuk zveckanja kadionice ili sve zajedno. Napravljeni snimak može se reprodukovati proizvoljan broj puta i u proizvoljnim trenucima u laboratoriji ili na nekom drugom mestu.

Drugo, pomoću softverskih alata za modelovanje zvučnog polja moguće je akustički odziv, to jest HRTF, dobiti simulacijom prostora koji odavno više ne postoje. Za takav postupak potrebno je raspolagati sa dovoljno detaljnim grafičkim prikazima objekta, to jest arhitektonskim crtežima dobijenim nekim prethodnim istraživanjima, i informacijama o materijalizaciji svega što je u njegovom enterijeru izloženo zvučnom polju.

Korišćenje mogućnosti auralizacije u istraživanju sakralnih prostora zahteva, pored ostalog, i razradu jedne teorijske teme iz domena obrade signala. Naime, postoje okolnosti u kojim se slušaoci kreću kroz prostor, kao na primer tokom raznih procesija. U literaturi je nagovešteno da se u crkvama mogu očekivati promene karaktera akustičkog odziva po prostoru, što je na neki način potrebno predstaviti i u auralizaciji. Za takve namene potreban je algoritam za kontinualnu promenu HRTF po trajektoriji kojom se slušalac kreće pri zadatim položajima izvora zvuka. S obzirom da se snimanje impulsnog odziva po definiciji obavlja za nepomičan izvor zvuka i mikrofona dok traje sekvenca snimanja (interval vremena koji je potreban za određeni broj ponavljanja sekvenci MLS ili *sweep* signala), jasno je da se može raspolagati samo sa snimcima HRTF u diskretnom skupu parova tačaka. Za kvalitetnu auralizaciju onoga što se čuje pri kretanju kroz prostor crkve potrebno je istraživati mogućnosti morfinga, a to znači interpolacije oblika binauralnih impulsnih odziva za bilo koju kombinaciji položaja

izvora zvuka i slušaoca, a na osnovu snimaka HRTF u konačnom broju tačaka duž zadate trajektorije.

IV. UTICAJ AKUSTIČKOG AMBIJENTA CRKVE NA PEVANJE

U literaturi iz oblasti arheoakustike inicirano je pitanje doživljaja sopstvenog glasa onih koji pevaju u crkvama [11,13]. Primećeno je da u tradicionalnim formama pravoslavnih crkava postoji razlika u karakteru doživljaja zvuka kada se peva sa različitih pozicija. Ukazano je da promena položaja pevača ima ulogu u ukupnom doživljaju ambijenta kod slušalaca, ali da takođe postoji povratno dejstvo na doživljaj sopstvenog glasa onog ko peva. Tako na primer, u literaturi se za jednu crkvu konstatuje da je „nedostatak rezonance uznemiravao i pevače i slušaocce“ [11].

Sa takvim informacijama iz literature jasno je da istraživanje zvučnog ambijenta sakralnih prostora neminovno zahteva i analizu njihovih akustičkih karakteristika sa aspekta onoga što čuju pevači, to jest sveštenici, pojci i hor. To utiče na formiranje njihovog pevanog glasa, kao i na celovit pevački izraz. Tema za istraživanje u tom domenu treba da bude korelacija između arhitektonskih odlika crkve, njene veličine i forme, i subjektivnog doživljaja sopstvenog glasa pevača na različitim pozicijama u njoj.

I u ovom domenu istraživanja se mogu koristiti saznanjima iz akustičke teorije koncertnih i operskih sala. U postupcima za njihovo objektivno ocenjivanje definisan je i koristi se parametar nazvan „podrška“ i označava se sa ST (*Stage support*). On numerički odslikava u kojoj meri ambijent svojim odzivom deluje na izvor zvuka nekom formom povratne sprege i tako pomaže u formiranju i kontroli zvuka koji se stvara, pevanog ili pomoću muzičkog instrumenta. Postupak njegovog izračunavanja je standardizovan [18]. Dobija se iz impulsnog odziva snimljenog u postavci kada se zvučnik nalazi na mestu gde bi se nalazio izvora zvuka (u koncertnim salama to je na bini a u crkvama su to uobičajene pozicije sveštenika, pojaca i hora), a merni mikroskop se nalazi na rastojanju 1 m od akustičkog centra zvučnika. U karakterizaciji podrške najčešće se koristi takozvana „rana podrška“ ST_{Early} koja po definiciji predstavlja odnos u decibelima reflektovane energije koja stiže u prvih 100 ms i energije direktnog zvuka, pa je:

$$ST_{Early} = 10 \log \left[\frac{\int_{0.020}^{0.100} h^2(t) dt}{\int_0^{0.010} h^2(t) dt} \right]$$

gde je $h(t)$ signal snimljenog impulsnog odziva, a $t = 0$ trenutak stizanja direktnog zvuka u njemu. Prema tome, postoji teorijski aparat i merna procedura da se istraživanje usmeri u tom pravcu. Za koncertne sale definisana je optimalna vrednost, preciznije donji prag koji vrednosti ST_{Early} mora da prebaci da bi prostor bio zadovoljavajući za izvođače. Za okolnosti kakve postoje u crkvama tek predstoji utvrđivanje optimalnih vrednosti ovog parametra. Za to su potrebna merenja ST_{Early} i ankete među pevačima o njihovim utiscima u kojoj bi oni vredovali različite pozicije za pevanje.

V. ZVUČNI AMBIJENT PROSTORA U KOME SE NALAZE SAKRALNI OBJEKTI

Sastavni deo doživljaja sakralnih prostora je i zvuk ambijenta u širem smislu u kome se taj prostor nalazi. Realno je pretpostaviti da postoji razlika kada se nakon doživljaja službe izađe u bučnu ulicu sa mnoštvom zvučnih nadražaja koji privlače pažnju, što je upoćajeno u gradskim sredinama i uopšte u naseljima, i kada je to ambijent prirode kao u slučaju manastira i njihovog okruženja. Mesta gde je pozicionirana većina manastira još uvek okružuje manje-više očuvani mir i ambijent prirode.

Nesumnjivo je da takve ambijente karakteriše relativna tišina. Apsolutna tišina ne postoji, pa čulo sluha uvek registruje neke prisutne zvukove. Činjenica da su zvukovi takvih ambijenata vrlo niskih apsolutnih nivoa, otvara još i pitanje mikrofona s kojim bi se mogli registrovati za potrebe njihove naknadne analize. Za kvalitene uzorke signala tih ambijenata neophodno je raspolagati s mikrofonom vrlo niskog nivoa sopstvenog šuma što, moguće je, izlazi iz okvira standardne opreme za audio snimanja.

Snimci ambijenata iz očuvanih okruženja omogućili bi da se u laboratorijskim uslovima ambijent ekstremne tišine, kakav postoji u anehoičnim i semianehoičnim prostorijama koje se uobičajeno koriste za psihoakustičke testove, obogati zvučnim sadržajem prirodne „tišine“ manistirskih ambijenata.

U evropskim naseljima tokom prethodnih vekova zvuci koje su ljudi slušali bili su različiti od današnjih. Promene su nastupile sa industrijskom revolucijom koja je donela motore i mehaničke sprave čiji rad generiše buku. Ipak, razlika je mnogo dublja od ekoloških tema o kojim se danas intenzivno govori. Dok danas ljudi pokušavaju da pobegnu od gradske buke, za stanovnike ranih gradova zvuk je služio kao ključni izvor informacija. Formirao je semiotički sistem, prenoseći vesti, pomažući ljudima da se lociraju u vremenu i prostoru i čineći ih delom „audijalne zajednice“ [2]. Zvuk je pomogao da se izgradi identitet i da se struktuiraju odnosi među ljudima. Evolucija ovog informacionog sistema odražava promene u društvenoj i političkoj organizaciji i u odnosu prema vremenu i urbanom prostoru. Zbog toga je u istraživanju istorijske dimenzije zvučnog ambijenta sakralnih prostora potrebno uložiti napor da se u izvesnoj meri rekonstruišu mogući ambijenti u kojima su se oni mogli nekada nalaziti.

VI. PROBLEM REKONSTRUISANIH CRKAVA

U istraživanjima akustičkog aspekta srpskih sakralnih prostora izvestan problem može nastati u crkvama koji su u relativno novije vreme rekonstruisane. Materijali koji se pri tome koriste ili autorski stav onoga ko vodi rekonstrukciju mogu promeniti akustičke uslove u njima. To dalje može usmeriti današnja istraživanja u pogrešnom smeru jer je ambijent akustički izmenjen.

Primer toga može se videti u crkvi manastira Žiča. Prema kazivanju onih koji imaju auditivna iskustva sa tim prostorom pre i posle građevinskih intervencija, u crkvi su se nakon rekonstrukcijen u izvesnoj meri promenile akustičke karakteristike. Na žalost, nema rezultata akustičkih merenja iz perioda pre toga, ali se kroz diskusiju došlo do zaključka da je uzrok takve promene novi malter koji je upotrebljen prilikom rekonstrukcije.

Naime, crkve su sa aspekta akustičkog dizajna specifični prostori, jer u njima nema izrazito apsorpcionih površina, osim naroda koji se u njima okupi za vreme službe. Sve unutrašnje površine u crkvama su akustički „tvrde“, po pravilu malterisane radi oslikavanja, osim poda koji je pokriven kamenom. Takve tvrde površine dominantno određuju prepoznatljiv akustički odziv crkvenih prostora. Prema podacima iz literature, koeficijent apsorpcije malterisane površine na masivnom zidu je vrlo mali i može se očekivati da je u intervalu $\alpha = 0,05-0,07$ [19]. U odsustvu površina sa intenzivnom apsorpcijom, male varijacije vrednosti koeficijenta apsorpcije, čak samo na nivou druge decimale, mogu se značajnije odraziti na akustički odziv prostora.

Jednostavna numerička ilustracija može objasniti značaj karaktera maltera u crkvama. Zapremine starih srpskih crkava su u najvećem broju slučajeva u intervalu od 500 m^3 do 3000 m^3 [7]. Veće crkve su vrlo retke, dok manje od 500 m^3 nemaju očekivani akustički ambijent karakterističan za crkve. Uzimajući 1000 m^3 kao približnu sredinu tog intervala posmatranog u logaritamskoj razmeri i koristeći Sabinov obrazac za izračunavanje vremena reverberacije može se dobiti gruba procena kakvu promenu u akustičkom odzivu unosi promena maltera sa koeficijentom apsorpcije 0,05 na malter čija je vrednost 0,07. Pri tome su obe vrednosti veoma male u odnosu na vrednosti koeficijenta apsorpcije ostalih materijala koji se koriste u zgradama. U proračunu se polazi od pretpostavke da je vreme reverberacije tog hipotetičkog crkvenog prostora 2 s, što je ranije utvrđeno kao estetski optimum za pravoslavni crkvenu službu [5,7]. Na osnovu toga je procenjena i rezidualna apsorpcija zvuka koju unose svi drveni predmeti, tkanine i druga uobičajena oprema enterijera u crkvama

Pojednostavljen akustički proračun pokazuje da će se vreme reverberacije samo promenom prirode maltera i njegove poroznosti, to jest povećanjem njegovog koeficijenta apsorpcije sa 0,05 na 0,07, smanjiti sa vrednosti 2 s na vrednost 1,7 s. To je promena koja se zapaža slušanjem. Realno je pretpostaviti da se vrednost koeficijenta apsorpcije maltera u crkvama može kretati i u širim granicama od ovih koje su usvojene u pojednostavljenom proračunu, pa se mogu dobiti i veće promene akustičkog odziva.

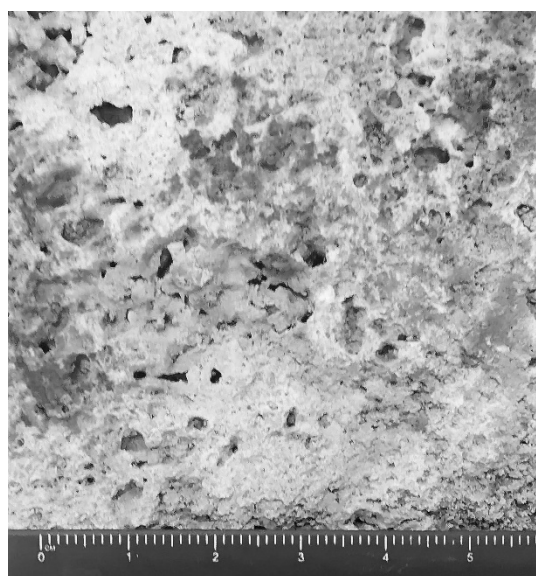
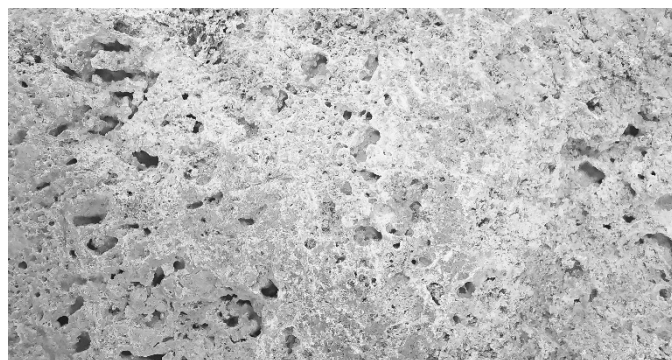
Prikazani proračun je krajnje aproksimativan, ali ukazuje na veliki značaj maltera za akustički odziv u okolnostima kada malterisane površine čine dominantnu apsorpciju u prostoriji, kao što je to u crkvama. U literaturi nisu nađeni podaci o apsorpcionim svojstvima starih maltera kakvi se nalaze u istorijski značajnim srpskim sakralnim građevinama. To je svakako jedna od tema koje zaslužuju detaljniju analizu i sasvim sigurno merenja na terenu. Problem u tome koji treba istraživački rešiti je što ne postoji standardizovani merni postupak za *in situ* merenja koeficijenta apsorpcije koji bi se mogao direktno primeniti. Posebno što se zahteva merenje izuzetno malih vrednosti.

Još jedan karakterističan slučaj od značaja za istraživanje zvučnog ambijenta srpskih sakralnih prostora nalazi se u crkvi manstira Gradac, sazidanoj u 13. veku. Ona je izgrađena od poroznog kamena čije je nalazište u lokalnoj sredini. Fotografije površine jednog primerka tog kamena prikazana je na slici 2. Ovaj materijal zbog svoje poroznosti nesumnjivo ima

značajno veći koeficijent apsorpcije od masivnog malterisanog zida kakav je uobičajen u crkvama. Ne postoje podaci o merenju apsorpcije ovakvog kamena, pa je to svakako još jedna tema za istraživanje.

Crkva manastira Gradac bila je u stanju polurazrušenosti do njene rekonstrukcije. Princip koji je usvojen pri obnovi je da se svi novoizgrađeni delovi ne malterišu kako bi se jasno naglasila razlika između originalnog i novog [20,21]. Zbog toga je relativno velika unutrašnja površina crkve ostala sa vidljivim poroznim kamenom kao sa slike 2. Subjektivni utisak u prostoru ove crkve je akustička prigušenost neuobičajena za takve ambijente.

Slučajevi kao što je crkva manastira Gradac nakon njene rekonstrukcije očigledno ne odslikava očekivane akustičke karakteristike sakralnog prostora. Možda upravo takva crkva može biti pogodna za neka istraživanja u domenu višemedijske prirode u okolnostima redukovano akustičkog sadržaja.



Sl.2. Izgled strukture kamena od koga je sačinjena unutrašnja površina crkve manastira Gradac: gore – izgled površine; dole – detalj sa razmernikom u cm da se može proceniti veličina poroznosti

VII. ZAKLJUČAK

Celovito istraživanje zvučnog ambijenta srpskih sakralnih prostora u kojima nastaju multisenzorski doživljaji zahteva saradnju istraživača iz svih domena njihove višemedijske prirode. Ono u toj kompleksnosti pokreće nekoliko sasvim novih pitanja iz domena akustike prostorija i psihoakustike za

čije je odgovore neophodan iskorak iz inženjerske rutine i uključivanje u multidisciplinarno posmatranje sakralnih prostora. U radovima istoričara postoji dovoljno naznaka za preciznije definisanje mogućih ciljeva istraživanja, a teorijske osnove iz oblasti akustike i obrade signala omogućavaju da se ostvari kvalitetativni pomak u metodologiji istraživačkog rada.

Primena auralizacije otvara nove mogućnosti za pouzdanije sagledavanje kompleksnih uticaja sakralnih prostora na prisutne ljude. Posebno je značajna činjenica da auralizacija omogućava premeštanje istraživanja u laboratoriju, gde je moguće postići kontrolu pobude i ponavljanje ispitivanja proizvoljan broj puta. Posebno je istraživački zanimljiv eventualni povratni uticaj akustičkog ambijenta na pevače, što bi dalo objašnjenja za neke pojave ranije konstatovane u istorijskoj literaturi.

LITERATURA

- [1] Miomir Mijić, "Audio industrija u Srbiji", Flogiston, 29/2021, Muzej nauke i tehnike, ISSN 0354-6640
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Archaeoacoustics>
- [3] A.González Menéndez "Archaeoacoustics: The Study of Acoustics at Archaeological Sites", OpenMind, 16 March 2020.
- [4] M.Mijić, "Acoustical characteristics of some Serbian Orthodox worship spaces", 120th Meeting of Acoustical Society of America, abstrakt objavljen u Journal of Acoustical Society of America, Vol. 88, Supplement 1, 1990, S185
- [5] M.Mijic, V. Banjac, "O ulozi ugrađenih akustičkih rezonatora u srpskim crkvama na primeru Gornje crkve u Sremskim Karlovcima", Građa za proučavanje spomenika kulture Vojvodine XX, Novi sad (1999) 87-104
- [6] M.Mijic, D. Sumarac-Pavlovic, "Acoustical characteristics of old wooden churches in Serbia", The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 108, page 2648 (2000); <https://doi.org/10.1121/1.4743873>
- [7] M.Mijić, "Serbian orthodox church - An acoustical view", ICA, Rim, 2-7 septembra 2001. 6C.09.04
- [8] D.Šumarac Pavlović, „Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv“, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2007.
- [9] M.Mijic, D. Sumarac-Pavlovic, "Acoustic resonators in serbian orthodox churches", Proc. Forum Acusticum, Sevilla (2002) RBA-05-001-IP
- [10] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, „Acoustic Resonators in Serbian Orthodox Churches“, poglavlje u monografiji „Collected Papers in Building Acoustics: Room Acoustics and Environmental Noise“, Multi Science Publishing Co., London, 2010, 141-156
- [11] Bissera V. Pentcheva, "Hagia Sophia and Multisensory Aesthetics", Gesta 50, no. 2 (2011): 93-111
- [12] Sharon E. J.Gerstel, "Images in Churches in Late Byzantium", <https://books.openedition.org/psorbonne/39781>
- [13] S.Gerstel C.Kyriakakis, S.Antonopoulos, K.Raptis, J.Donahue, "Holy, Holy, Holy: Hearing the Voices of Angels", Gesta 60, No. 1 (2021): 31-49
- [14] L.Beranek, "Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture", Springer (2004)
- [15] Y.Ando, "Opera House Acoustics Based on Subjective Preference Theory", Springer (2015)
- [16] M.Kleiner, B.I.Dalenbäck, P.Svensson, "Auralization-An Overview", JAES Vol.41 No.11, 1993, 861-875
- [17] M.Mijić, "Audio sistemi", Akademska misao (2010)
- [18] ISO 3382-1: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces
- [19] M.Mijić, "ELA 1 – Koeficijenti apsorpcije materijala", Laboratorija za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, 1998.
- [20] A.Jurišić, "Gradac – rezultati areoloških istraživanja", Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, Beograd (1989)
- [21] O.Kandić, "The Monastery of Gradac", Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, Beograd (1987)
- [22] "Soundscape of Byzantium", *Speculum*, Vol. 92, No. S1 October 2017, pp. S321-S335

ABSTRACT

The study of soundscape in the historical context has given rise to a new field of acoustics called archaeoacoustics. In addition to many important historical buildings, the topic of such research was the acoustic characteristics of religious spaces, too. The synthesis of acoustic and historical facts about Serbian sacral spaces led to the conclusion that their concept is a multimedia topic in which sound is only one, although important component. In order to give meaning to the complex acoustic analysis results, one has to look beyond physics and recognize the interactions of sound with other applied media such as painting, architecture, music, light. This paper considers the place and role of acoustics in the context of possible multidisciplinary research of Serbian sacral spaces. The focus is on several characteristic topics: the correlation of impulse responses and physical forms of sacral spaces, the auralisation of the sound field in them to enable the relocation of research to laboratory ambient, the impact of the acoustic environment on the position of priests and chanters, as well as acoustic characterization the physical ambience from which people enter the sacred space and into which they come back.

Research of the Serbian sacral space soundscape as a multimedia phenomenon

Miomir Mijić, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Tatjana Miljković, Filip Pantelić

O ulozi akustičkih rezonatora u prostoru hrama Svetog Save u Beogradu

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Jelena Erdeljan, Tatjana Miljković

Apstrakt— Akustički rezonatori su naprave od davnina korišćene u crkvama sa idejom da se pomoću njih na neki način kontroliše zvučni odziv prostora. Projekat hrama Svetog Save u Beogradu svojevremeno je predvideo ugradnju 476 posebno dizajniranih rezonatora da bi se umanjila očekivana reverberacija u njegovoj velikoj zapremini od 117.000 m³. Tokom izrade mozaika kojim je oslikan hram tako veliki broj rezonatorskih otvora relativno velikog prečnika otežavao je montažu kamenih elemenata mozaika. Zbog toga se nametnulo pitanje njihove nužnosti i svrsishodnosti u hramu i pokrenuto je istraživanje realne efikasnosti ugrađenih rezonatora i rizika koje nosi njihovo eventualno zatvaranje. Tadašnja analiza je malo proširena i ukupni rezultati do kojih se došlo prikazani su u ovom radu.

Ključne reči — akustički odziv; akustički rezonatori; crkve, Hram Svetog Save.

I. UVOD

Nesumnjivo najznačajniji sakralni objekat u Srbiji je hram Svetog Save. Izgrađen je na vrhu Vračarskog brda u Beogradu, pa zahvaljujući svom položaju, ali i fizičkoj monumentalnosti, dominira Beogradom i vidljiv je s velikog dela teritorije grada. Navodi se da je Hram po zapremini glavnog molitvenog prostora najveća aktivna pravoslavna crkva na svetu [1]. Njegova zapremina, preciznije unutrašnji vazdušni prostor, zauzima oko 117.000 m³.

Aktivnosti na izgradnji hrama započete su još 1895. godine kada je u Beogradu osnovano „Društvo za podizanje hrama Svetog Save na Vračaru“. Društvo je 1905. godine raspisalo arhitektonski konkurs za idejno rešenje hrama. Zanimljivo je da su svi prispeli radovi, a prispelo ih je samo 5, odbačeni kao nedovoljno dobri. Nakon I svetskog rata Društvo je obnovilo rad i 1926. godine raspisan je novi konkurs. Kao najuspešniji proglašen je rad arhitekta Bogdana Nestorovića, pa je Društvo 1930. godine poverio izradu projekta arhitektama Nestoroviću i Aleksandru Deroku. Izgradnja hrama je konačno započela 15. septembra 1935. godine.

Od početka građevinskih radova do nemačke okupacije 1941. godine izgrađeni su temelji hrama i podignuti zidovi visine od 7 do 11 m. Stariji beograđani pamte takvo njegovo stanje sa poluizgrađenim zidovima od opeke. S Drugim svetskim ratom „Društvo za izgradnju hrama“ je prestalo da postoji.

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

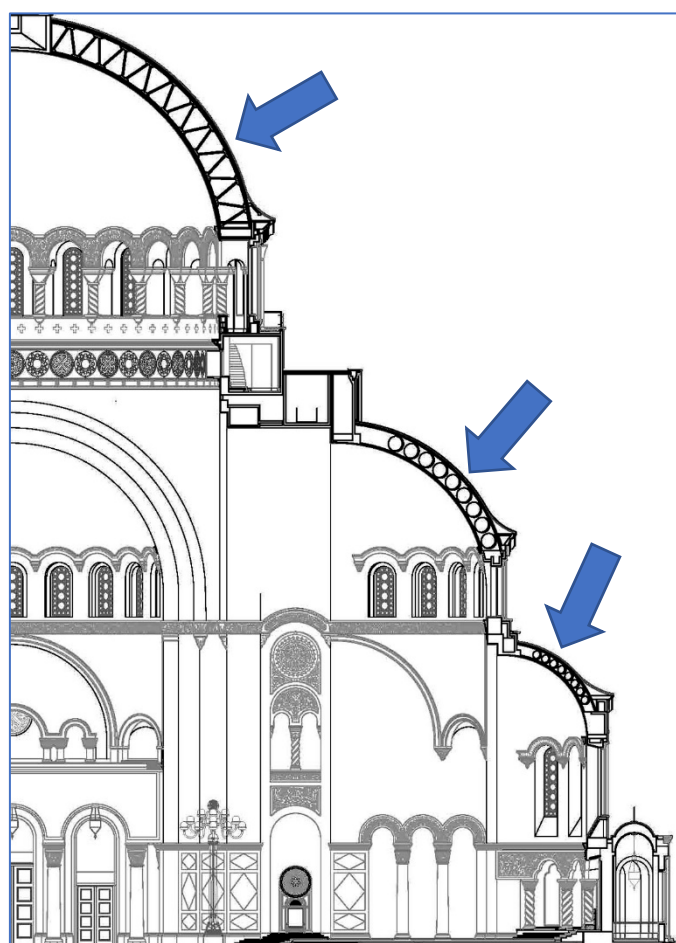
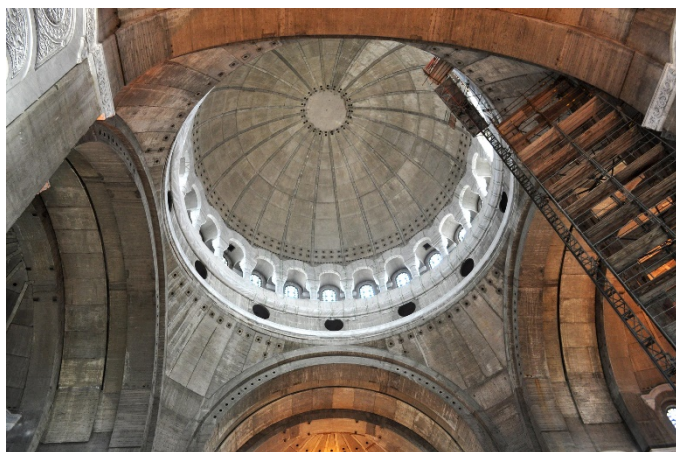
Nastavak gradnje hrama započeo je 1984. godine, a za novog arhitektu hrama imenovan je arhitekta Branko Pešić. Gradnja objekta je u građevinskom smislu završena 2004. godine. Međutim, radovi na unutrašnjem uređenju i dekoraciji dovršeni su značajno kasnije, da bi se otvaranje hrama ozvaničilo tek nedavno, krajem 2021. godine nakon završetka oslikavanja mozaikom i finalizacije većine prostora u hramu (iako se u njemu još uvek odvijaju građevinski i instalaterski radovi).

Svakako je zanimljivo da su u projektovanju hrama tokom osamdesetih godina dvadesetog veka projektanti razmatrali i akustičke aspekte. Kao akustički konsultant angažovan je Stevan Milosavljević. Tokom rada na projektu doneta je odluka da se kontrola akustičkog odziva prostora hrama realizuje pomoću akustičkih rezonatora, svakako imajući u vidu brojne informacije o njihovom postojanju u srednjovekovnim crkvenim prostorima. Neki od radova koji obrađuju tu temu pobrojani su u spisku literature na kraju ovog rada [2-9]. Činjenica je da radovi o rezonatorima u crkvama koji se mogu naći u raznorodnoj literaturi većim delom nisu inženjerski, preciznije akustičarski. Postoje brojni radovi koji su rezultat analiza koje su sprovodili arheolozi, istoričari umetnosti, arhitekta i drugi autori iz oblasti tangentnih sa akustikom.

Ideja o rezonatorima kao sredstvu za kontrolu akustičkog odziva u hramu inicirala je u vreme projektovanja opsežnu studiju o kojoj je pisao D.Kalić [10]. Dimenzije rezonatora prikazane u njegovom radu određene su na osnovu prethodno usvojene odluke o potrebnim rezonantnim frekvencijama u zadatom prostoru. Rezonatori imaju formu betonskih kocki sa okruglim otvorom na prednjoj strani. Primenjena su dva tipa rezonatora, manji i veći. Veći rezonatori imaju dužinu stranice 1,1 m i proračunom utvrđenu rezonantnu frekvenciju 125 Hz, a manji su sa stranicom 55 cm i proračunom utvrđenom rezonantnom frekvencijom 250 Hz. U hramu je projektom predviđeno ukupno 476 takvih rezonatora. Njihove pozicije su vidljive na fotografiji prikazanoj na slici 1. Rezonatori su postavljani u površine gornje zone hrama, u kupoli i svim bočnim svodovima, očigledno prema realnim mogućnostima ugradnje takvih relativno velikih kutija u građevinske strukture. Naime, na tim delovima građevinske konstrukcije hrama postoji dvostruka betonska ljuska. To je omogućilo da prisustvo nezavisnih celina kakve su kutije rezonatora ne ugrožavaju statiku objekta. Bliski poled na dva rezonatora u ugrađenom stanju prikazan je na slici 2.

Jelena Erdeljan – Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18-20, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: @).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).



Sl.1. Gore - izgled unutrašnjosti hrama pre postavljanja mozaika sa vidljivom otvorima rezonatora oko kupole (fotografija je napravljena 2010. godine, to jest pre postavljanja mozaika); dole – označene pozicije dvostrukih betonskih struktura kupole i svodova vidljive u preseku u koje su ugrađeni rezonatori.

Oslikavanje hrama, a posebno odluka da se za to koristi mozaik kao tehnika, otvorilo je neke praktične probleme koji očigledno nisu uzeti u obzir pri projektovanju takve akustičke obrade prostora. Problemi su posledica činjenice da na unutrašnjim površinama hrama prostoje brojni, relativno veliki otvori rezonatora. Oni su potencijalno remetili strukturu slika, ali i komplikovali montažu teških obloga sa pripremljenim kamenim elementima mozaika. Zbog toga je pokrenuto pitanje provere svrshodnosti i realnih dometa rezonatora u kontroli

veoma duge reverberacije prostora hrama i procene akustičkog rizika koji nastaje ako se rezonatori eliminišu prekrivanjem njihovih otvora.



Sl.2. Bliski pogled na dva rezonatora u kupoli - levo je manji, a desno veći rezonator.

Da bi se razrešile nedoumice oko uticaja rezonatora i montaže mozaika inicirano je posebno istraživanje. Njegov cilj je bio da pomogne u donošenju strateških odluka u konačnom dovršavanju hrama. Istraživanje je obavljeno tokom 2010. godine, a u njemu su učestvovali članovi stručnog tima Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. U analizama su korišćeni rezultati merenja akustičkog odziva hramu u zatečenom stanju i u njegovom numeričkom modelu pomoću rej-trejsing simulacije. Za sagledavanje novih aspekata analiziranog problema utrađene su u novije vreme neke dodatne analize. Rezultati su prikazani u ovom radu.

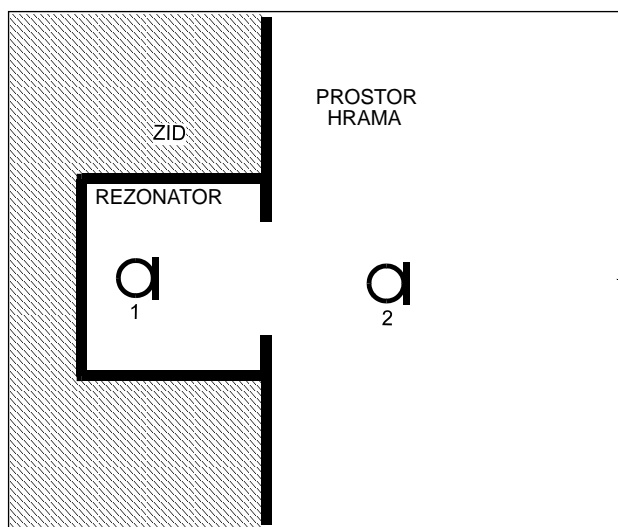
II. KARAKTERISTIKE UGRAĐENIH REZONATORA

Prvi korak u istraživanju na temu mogućeg doprinosa ugrađenih rezonatora na akustički odziv hrama uključilo je proveru njihovih realno postignutih rezonantnih frekvencija. Podaci o tome prikazani u projektu dobijeni su proračunima koji uvek nose moguću grešku zbog nesavršenosti matematičkih modela [11-14]. S tim ciljem je organizovano *in situ* merenje rezonantnog odziva ugrađenih rezonatora.

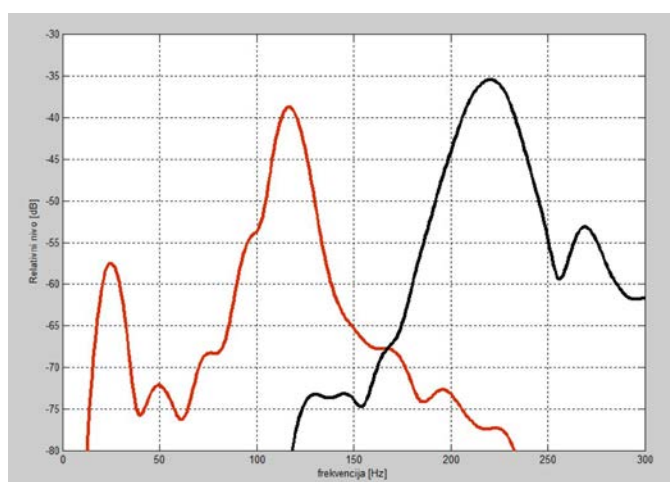
Za tu namenu iskorišćena je dizalica sa platformom koja je u to vreme postojala u hramu i korišćena je za potrebe građevinskih radova. Dizalica je vidljiva na desnoj strani fotografije sa slike 1. Ona je omogućila da se ostvari dovoljno približavanje jednoj grupi rezonatora u kupoli i postavljanje zvučnog izvora i mernih mikrofona. S obzirom na njihovu poziciju u hramu, merenja su izvršena na rezonatorima koji su bili dohvatni sa platforme dizalice i prikazani su na slici 1.

Metodologija merenja rezonantnih svojstava ugrađenih rezonatora ilustrovana je na slici 3. Koncept merenja njihove rezonantne frekvencije i propusnog opsega ranije je razvijen za potrebe detaljne analize izvesnog broja rezonatora izvađenih iz srednjovekovnih srpskih crkava [15]. Za tu namenu korišćen je priručni širokopojasni izvor zvuka pozicioniran u zoni otvora ispitivanih rezonatora. Zvučni signal je registrovan sa dva merna mikrofona – jedan se nalazio u blizini otvora rezonatora i registrovao je pobudu rezonatora iz prostora hrama, a drugi je bio u unutrašnjosti rezonatora i u njemu registrovao odziv na

primenjenu pobudu. Na osnovu razlike signala iz mikrofona u ove dve tačke dobijena je relativna promena nivoa zvuka po frekvencijama u rezonatoru, a koja nastaje kao posledica rezonantnog procesa. Dobijene rezonantne krive za dva tipa rezonatora ugrađena u hramu prikazane su na slici 4.



Sl.3. Šematski prikaz postupka merenja rezonantne frekvencije ugrađenih rezonatora: 1 – mikroskop u rezonatoru, 2 – mikroskop u prostoru ispred rezonatora



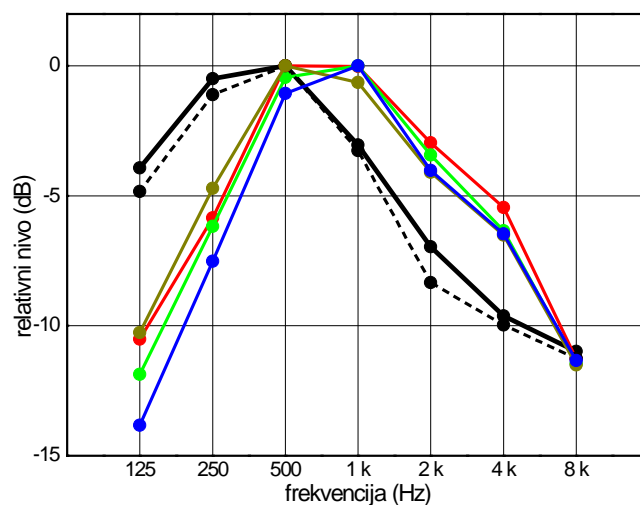
Sl.4. Odzivi dva tipa rezonatora ugrađena u kupoli hrama; odzivi su snimljeni metodologijom prikazanom na slici 2: crvena linija – veći rezonator, crna linija – manji rezonator.

Sa slike 4 se vidi da je snimljeni odziv analiziranih rezonatora na spoljašnju zvučnu pobudu karakterističan za rezonantni proces. Jasno se vidi da je njihova selektivnost relativno uska. Rezonantna frekvencija većeg rezonatora je bliska 125 Hz, kao što je bilo predviđeno projektom, a propusni opseg je oko 10 Hz. Rezonantna frekvencija manjeg rezonatora je oko 220 Hz (projektom je predviđeno 250 Hz), a propusni opseg je oko 20 Hz. To ukazuje da se njihov uticaj na zvučno polje može očekivati samo u okvirima njihovih propusnih opsega vidljivih na dijagramu. Činjenica je da se opseg delovanja rezonatora može širiti korišćenjem nekog apsorpcionog materijala, ali proširivanje selektivnosti

rezonantnog procesa neumitno smanjuje eventualni efekat apsorpcije zvuka na rezonantnoj frekvenciji. Rezultat merenja sa slike 4 pokazuje da je sa aspekta akustičkog odziva u prostoru hrama eventualni dobitak takvom modifikacijom upitan.

III. KARAKTERISTIKE ZVUČNE POBUDE KOJA SE JAVLJA U HRAMU

Potencijalni doprinos ugrađenih rezonatora u akustičkom odzivu hrama, sa njihovim izmerenim rezonantnim odzivima, zavisi od zvučnih sadržaja koji se pojavljuje tokom službi. Da bi se to razjasnilo izvršena je frekvencijska analiza uzoraka zvučnih signala koji se pojavljuju tokom službe u srpskim pravoslavnim crkvama, i kojim se pobuđuje njihov prostor. Za analizu su uzeti liturgijsko pevanje hora i pojanje sa pevnice. Da bi rezultati takve analize bili primenjivi moraju se posmatrati izvorni akustički signali koje emituju glasovi kao zvučni izvori, to jest bez uticaja ambijenta koji promenama u frekvencijskom i vremenskom domenu utiče na karakter zvuka koji se čuje. Zbog toga su upotrebljeni snimci bliski anehoičnim, napravljeni u jednom ranijem istraživanju, pa su primenjeni i za potrebe ove analize. Pojanja su snimljena u crkvenom prostoru, ali sa vrlo bliskim mikrofonom. Na taj način je u dobijenom signalu potisnut uticaj ambijenta karakterističnog za crkve. Pevanje hora je snimljeno u relativno maloj prostoriji za probe koja je prigušena izvesnom količinom apsorpcionog materijala. Dugovremeni spektri šest uzoraka takvih signala prikazani su na slici 5.



Sl.5. Dugovremeni spektri segmenata liturgije koju peva hor i pojanja grupe pojaca: crne linije – pojanje sa pevnice, obojene linije – pevanje hora.

Dijagrami sa slike 5 pokazuju karakter zvuka kojim se uobičajeno pobuđuje prostor pravoslavnih crkava za vreme službe. Spektri u kome dominiraju muški glasovi, kao što je pojanje sa pevnice, imaju maksimum spektra u oktavi na 500 Hz, dok je u pevanju mešovito hora maksimum energije u oblasti oktava sa centralnim frekvencijama na 500 Hz i 1 kHz, i sa opadanjem relativnog nivoa ka višim i nižim frekvencijama.

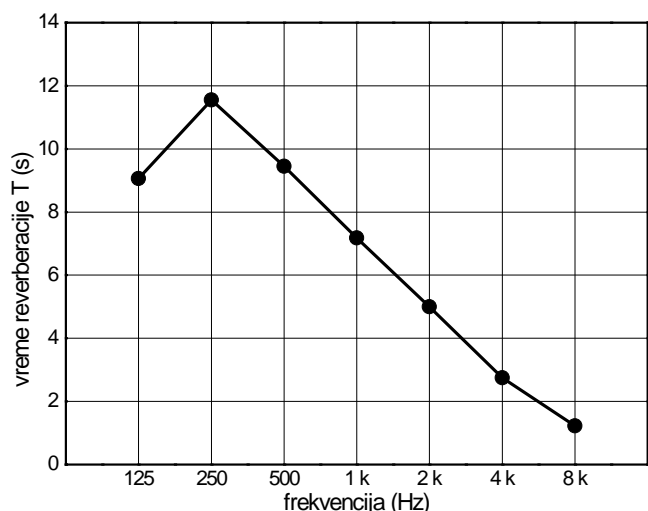
Upoređujući dugovremene spektre sa slike 5 sa rezonantnim svojstvima akustičkih rezonatora prikazanim na slici 4, zaključuje se da su oni podešeni na frekvencije ispod oblasti u

kojoj se nalazi maksimum energije glasova, a to znači maksimum zvučne pobude crkvenog prostora tokom službe. Takav zaključak je apostrofiran i u ranijem istraživanju akustičkih rezonatora pronađenih u srednjovekovnim srpskim crkvama [15]. Ovakva činjenica ograničava moguće auditivne efekte koje oni mogu ispoljavati u srpskim pravoslavnim crkvama, pa i u hramu Svetog Save.

IV. MERENJE U HRAMU PRE POSTAVLJANJA MOZAIKA

Da bi se utvrdilo realno stanje akustičkog odziva prostora hrama sa ugrađenim rezonatorima organizovano je merenje akustičkog odziva. Merenje je sprovedeno u dve seanse tokom 2010. godine. Bilo je to u fazi izgradnje hrama, kada je objekat u ugrađevinskom smislu bio završen, a pre početka većih radova na oslikavanju i ukrašavanju. Merenja su vršena tokom noći kada u njemu nije bilo posetilaca. Od dodatnih elemenata u hramu kojih neće biti u njegovom finalnom stanju tom prilikom su postojale skele u jednom delu prostora, manja količina građevinskog materijala ograđenog mrežama koja ih štiti i dizalica vidljiva na slici 1. Pod u to vreme nije bio popločan.

Merenje akustičkog odziva je izvršeno direktnom metodom, što znači da je za pobudu korišćen izvor impulsnog zvuka. U prostoru koji ima tako veliku zapreminu to je bio jedini dostupan način za njegovu pobudu neusmerenim zračenjem. Rezultat merenja vremena reverberacije prikazan je na slici 6, dobijen usrednjavanjem za nekoliko prijemnih i predajnih mesta u hramu.



S1.6. Rezultat merenja vremena reverberacije u hramu u fazi pre postavljanja mozaika.

Sa dijagrama na slici 6 može se uočiti nekoliko karakterističnih činjenica.

1. I pored postojanja rezonatora prostor hrama na nižim frekvencijama ima veliku vrednost vremena reverberacije, čak do 12 s u oktavi na 250 Hz. Vrednosti oko 10 s su konstatovane i u drugim tako velikim prostorima, kao na primer u Beogradskoj areni čija je unutrašnja zapremina oko 300.000 m³ [16]

2. U hramu ne postoje površine koje bi mogli doprineti povećanoj apsorpciji na niskim frekvencijama. To bi teorijski

mogle biti sve površine koje deluju kao mehanički rezonatori: drvene obloge, površine sa gipsanim pločama i slično. Činjenica je da u hramu postoje relativno velike površine vrata, podašćane zone i površine slične materijalizacije koje mogu u nekoj maloj meri doprineti apsorpciji najnižih frekvencija, ali je to po ukupnoj kvadraturi minorno u datoj zapremini. Zbog toga je pad vrednosti vremena reverberacije u oktavi na 125 Hz očigledna posledica delovanja rezonatora. Pa ipak, i pored svih tih uticaja vrednost vremena reverberacije je relativno velika, čak 9 s.

3. Uticaj rezonatora se u oktavi na 250 Hz iz nekih razloga ne primećuje, iako dijagram sa slike 3 pokazuje da je oko polovina od njihovog ukupnog broja podešena na frekvenciju koja se nalazi upravo u tom opsegu. Razlog tome može biti suviše uzak propusni opseg rezonatora u odnosu na ukupnu širinu oktave na 250 Hz koja je oko 170 Hz (od oko 180 Hz do oko 350 Hz). Njegov doprinos sa delovanjem u opsegu širine od samo 20 Hz očigledno se ne primećuje u usrednenoj oktavnoj vrednosti vremena reverberacije.

4. Modelovanje funkcije usamljenog rezonatora ugrađenog u masivnom zidu pokazuje da je maksimalno moguća vrednost ekvivalentne apsorpcione površine koju on ispoljava [17]:

$$A = \frac{\lambda_0^2}{2\pi} [\text{m}^2]$$

Ova vrednost se dostiže samo ako je dizajn rezonatora optimalan. To znači da će udeo rezonatora u ukupnoj apsorpciji prirodno da opada sa frekvencijom. To može biti objašnjenje manje vidljivosti uticaja rezonatora na vreme reverberacije u oktavi na 250 Hz u odnosu na oktavu na 125 Hz.

5. Monotoni pad vrednosti vremena reverberacije na višim frekvencijama jasno je određen uticajem disipacije u vazduhu, jer u enterijeru hrama nema poroznih materijala koji bi uneli takvu apsorpciju. To znači da je kriva vremena reverberacije u toj oblasti frekvencija u izvesnoj meri promenljiva u funkciji promene vlažnosti i temperature vazduha, ali da ima očekivani monotoni pad ka višim frekvencijama počev od oktave 250 Hz.

V. ANALIZA MOGUĆEG DOPRINOSA REZONATORA U HRAMU SIMULACIJOM ZVUČNOG POLJA

Da bi se procenila mogućnost predikcije efekta ugrađenih rezonatora u prostoru hrama sprovedena je analiza proračunima. Za to su primenjena dva pristupa:

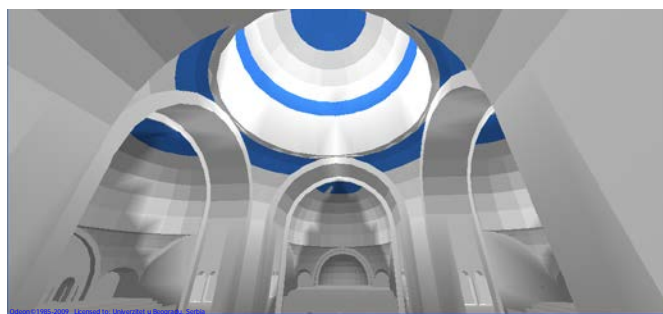
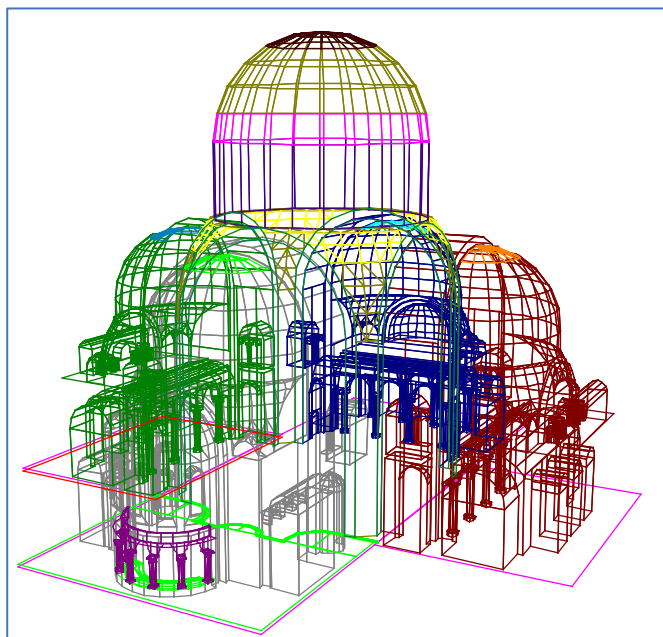
- simulacijom zvučnog polja u softverskom modelu njegove unutrašnjosti pomoću rej-trejsing analize i
- pomoću statističkog modela zvučnog polja koristeći poznatu Sabinovu formulu za vreme reverberacije u prostoriji.

Za potrebe rej-trejsing simulacije napravljen je model unutrašnjosti hrama čiji je izgled prikazan na slici 7. Unutrašnjim površinama dodeljene su procenjene vrednosti koeficijenta apsorpcije koristeći podatke iz literature [18]. Za potrebe proračuna posebno je izvršena procena vrednosti koeficijenta apsorpcije površina sa ugrađenim rezonatorima, tačnije izračunavanje njihove apsorpcione površine, da bi se to primenilo u ovim modelima.

Rezultat proračuna vremena reverberacije metodom rej-trejsing i Sabinovom formulom prikazan je na slici 8. Radi

poređenja, na dijagramu je ucrtan i rezultat merenja sa slike 6. Na osnovu ovih rezultata može se izvesti nekoliko važnih zaključaka.

1. U oktavi na 125 Hz izmerena vrednost vremena reverberacije poklapa se sa rezultatom proračunom za obe primenjene metode modelovanja.



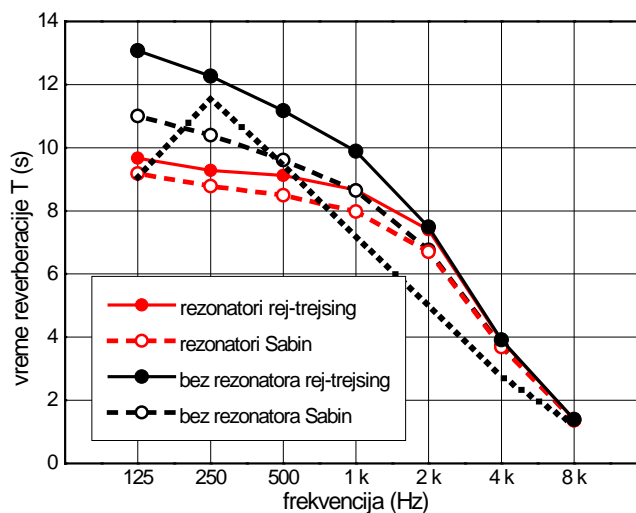
Sl.7. Izgled softverskog modela unutrašnjosti hrama u kome je izvršeno modelovanje zvučnog polja metodom *rej-trejsing*: gore – žičani model, dole – model sa unetom materijalizacijom gde je vrednost koeficijenta apsorpcije kodovana bojama.

2. U oktavi na 250 Hz izmerena vrednost vremena reverberacije se približno poklapa sa vrednostima izračunatim za slučaj hrama bez rezonatora. Preciznije, izmerena vrednost je između vrednosti dobijenih Sabinovom formulom i *rej-trejsing* simulacijom za slučaj bez rezonatora.

3. Na višim frekvencijama proračuni po obe metode premašuju izmerene vrednosti. To može biti posledica dva faktora: razlike u proceni disipacije u vazduhu i činjenice da u nedovršenom hramu neke površine ipak imaju izvesnu poroznost koja može imati uticaja na apsorpciju viših frekvencija, a što nije moglo biti sagledano u primenjenim proračunima.

VI. MERENJA U ZAVRŠENOM PROSTORU HRAMA

Da bi se zaokružila slika o mogućim efektima rezonatora na akustički odziv hrama potrebno je izvršiti finalno merenje akustičkog odziva u njemu. Uslovi za takvo merenje su se stekli tek nedavno, nakon finalizacije oslikavanja i nekih drugih bitnih detalja. Time su svi otvori ugrađenih rezonatora zatvoreni masivnim slojem materijala od koga je načinjen mozaik. Nažalost, sticajem raznih okolnosti organizacione prirode to merenje još uvek nije izvršeno.



Sl.8. Rezultati proračuna vremena reverberacije u hramu za slučaj sa i bez uticaja ugrađenih rezonatora: proračuni su urađeni na dva načina: metodom *rej-trejsing* i pomoću Sabinove formule; tačkasto je ucrtan rezultat merenja u hramu.

VII. ZAKLJUČAK

Iz analize uticaja akustičkih rezonatora u hramu Svetog Save u Beogradu proizašlo je nekoliko zaključaka koji se odnose na tu temu, ali i na šire aspekte akustike.

1. Pokazalo se da su rezonantne frekvencije primenjenih rezonatora ispod oblasti frekvencija gde se dominantno nalazi najveći dio energije glasova horskog pevanja i pojanja. To potvrđuje ranije zaključke koji su prizašli iz studije akustičkih rezonatora u srednjovekovnim srpskim crkvama.

2. Rezultati sprovedenih proračuna i njihovo poređenje sa rezultatima merenja u izgrađenom hramu pokazuju da postoji problem tačnosti modelovanja zvučnog polja i predikcije akustičkog odziva tako velikih prostora kao što je hram Svetog Save (117.000 m³). Očigledno je da u projektovanju to zahteva poseban istraživački pristup. Sličan zaključak je već ustanovljen prilikom projektovanja Beogradske arene [16].

3. U veoma velikim prostorima kao što je hram nemoguće je da se služba odvija bez primene sistema za ozvučavanje. Naime, ne postoje sredstva akustičkog dizajna prihvatljiva u kanonizovanom crkvenom prostoru koja bi mogla da vreme reverberacije svedu na optimalnu meru za takve ambijente (2-3 s) [7].

4. Savremena tehnologija daje mogućnost primene vrlo usmerenih zvučnih sistema kakvi su danas uobičajeni u sistemima za ozvučavanje, koji kombinovani sa bliskim mikrofonomima na sveštenicima i pojcima omogućavaju minimizaciju uticaja akustičkog ambijenta na ono što će se čuti

na pozicijama slušaoca. Na taj način danas je u izvesnom smislu eliminisana neophodnost podešavanja vremena reverberacije u vrlo velikim verskim prostorima kakav je hram, što se odražava i na eventualnu ideju o primeni rezonatora.

LITERATURA

- [1] <https://hramsvetogsave.rs/>
- [2] M.Kayili, "Use of cavity resonators in Anatolia since Vitruvius", Proc. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, 1621-8 (2000)
- [3] T.Pretlove, "Helmholtz resonators for the new Russian Orthodox church in London", Acoustic Bulletin, London, January/February (1998)
- [4] A.Carvalho, V.Desarnaulds, Y.Loerincik, "Acoustic behavior of ceramic pots used in middle age worship spaces - a laboratory analysis", Proc. 9th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, 1621-8 (2000)
- [5] S.Nenadovic, "Rezonatori u crkvama srednjovekovne Srbije", Zbornik Arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Beogradu (1960) sveska V
- [6] M.Bajalovic-Hadzi-Pesic, "Keramika u srednjovekovnoj Srbiji", Muzej grada Beograda, (1981) 71-73
- [7] M.Mijic, V. Banjac, "O ulozi ugrađenih akustičkih rezonatora u srpskim crkvama na primeru Gornje crkve u Sremskim Karlovcima", Građa za proučavanje spomenika kulture Vojvodine XX, Novi sad (1999) 87-104
- [8] M.Mijic, D. Sumarac-Pavlovic, "Acoustic resonators in serbian orthodox churches", Proc. Forum Acusticum, Sevilla (2002) RBA-05-001-IP
- [9] D.Kalic, "Acoustic resonators in Serbian medieval churches ", Proc. II Joint meeting of Greek and Yugoslav Acoustical Societies (1984), Proceedings, 91-97
- [10] D.Kalić, "Akustika hrama Svetog Save", Izgradnja, No 1 (1993) 23-29
- [11] J.Holtmark, "The absorption and diffusion of sound by resonators", I Kommissjon hos Jacob Dybwad, Oslo (1946)
- [12] A.K.Nielsen, "Acoustic resonators of circular cross-section and with axyal symmetry", Trans. of the Danish Academy of Technical Sciences, No 10 (1949)
- [13] A.Alster, "Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators", Journal of Sound and Vibration, Vol. 24, No 1 (1972) 63-85
- [14] G.R.Biggs, "The three dimensional cavity resonator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 85 (1982) 85-103
- [15] Miomir Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, „Acoustic Resonators in Serbian Orthodox Churches“, poglavlje u monografiji „Collected Papers in Building Acoustics: Room Acoustics and Environmental Noise“, Multi Science Publishing Co., London, 2010, 141-156
- [16] M.Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, "Acoustic design of the Belgrade Arena hall", FORUM ACUSTICUM, Budimpešta, 2005. Proceedings, 2399-2404
- [17] U.Ingard, "On the Theory and Design of Acoustic Resonators", JASA, Vol.25, NO 6 (1953) 1037-1061
- [18] M.Mijić, „ELA 1 – Koeficijenti apsorpcije materijala“, Laboratorija za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, 1998.

ABSTRACT

Acoustic resonators are elements that have long been used in churches with the idea of using them to control the acoustic response of the worship space. The project of the Saint Sava temple in Belgrade included the installation of 476 specially designed resonators in order to reduce the expected reverberation. During the construction of the mosaic with which the temple was painted, such a large number of resonators with relatively large diameter of opening made it difficult to assemble the stone elements of the mosaic. Due to that, the question of their necessity and purposefulness in the temple arose. So, the research of the built-in resonators' real acoustic efficiency in the temple and the acoustical risk of their termination was initiated. The paper describes the results of the research and the achieved conclusions.

On the role of acoustic resonators in the temple of Saint Sava in Belgrade

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Jelena Erdeljan, Tatjana Miljković

Optimizacija prostorne rezolucije mikrofonskog niza za merenje saobraćajne buke

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković

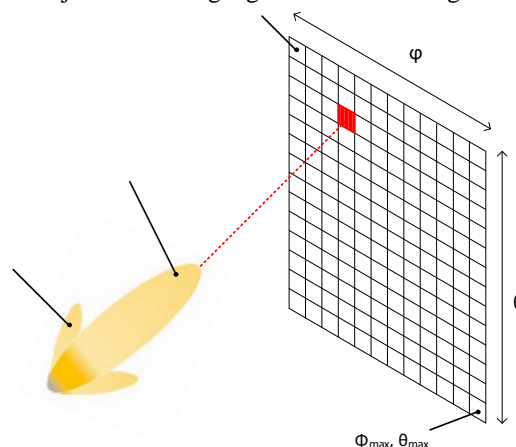
Apstrakt — Merenje saobraćajne buke mikrofonskim nizom omogućava određivanje ugaone raspodele incidentne energije buke na fasadi zgrada. Jedan od osnovnih parametara koji se zadaje u ovakvom merenju jeste ugaona rezolucija kojom se vrši odabiranje u prostornom domenu. S obzirom na računsku kompleksnost algoritma za prostorno-vremensku obradu signala mikrofonskog niza, optimizacija minimalne potrebne prostorne rezolucije omogućava značajno skraćivanje procesa izračunavanja. Merenja prikazana u ovom radu vršena su na četiri lokacije u urbanoj sredini. Lokacije se razlikuju u broju saobraćajnih traka, tipu saobraćaja, udaljenosti objekata, itd. Pretpostavka koja se istražuje u ovom radu jeste da je minimalna potrebna rezolucija mikrofonskog niza različita za svaku od ovih lokacija, i da je dominantno određena morfologijom urbane lokacije. Merenja su vršena mikrofonskim nizom koji čine 24 omnidirekciona mikrofona. Geometrija mikrofonskog niza je optimizovana za merenje saobraćajne buke.

Cljučne reči — mikrofonski niz, rezolucija, saobraćajna buka

I. UVOD

Merenje izvora zvuka mikrofonskim nizom omogućava eksperimentalno utvrđivanje ugaone raspodele incidentne energije [1]. Prilikom tumačenja rezultata ovakvih merenja neophodno je uzeti u obzir fizička ograničenja mikrofonskog niza, odnosno *beam pattern* koga karakterišu dva ključna parametra: širina glavnog loba i potisnutost bočnih lobova. Ova dva parametra su frekvencijski zavisna i određena prvenstveno rasporedom mikrofona, odnosno geometrije mikrofonskog niza. Mikrofonski niz koji je korišćen za merenja prikazana u ovom radu je dvodimenzionalni niz sa 24 omnidirekciona mikrofona čija je geometrija optimizovana za frekvencijski opseg u kom se nalazi saobraćajna buka [2]. Algoritam za eksperimentalno određivanje ugaone raspodele incidentne energije polazi od određivanja doprinosa zvučne energije iz pojedinačnih tačaka zamišljene ekvidistantne mreže tačaka na koju je podeljen prostor ispred mikrofonskog niza. Određivanje doprinosa energije podrazumeva virtuelno usmeravanje glavnog loba mikrofonskog niza i pomeranje od tačke do tačke i merenje energije izlaznog signala. Virtuelno usmeravanje mikrofonskog niza (*beamsteering*) vrši se

nakon usnimavanja 24-kanalnog signala mikrofonskog niza.



Sl. 1. Usmeravanje mikrofonskog niza – *beamsteering*. Zamišljeni grid tačaka skeniranja određenih azimutom (φ) i elevacijom (θ).

Imajući u vidu navedene nesavršenosti mikrofonskog niza (konačna širina glavnog loba i postojanje bočnih lobova koji nisu zanemarljivi), dobija se mapa prostorne raspodele energije koja predstavlja konvoluciju stvarne raspodele izvora zvuka i odziva mikrofonskog niza, stoga se ovakav rezultat naziva „prljava mapa“. Ova mapa služi kao osnov za dalju obradu koja podrazumeva set dekonvolucionih procedura koje imaju za cilj da dobijeni rezultat očiste od uticaja mikrofonskog niza. Dekonvolucionni algoritam koji se koristi u ovom istraživanju je DAMAS2 [3,4,5]. Nakon toga se moguće je odrediti gustinu verovatnoće energije po prostornim uglovima u odnosu na liniju upravnu na ravan fasade, koja služi za proračun izolacione moći pregrade.

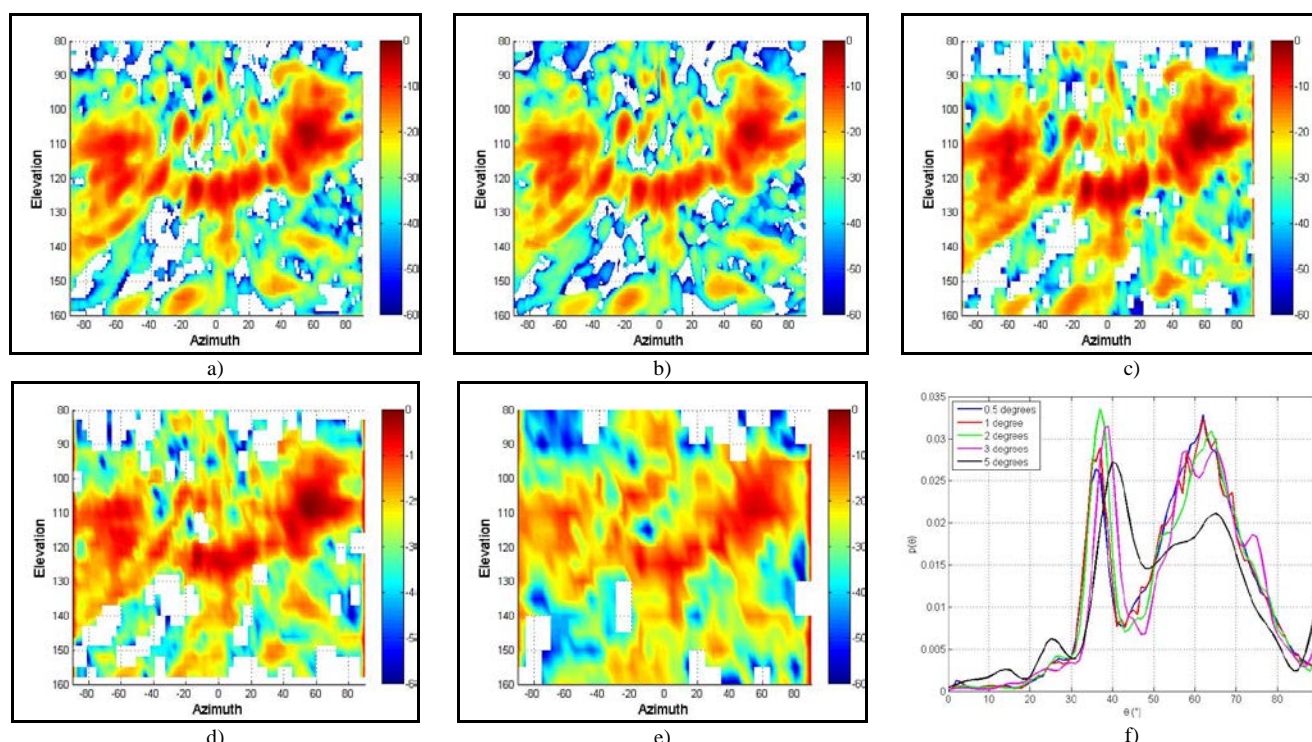
Vremenski najzahtevniji postupak u opisanoj proceduri jeste dobijanje „prljave mape“. Razlog za to je iterativni postupak izračunavanja energetskih doprinosa koji podrazumeva izračunavanje za svaki par azimut-elevacija. S obzirom da je kompleksnost ovog procesa $O(n^2)$, smanjivanje rezolucije odabiranja donosi velike uštede u vremenu potrebnom za izračunavanje.

Pretpostavka koja se istražuje u ovom radu je da minimalna potrebna rezolucija zavisi od karakteristika urbane lokacije na kojoj se vrši merenje: da li je kanjon ulica, udaljenost saobraćajnih traka od fasade objekta (tzv. udaljenost ravni skeniranja r), postojanje raskrsnica i sl. Pretpostavlja se da će dominantan uzrok razlike u minimalnoj potrebnoj rezoluciji na različitim lokacijama biti različita udaljenost ravni skeniranja od fasade objekta na kojoj je postavljen mikrofonski niz. Međutim, istražena je eventualna zavisnost minimalne potrebne rezolucije od drugih parametara lokacije.

Miodrag Stanojević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: miodragstanojevic@bitprojekt.co.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).



Sl. 2. Raspodela incidentne energije po azimutu i elevaciji za događaj prolaska automobila za različite ugaone rezolucije (pomeraje po azimutu i elevaciji): a) $\Delta\phi = \Delta\theta = 0.5^\circ$, b) $\Delta\phi = \Delta\theta = 1^\circ$, c) $\Delta\phi = \Delta\theta = 2^\circ$, d) $\Delta\phi = \Delta\theta = 3^\circ$ i e) $\Delta\phi = \Delta\theta = 5^\circ$. Funkcija gustine verovatnoće incidentne energije za različite ugaone rezolucije.

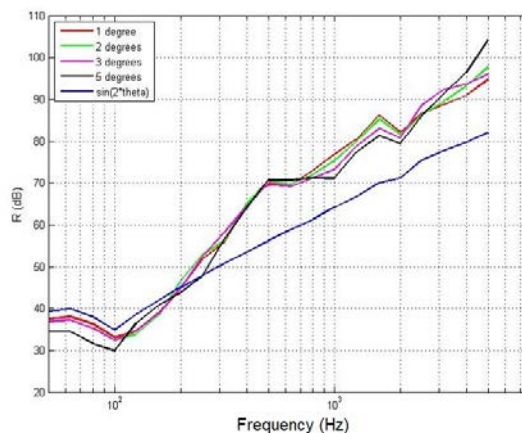
Cilj istraživanja jeste dobijanje formule za određivanje minimalne potrebne rezolucije kojom se ulazi u proračun za datu lokaciju, kako bi se postigla maksimalna efikasnost algoritma i skratilo vreme izračunavanja.

II. METODE

Na slici 2 prikazana je raspodela energije po azimutu i elevaciji za jedan prolazak automobila ispred fasade objekta, za različite vrednosti prostorne rezolucije odabiranja. Na slici f) prikazana je gustina verovatnoće incidentne energije po prostornim uglovima u odnosu na normalu na površinu fasade. Funkcija gustine verovatnoće prikazana je za jedan frekvencijski bin širine 1 Hz opseg oko centralne frekvencije 1000 Hz. Iz oba prikaza se može zaključiti da smanjivanje rezolucije do $\Delta\phi = \Delta\theta = 3^\circ$ ne unosi značajnu grešku u određivanju funkcije gustine verovatnoće incidentne energije. Kako bi se sagledao uticaj na krajnji rezultat, neophodno je izvršiti analizu nad svim frekvencijskim binovima, odnosno proračunati prediktovanu vrednost izolacione moći fasadne pregrade koja je izložena buci sa ovakvom raspodelom [6].

Na slici 3 prikazana je proračunata prediktovana vrednost izolacione moći fasadne pregrade od betona debljine 20 cm. (Parametri pregrade $d = 0.20 \text{ m}$, $m_{sp} = 2500 \text{ kg/m}^3$, $c_l = 3500 \text{ m/s}$, $\eta_i = 0.006$). Prikazane su frekvencijski zavisne vrednosti izolacione moći za rezolucije 1, 2, 3 i 5 stepeni, kao i teoretska vrednost proračunata za oblik raspodele incidentne energije $\sin(2\theta)$. Na slici se može uočiti da su proračunate vrednosti u određenim frekvencijskim opsezima i do 8 dB za različite vrednosti ugaone rezolucije. Međutim, kada se posmatraju jednobrojne vrednosti izolacione moći (Tabela 1), uočava se da je razlika između različitih rezolucija sa kojima se ulazi u proračun zanemarljiva. U svim slučajevima izolaciona moć proračunata na osnovu realnih raspodela energije podmašuje teoretsku vrednost u

frekvencijskom opsegu oko frekvencije koincidencije, a premašuje u opsegu iznad oko 300 Hz. Jednobrojne vrednosti izolacione moći proračunate na osnovu realnih raspodela energije premašuju teoretsku vrednost u svim slučajevima.



Sl. 3. Izolaciona moć fasadne pregrade za različite vrednosti ugaone rezolucije. Struktura pregrade – beton 20 cm.

$\Delta\phi = \Delta\theta$	R'_{-w} (dB)
1°	60
2°	60
3°	59
5°	59
$p(\theta) = \sin(2\theta)$	58

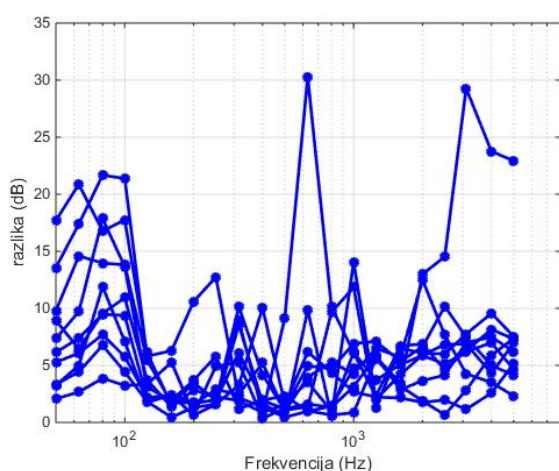
Tabela 1. Jednobrojne vrednosti izolacione moći fasadne pregrade za različite vrednosti ugaone rezolucije. Struktura pregrade – beton 20 cm.

Prikazano poređenje izvršeno je na bazi jednog događaja na jednoj lokaciji u gradskoj sredini. Kako bi se izveli generalni zaključci analiza je proširena na veći broj lokacija, događaja i tipova događaja.

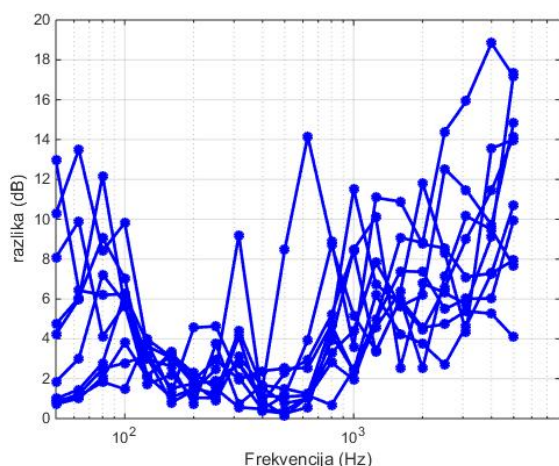
U prethodnim istraživanjima pokazano je da se prostorna raspodela energije na lokaciji može utvrditi analizom ključnih događaja, te da je globalna raspodela energije na lokaciji funkcija raspodela pojedinačnih događaja [7]. Stoga je analiza prikazana u ovom radu sprovedena nad setom od 10 ključnih događaja za četiri različite lokacije u gradskoj sredini. Pet događaja koji su predstavljaju pomeranje dominantnog zvučnog izvora na lokaciji (saobraćaj – automobili, trojelbusi autobusi) i pet događaja koji predstavljaju ambijentalni fon prisutan na lokaciji bez dominantnih izvora zvuka koji se izdvajaju po energiji.

III. REZULTATI

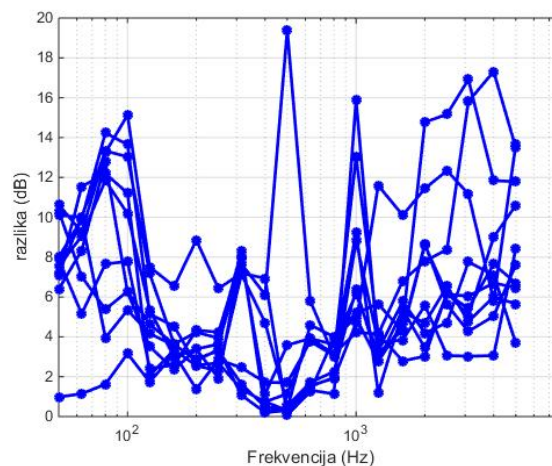
Na slici 4 je prikazana razlika između maksimalne i minimalne dobijene vrednosti izolacione moći po frekvencijama za 10 događaja na lokaciji Bulevar Kralja Aleksandra.



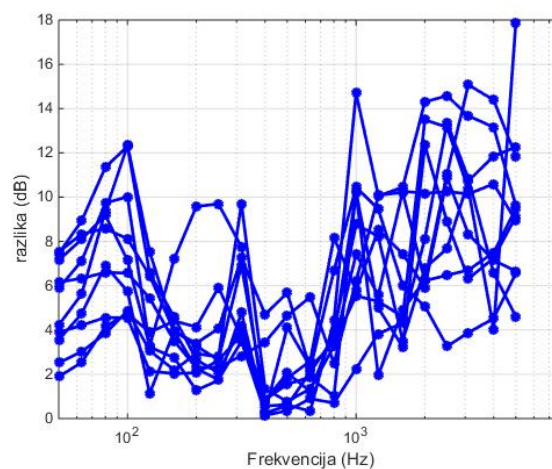
Sl. 4. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Bulevar Kralja Aleksandra



Sl. 5. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Cara Nikolaja II



Sl. 6. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Ilije Garašanina



Sl. 7. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Molerova

IV. DISKUSIJA

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Measurements of noise energy angular distribution at the building envelope using microphone arrays, *Applied Acoustics*, Vol 140, 283-287 (2018).
- [2] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 141(5), 3101-3104 (2017).
- [3] T.F. Brooks, W.M. Humphreys, „A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays“, *Journal of Sound and Vibration* 294.4, 856-879, 2006.
- [4] R.P. Dougherty, „Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming“, *AIAA*, 2961.11, 2005.
- [5] K. Ehrenfried, L. Koop, „A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources“, *AIAA journal*, 45.7:1584-1595, 2007.
- [6] H. Kurtović, „Priručnik za proračun zvučne izolacije“. Beograd: Elektrotehnički fakultet, Laboratorija za akustiku, 1994.
- [7] Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Tatjana Miljković, Određivanje ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada na bazi izdvojenih karakterističnih

dogadaja, Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN, Beograd, Septembar 2020, str. AK2.2.1-AK1.2.6, ISBN: 978-86-7466-852-8.

- [8]
- [9] C.Brutel-Vuilmet, C.Guigou-Carter, M.Villot, „A Study of the Influence of Incidence Angle on Sound Reduction Index Using NAH-Phonoscopy. Acta Acustica United with Acustica, 2007;Vol. 93: 364–374.
- [10] D. Šumarac Pavlović, F. Pantelić, S. Bojičić, M. Bjelić, „Airborne sound insulation of monolithic partition as a function of incidence angles“, Proc. Forum Acusticum, Krakow 2014.
- [11] G.Vermeir, G.Geentjens, W.Bruyninckx, „Measurement and calculation experiences on façade sound insulation“, Proc INTER-NOISE 2004.
- [12] ISO 140-5 „Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades“.
- [13] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Određivanje uglova incidencije buke u urbanim sredinama“, ETRAN, Kladovo, jun 2017, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.1, ISBN: 978-86-7466-692-0.
- [14] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza“, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Doktorska disertacija, jun 2018.
- [15] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke u urbanim uslovima“, ETRAN, Palić, jun 2018, Zbornik radova 49-54, ISBN: 978-86-7466-752-1.
- [16] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadama zgrada u urbanim uslovima pomoću mikrofonskog niza“, 26th Telecommunications forum TELFOR 2018, Belgrade, November 2018, CD Proceedings paper No. 8.9., ISBN: 978-1-5386-7170-2.
- [17] ISO 717-1:1996 „Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation“.
- [18] C. Buratti, E. Belloni, E. Moretti, “Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions“, Appl. Acoust. 2014;76:238–248.
- [19] J. Hald and J. Christensen, „A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances“, J. Acoust. Soc.Am. 112, 2448, DOI: 10.1121/1.4780077. (2002).
- [20] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Dizajn mikrofonskog niza optimizovanog za monitoring saobraćajne buke“, ETRAN, Zlatibor, jun 2016, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.2, ISBN: 978-86-7466-618-0.
- [21] U. Michel, “History of acoustic beamforming”, Berlin, 2006. Berlin Beamforming Conference.
- [22] L. Beranek, “Noise Reduction. New York”: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.
- [23]

ABSTRACT

Measurements of the traffic noise using microphone arrays enables the determination of angular distribution of the incident energy on a building façade. One of the parameters which are set in such measurements is the spatial resolution. Considering high computational complexity of space-time algorithms for array signal processing, the optimization of required spatial resolution can reduce the computation process significantly. The measurements shown in this paper were performed on four urban locations. The locations differ in the number of traffic lanes, traffic types, distances to the surrounding buildings, etc. This paper examines the assumption that the minimal required resolution of the microphone array is different for each location, and is dominantly determined by the urban location morphology. The measurements were performed with a microphone array comprised of 24 omnidirectional microphones. The geometry of the microphone array is optimized for traffic noise measurements.

Microphone array spatial resolution optimization for traffic noise measurements

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković

Komparativna analiza akustičkih signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem mapiranih u slike bazirane na spektrogramu

Marko Milivojčević, Emilija Kisić, Dejan Ćirić

Apstrakt—Motori sa unutrašnjim sagorevanjem kao i druge vrste motora i mašina pri svom radu generišu zvuk. On se karakteriše specifičnim svojstvima zavisno od vrste motora, moda rada, kao i stanja samog motora. Na osnovu zvuka moguće je izvući značajne informacije o motoru, uključujući i detekciju pogonskog goriva (benzina ili dizela). U tom kontekstu, u ovom radu je izvršena analiza akustičkih signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem posle njihovog prebacivanja (mapiranja) u odgovarajuće slike i to spektrogram, hromagram, gamatonegram i tempogram. Kako sve ove slike imaju formu klasičnog spektrograma, one se u literaturi nazivaju slike bazirane na spektrogramu ili slične spektrogramu. Cilj analize je da se izvrši međusobno poređenje navedenih slika i da se ustanovi koja od njih najbolje prikazuje razliku između signala motora koje pokreće benzin i dizel gorivo. Analiza je izvršena nad bazom od 350 snimljenih signala kako bi se u nastavku istraživanja koristeći izabranu metodu mapiranja signala u slike izvršila klasifikacija pogonskog goriva sa što većom tačnošću pomoću tehnika dubokog učenja.

Ključne reči—Akustičke karakteristike, audio zapis, vremenski domen, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, spektrogram, hromagram, gamatonegram, tempogram.

I. UVOD

Sa razvojem modernih tehnologija i naprednih tehnika dubokog učenja, problemi automatizovane klasifikacije ili detekcije, kao što je prepoznavanje govora ili akustičkih signala, mogu se veoma uspešno rešiti ukoliko se izabere adekvatan algoritam mašinskog učenja i ukoliko se formira kvalitetna baza podataka na osnovu koje će se sistem obući.

Kada je reč o akustičkim signalima, njihovo prepoznavanje predstavlja veoma kompleksan zadatak i za čoveka, pre svega zbog nemogućnosti svih slušaoca da identično čuju odgovarajući signal što je uslovljeno različitim auditivnim karakteristikama svakog od slušaoca. Problem postaje još složeniji uzimajući u obzir da je na osnovu primljenog signala potrebno izvršiti klasifikaciju ili detekciju događaja upotrebom prethodno stečenog iskustva. "Treniranjem sluha", posebno u istom (radnom) okruženju, je moguće postići

Marko Milivojčević – Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, odsek: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: markom@viser.edu.rs).

Emilija Kisić – Univerzitet Metropolitan, Beograd Fakultet informacionih tehnologija, Tadeuša Koščuška 63, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: emilija.kisic@metropolitan.ac.rs).

Dejan Ćirić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

tačniju procenu događaja. Primena automatske klasifikacije/detekcije akustičkih signala za određenu vrstu događaja bi eliminisala nesavršenost čovekovog slušnog aparata, kao i elemente individualne subjektivnosti i manuelnog izvršavanja postupka klasifikacije/detekcije.

Činjenica da motori sa unutrašnjim sagorevanjem generišu zvuk prilikom svog rada, kao i da se taj zvuk perceptivno razlikuje u zavisnosti od pogonskog goriva, a sa dodatnom potrebom da se pogonska goriva klasifikuju iz ekoloških razloga [1], poslužila je kao motiv za razvoj sistema automatske klasifikacije baziran na audio snimcima rada motora.

U cilju realizacije jednog ovakvog sistema bilo je potrebno razviti akvizicioni sistem za prikupljanje audio signala. Ovi signali će formirati bazu uzoraka na osnovu koje će se sistem obući nekim od algoritama mašinskog, odnosno dubokog učenja. Pomenuti akvizicioni sistem za snimanje uzoraka koristi mikrofonski pozicioniran u oblasti ispod motornog prostora putničkog vozila [2, 3] pošto se detektuje prisustvo vozila iznad mikrofona. Nakon toga, dodatnom obradom u vremenskom domenu vrši se izdvajanje režima praznog hoda motora. Kako je u režimu praznog hoda motora slušanjem utvrđena najveća razlika između pogonskih goriva, dodatna obrada je poslužila da se u banci uzoraka nađu samo audio zapisi takvog režima rada motora, pri čemu je detaljan prikaz postupka izdvajanja željenog režima rada motora prikazan u prethodnim fazama ovog istraživanja [4].

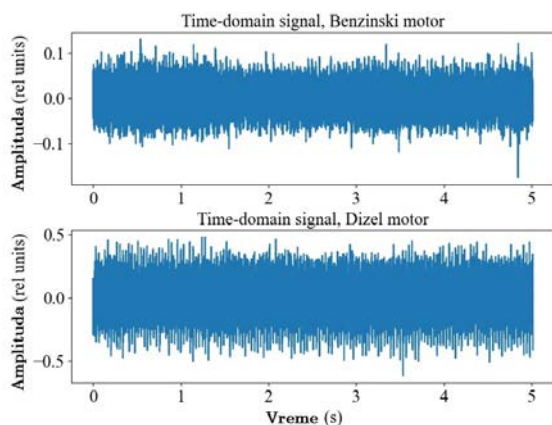
U ovom radu je izvršena komparativna analiza signala iz baze uzoraka mapiranjem signala u slike na bazi spektrograma. Osnovni motiv za analizu akustičkih signala mapiranih u slike bazirane na spektrogramu je visoka uspešnost klasifikacije na osnovu signala predstavljenih na ovaj način, videti na primer [5]. Krajnji cilj ovog istraživanja je izdvajanje onog prikaza koji daje dovoljno malu razliku unutar istog pogonskog goriva motora (benzin ili dizel), a ujedno najveću razliku između pogonskih goriva kako bi se u budućoj klasifikaciji pravilno formirala hijerarhija obeležja na osnovu kojih će se vršiti klasifikacija.

Rad je podeljen u više poglavlja. Karakteristični slučajevi prikupljenih audio signala i metode njihove obrade su prikazani u poglavlju gde je opisana metodologija. U poglavlju gde su opisani rezultati prikazani su karakteristični signali mapirani u slike u obliku spektrograma, hromograma, gamatonegrama i tempograma. Zaključci komparativne analize dobijenih prikaza su sumirani u poglavlju koje sledi,

iza kojeg je dat spisak korišćene literature.

II. METODOLOGIJA

Prikupljanjem audio signala generisanih radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem u realnim uslovima formirana je baza od 350 uzoraka. Preslušavanjem baze i analizom vremenskog oblika signala izdvojen je po jedan karakterističan signal rada benzinskog i jedan signal rada dizel motora u režimu praznog hoda radi lakše ilustracije i predstavljanja rezultata. Kao predstavnici svojih klasa ova dva signala su uporedno analizirana i mapirana u slike bazirane na spektrogramu. Vremenski oblici analiziranih uzoraka su prikazani na Sl. 1.



Sl.1. Vremenski oblik audio signala benzinskog i dizel motora

A. Spektrogram

Jedna od tehnika za mapiranje akustičkih signala u sliku koja je korišćena u ovom radu je ona koja kao rezultat daje spektrogram. Ovakva vrsta slike je veoma pogodna reprezentacija signala, zato što se pomoću nje signal predstavlja u tri dimenzije: na horizontalnoj osi prikazuje se vreme, na vertikalnoj osi prikazuje se frekvencija, dok se amplituda predstavlja skalom boja. Spektrogram se može zamisliti kao grupa spektara signala poređanih jedan do drugog, gde je jačina spektralnih komponenti predstavljena intenzitetom boje. Spektrogram zapravo predstavlja kratkovremensku brzu Furijeovu transformaciju (eng. *short time fast Fourier transform*- STFT) [6], i računa se kao brza Furijeova transformacija (eng. *fast Fourier transform*-FFT) na pomerajućem prozoru podataka.

Osnovna ideja kod spektrograma jeste da se ceo signal podeli na segmente (okvire, odnosno frejmove, eng. *frame*) sa preklapajućim kratkovremenskim prozorima i da se zatim primeni FFT na svaki segment. Korišćenje spektrograma je veoma važno kod signala koji su kvazi-stacionarni, odnosno kod signala kod kojih postoji stacionarnost, ali samo na dovoljno kratkim odseccima signala. Zbog toga, umesto standardne Furijeove transformacije koja transformiše signal iz vremenskog domena u frekvencijski domen (spektar), kod obrade akustičkih signala se uglavnom koristi vremenski kratkotrajna Furijeova transformacija. Njena glavna prednost jeste da se spektralna analiza sprovodi nad kratkim odseccima

signala kod kojih je zadovoljen uslov stacionarnosti.

Izdvajanje takvih odsečaka se sprovodi primenom vremenskih prozora, koji su različiti od nule samo za konačan skup indeksa. Množenjem ulaznog signala sa takvim vremenskim prozorom postavljenim na željeno mesto u signalu, dobija se novi signal takođe beskonačnog trajanja, ali čiji su uzorci jednaki nuli za sve indekse signala koji se nalaze izvan primenjenog vremenskog prozora.

Neka je akustički signal dužine N odmeraka označen kao $s[n]$. Spektrogram akustičkog signala predstavlja funkciju i vremena i frekvencije što se može zapisati kao:

$$STFT[f, t] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot w[n] e^{-j2\pi f n} \quad (1)$$

gde f predstavlja frekvenciju, n vremenski argument spektrograma, a $w[n]$ je prozorska funkcija.

U ovom radu za računanje spektrograma signala korišćena je *stft* funkcija u okviru biblioteke *librosa* u programskom jeziku *Python*. Podela signala na segmente (okvire) je već implementirana unutar funkcije. Potrebno je definisati širinu prozora W , zatim korak analize K (odnosno veličinu preklapanja prozora), kao i broj tačaka M u kojima se računa Furijeova transformacija. Drugim rečima, funkcija *stft* deli akustički signal na preklapajuće okvire (gde se definiše širina prozora i veličina preklapanja), zatim za svaki od okvira računa FFT u onom broju tačaka koji se zada, a na spektrogramu se mogu pročitati informacije o vremenu, frekvenciji i amplitudi željenog signala. U ovom radu za širinu prozora je izabrano $W=2048$, preklapanje prozora je $K=512$, a broj tačaka za računanje Furijeove transformacije je $M=2048$. Izabrana prozorska funkcija je *Hann*-ova prozorska funkcija.

B. Hromagram

Hromagram (hroma spektar) predstavlja veoma moćnu reprezentaciju audio signala u kojoj se ceo spektar projektuje na 12 binova koji predstavljaju 12 različitih polutonova (ili hroma) muzičke oktave [1].

Pošto se u muzici note koje su udaljene za tačno jednu oktavu doživljavaju kao posebno slične, poznavanje raspodele hroma čak i bez apsolutne frekvencije (tj. originalne oktave) može dati korisne muzičke informacije o zvuku, odnosno može otkriti uočenu muzičku sličnost koja nije vidljiva u originalnim spektrima.

Hromagram se dobija preslikavanjem diskretnih vrednosti dobijenih kratkotrajnom brzom Furijeovom transformacijom (STFT) audio signala u 12 hroma, odnosno prelaskom iz domena diskretnih frekvencija u domen diskretnih veličina hroma.

C. Gamatonegram

Spektrogram je tradicionalna vremensko-frekvencijska vizualizacija, ali zapravo ima nekih važnih razlika u odnosu na to kako se zvuk analizira od strane ljudskog uva. Najznačajnija razlika je to što frekvencijski podopsezi uva postaju širi na većim frekvencijama, dok spektrogram ima

konstantan propusni opseg na svim frekvencijama, odnosno u svim frekvencijskom opsezima (kanalima). Kako bi se ovo ograničenje prevazišlo može se koristiti *Gama-spektrogram*, zasnovan na primeni gamatone filtera, odnosno *gamatonegram* [8].

Gamatone filteri su dizajnirani tako da modeluju frekvencijski selektivne kohlea aktivacione odzive ljudskog unutrašnjeg uva [9], pri čemu izlaz filtra simulira frekvencijski odziv bazilarne membrane. *Gamatone* filter je linearni filter opisan impulsnim odzivom koji je proizvod gama raspodele i sinusoidalnog tona. Impulsni odziv filtra dat je sledećom jednačinom:

$$g[k] = k^{P-1} T^{P-1} e^{-2bkT\pi} \cos(2fkT\pi + \theta) \quad (2)$$

gde je k vreme, P je red filtra, T je perioda odabiranja, b je propusni opseg filtra, f je centralna frekvencija, a je θ faza nosioca. *Gamatone* filteri se koriste za modelovanje ljudskog slušnog sistema i sastoje se od niza filtera propusnika učestanosti. Banka *gamatone* filtera je formulisana kao ERB (eng. *equivalent rectangular bandwidth*) skala [10] na sledeći način:

$$ERB = 24.7 \left(4.37 \cdot 10^{-3} f + 1 \right) \quad (3)$$

Kako bi se generisao gamatonegram u ovom radu korišćen je toolbox razvijen od strane Ellis at al. [8], primenjen u programskom jeziku Python. Prvo je akustički signal transformisan u STFT spektrogram, kao što je gore opisano. Zatim je primenjeno *gamatone* ponderisanje $COE[F_{gam}, F]$ na STFT kako bi se dobio gamatonegram:

$$GAM[F_{gam}, T] = COE[F_{gam}, F] \times STFT[F, T] \quad (4)$$

gde je F_{gam} rezolucija gamatonegrama (GAM spektrograma) i predstavlja broj gamatone filtera [11]. U ovom radu je broj gamatone filtera 64.

D. Tempogram

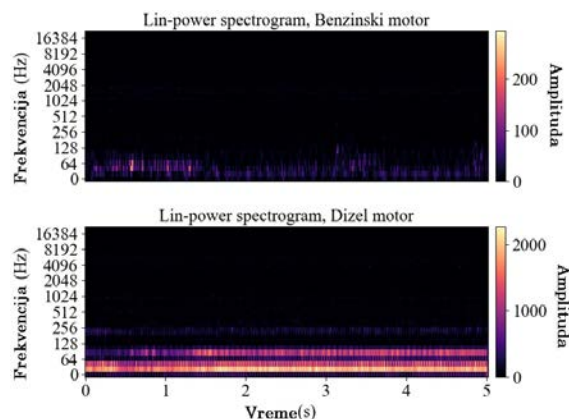
Slično spektrogramu, tempogram se definiše kao vremenska-tempo reprezentacija, odnosno tempo datog signala koji zavisi od vremena [12]. Tempogram signala je reprezentacija koja sadrži informaciju o lokalnom tempu za svaki frejm audio sigala. Postoje dva tipa tempograma: Furijeov tempogram i autokorelacioni tempogram. Furijeov tempogram konvertuje frekvenciju u tempo (eng. *beat per minute* - BPM) naglašavajući harmonike, dok autokorelacioni tempogram konvertuje vremensko kašnjenje (sekunde) u tempo, ističući subharmonike. U ovom radu korišćen je ciklični tempogram pomoću *libros*-a biblioteke u Python programskom jeziku. Ciklični tempogram se dobija iz Furijeovog i autokorelacionog tempograma [12].

III. REZULTATI ANALIZE

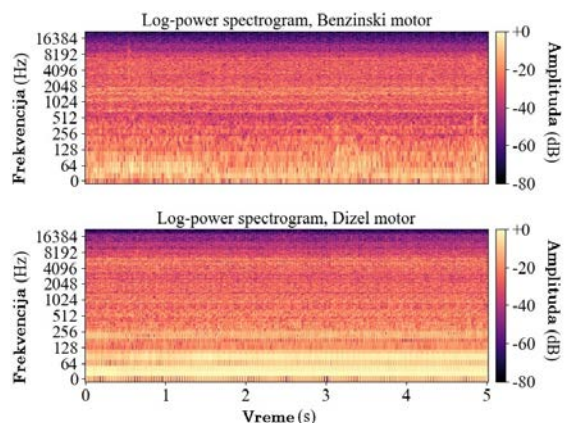
Kako je akvizicioni sistem razvijen tako da kao krajnji

rezultat prikupljanja audio zapisa izdvaja i čuva samo režim praznog hoda motora, predmet analize nisu bili signali sa promenljivim režimom rada. Primenom predstavljenih metoda za analizu iz prethodnog poglavlja, mapiranje signala je realizovano na karakterističnim signalima dobijenim radom benzinskog i dizel motora isključivo u režimu praznog hoda čiji su vremenski oblici prikazani na Sl. 1.

Na Sl. 2. je prikazan spektrogram gde je nivo signala predstavljen u linearnoj razmeri, dok je na Sl. 3. takođe prikazan spektrogram istih signala pri čemu je snaga signala predstavljena u logaritamskoj razmeri.



Sl. 2. Spektrogrami signala u linearnoj razmeri (*lin-power* spektrogrami)



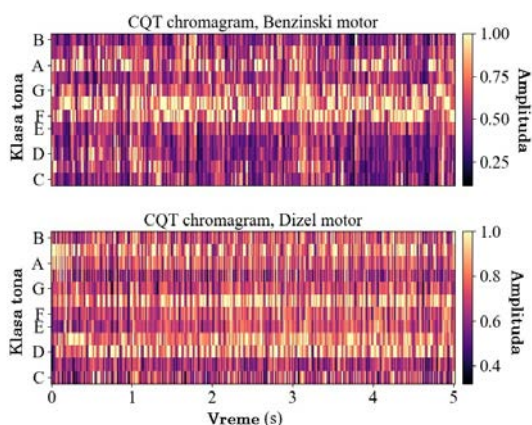
Sl. 3. Spektrogrami signala u logaritamskoj razmeri (*log-power* spektrogrami)

Analizom signala prikazanih u vidu spektrograma sa linearnom razmerom na Sl. 2. može se uočiti višestruka razlika signala između motora na benzin i dizel. Spektrogram benzinskog motora ima gotovo desetostruko niži nivo signala, dok spektrogram dizel motora pored višeg niva signala poseduje i izražene komponente na višim frekvencijama u odnosu na benzinski motor. Kod dizel motora se može uočiti neprekidnost spektrograma, posebno na osnovnoj učestanosti rada motora.

Prikazom ova dva signala u vidu spektrograma sa logaritamskom razmerom dobija se detaljniji prikaz spektralne raspodele signala, sl. 3. Na ovoj slici se takođe može uočiti viši nivo signala i veća gustina spektra dizel motora na nižim učestanostima. Pored ove osobine signala dobijenog radom dizel motora, koji odgovara percepciji slušaoca, da ovaj tip

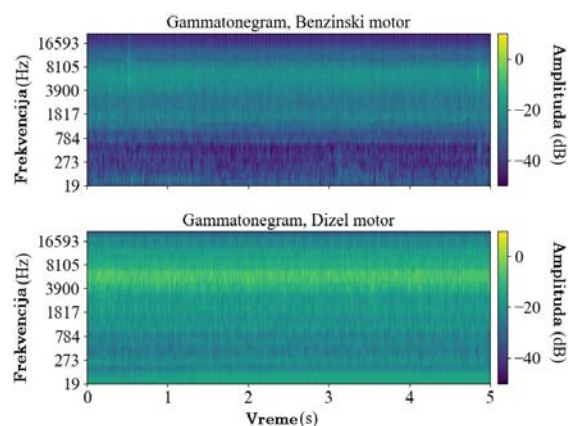
motora radi „dublje“, može se uočiti ravnomernija „popunjenost“ spektra sve do visokih frekvencija, dok se kod benzinskog motora posebno na približno 500 Hz može uočiti niži nivo signala. Kod signala generisanog radom benzinskog motora je i u oblasti visokih učestanosti, preko 10 kHz nivo signala niži, što odgovara percepciji slušaoca da prilikom dugog izlaganja buci dizel motora dolazi ranije do zamaranja slušaoca. Ova karakteristika generisanog zvuka se može potvrditi i analizom zvučne izolacije koja se ugrađuje na identičan tip putničkog vozila pokretanog različitim motorima, gde je zvučna izolacija dizel motora u najvećem broju slučajeva zbog komfora bolje izvedena.

Rezultat primene funkcija za određivanje hromograma za izabrane karakteristične signale rada benzinskog i dizel motora u praznom hodu je prikazan na Sl. 4. Na dobijenom prikazu može se uočiti da je kod dizel motora zastupljenost različitih visina tj. klasa tonova kroz čitav opseg od svih dvanaest klasa, gotovo uniforman, pri čemu su najistaknutije klase D, D#, F# i A#, dok su kod benzinskog motora izražene klase F, F#, G i A. Na osnovu ovakvog prikaza signala moguće je uočiti da su kod benzinskog motora zastupljenije osnovne klase tonova dok su kod dizel motora zastupljenije povišene/snižene klase tonova.



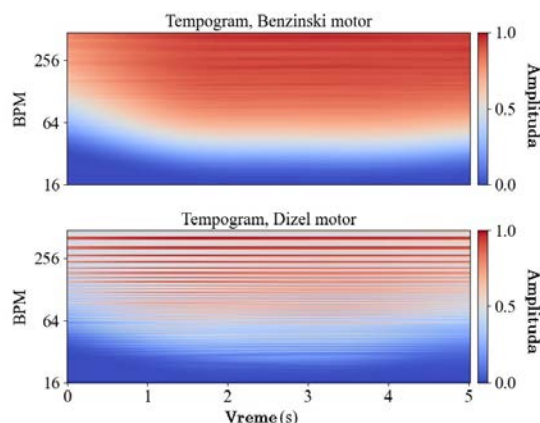
Sl. 4. Hromagram benzinskog i dizel motora

Primenom gamatone filtera prilikom proračuna spektrograma za posmatrane signale dobijen je gamatonegram koji je prikazan na Sl. 5. Na prikazanom gamatonegramu jasno je moguće uočiti razliku između dva pogonska goriva. Kod dizel motora nivoi signala su viši na svim frekvencijama, a posebno je istaknut opseg 4-8 kHz, kao i opseg niskih frekvencija gde se nalazi osnovna učestanost rada motora. Kod benzinskog motora je moguće uočiti veoma nizak nivo signala u opsegu ispod 1 kHz i iznad 10 kHz. Kako je gamatonegram posebno prilagođen ljudskom uvu, dobijeni prikazi odgovaraju percepciji „glasnijeg“ dizel motora bez obzira na mereni nivo signala instrumentom.



Sl. 5. Gamatonegram benzinskog i dizel motora

U okviru analize izabranih audio signala posebna pažnja je posevećena percepciji slušaoca koja se odnosi na utisak veće ili manje ujednačenosti rada motora odnosno doživljaja tempa rada motora. Rezultat proračuna tempograma u vremenu prikazan je na Sl. 6. Na prikazanom tempogramu su razlike između benzinskog i dizel motora veoma jasno vidljive. Kod dizel motora tempogram je jasno definisan kao posledica koncentracije energije signala u okolini odgovarajućih učestanosti, dok kod benzinskog motora postoji uniformna raspodela amplituda kroz čitav opseg frekvencija.



Sl. 6. Tempogram benzinskog i dizel motora

IV. ZAKLJUČAK

Primenom akvizicionog sistema prilagođenog prikupljanju audio zapisa generisanih radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem, prikupljeno je 350 uzoraka. Izvršeno je izdvajanje isključivo režima praznog hoda, kao režima u kome je slušaocu najjednostavnije da samo na osnovu zvuka utvrdi razliku između pogonskih goriva. Prikupljeni uzorci su analizirani u cilju pronalazjenja i reprezentacije razlika koje bi omogućile primenu automatske klasifikacije upotrebom mašinskog i/ili dubokog učenja.

Prikupljanje uzoraka i klasifikacija se realizuju u realnim uslovima, što je stvorilo potrebu da se pronađu parametri na osnovu kojih će biti moguće razlikovati pogonska goriva bez obzira na okolnu buku. U ovom radu je korišćen metod mapiranja audio signala u slike bazirane na spektrogramu.

Odgovarajućim odabirom tipa prikaza kao i parametara izračunavanja dobijene su slike na kojima je moguće jasno uočiti razlike između pogonskih goriva.

U poglavlju rezultati su dati uporedni prikazi za benzinski i dizel motor na primeru dva karakteristična audio signala. Prikazani spektrogrami signala daju uočljivu razliku kako za prikaz u linearnoj tako i za prikaz u logaritamskoj razmeri, pri čemu prikaz u logaritamskoj razmeri daje mogućnost detaljnije analize nivoa signala po frekvencijama (Sl. 2 i 3). Za oba prikaza dizel motor ima veću energiju skoncentrisanu na nižim učestanostima. Mapiranjem signala u hromagram takođe su dobijene jasno uočljive razlike u pogledu pogonskih goriva (Sl. 4). Na osnovu hromograma uočljivo je da dizel motor generiše zvuk gotovo podjednako zastupljen na svim klasama tonova, pri čemu su više istaknute klase povišenih/sniženi tonova u odnosu na benzinski motor gde su istaknutije kase osnovnih tonova. Generisanjem gamatonegrama moguće je uočiti razliku koja se pre svega odnosi na nivo signala u čitavom opsegu, koji je kod dizel motora evidentno viši (Sl. 5). Izračunavanjem tempograma (Sl. 6) moguće je kod dizel motora uočiti jasnu koncentraciju energije za odgovarajuće nivoe tempa, dok je kod benzinskog motora tempogram gotovo uniforman.

Dobijene razlike za izdvojene parametre pružaju mogućnost binarne klasifikacije pogonskih goriva što predstavlja nastavak ovog istraživanja i budući rad za koji je bilo neophodno izvršiti ovakvu analizu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući gospodinu Neđi Petijeviću ispred firme Novi Dom doo u Beogradu koji je omogućio pristup ulaznoj rampi podzemne garaže uz poštovanje svih bezbednosnih procedura. Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, evidencioni broj 451-03-68/2022-14/200102.

LITERATURA

- [1] G.P. Chossière, R.Malina, F. Allroggen, S. D. Eastham, R.L. Speth, S.R.H. Barrett, "Country- and manufacturer-level attribution of air quality impacts due to excess NO_x emissions from diesel passenger vehicles in Europe", *Atmospheric Environment*, Volume 189, Pages 89-97, September 2018.
- [2] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Comparison of frequency characteristic of sound generated by internal combustion engines depending on fuel," *Proc. 26th Noise and Vibration*, Niš, Serbia, pp. 115-120, 6-7 December 2018.
- [3] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Pozicioniranje mikrofona prilikom snimanja audio karakteristika motora putničkih vozila" *Proc. 63rd National Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering ETRAN*, Srebrno Jezero, Serbia, pp. 58-62, 3-6 June 2019.

- [4] M. Milivojčević, D. Ćirić, „Izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika motora sa unutrašnjim sagorevanjem“ *Proc. 64rd National Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering ETRAN*, Belgrade, Serbia, 2020.
- [5] D. Ćirić, Z. Perić, J. Nikolić, N. Vučić, "Audio Signal Mapping into Spectrogram-Based Images for Deep Learning Applications," *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 2021, pp. 1-6.
- [6] F. A. Andrade, I. Esat, and M.N.M. Badi, "Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods (STFT and Wigner-Ville distribution) and harmonic wavelet-A comparative study," in *Proceedings of the COMADEM '99*, Chipping Norton, pp. 77-85, 1999.
- [7] Mark A. Bartsch, Gregory H. Wakefield, "Audio thumbnailing of popular music using chroma-based representations," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 7, no. 1, pp. 96-104, 2005.
- [8] Daniel PW Ellis, "Gammatone-like spectrograms," web resource: <http://www.ee.columbia.edu/dpwe/resources/matlab/gammatonegram>, 2009.
- [9] Roy D Patterson, "Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency resolution," *Frequency selectivity in hearing*, 1986.
- [10] Brian R Glasberg and Brian CJ Moore, "Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data," *Hearing research*, vol. 47, no. 1-2, pp. 103-138, 1990.
- [11] Nguyen, Anh & Phan, Ben & Tran, Khoa & Nguyễn, Trùng. (2020). *Deep Learning Framework Applied for Predicting Anomaly of Respiratory Sounds.*
- [12] Grosche, Peter, Meinard Müller, and Frank Kurth. "Cyclic tempogram - A mid-level tempo representation for music signals." *ICASSP*, 2010.

ABSTRACT

Internal combustion engines as well as other types of engines and machines generate sound during their operation. It is characterized by specific properties depending on the type of engine, operating mode, as well as the condition of the engine itself. Based on the sound, it is possible to extract important information about the engine, including the detection of fuel (gasoline or diesel). In that regard, in this paper, the analysis of acoustic signals of internal combustion engines is performed after their mapping into the appropriate images, namely spectrogram, chromagram, gammatonegram and tempogram. As all these images have the form of a classical spectrogram, they are called in the literature images based on a spectrogram or similar to a spectrogram. The aim of the analysis is to compare the above images and to determine which of them best shows the difference between the signals of the engine that runs on gasoline and diesel fuel. The analysis is performed on a database of 350 recorded signals, so that in the continuation of the research, using the selected method of mapping the signals into images, the fuel classification will be performed with the highest possible accuracy using deep learning techniques.

Comparative analysis of acoustic signals generated by internal combustion engines mapped into spectrogram-based images

Marko Milivojčević, Emilija Kisić, Dejan Ćirić

Koeficijent inharmoničnosti tonova harfe – Specifičnost i problemi automatske procene

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt—Ovaj rad bavi se karakterizacijom tona harfe i predstavlja nastavak istraživanja vezanih za karakterizaciju tonova žičanih instrumenata. Karakterizacija tona harfe bazirana je pre svega na proceni koeficijenta inharmoničnosti. Inharmoničnost je svojstvo tonova žičanih instrumenata i ogleda se u odstupanju frekvencija parcijala od vrednosti celobrojnih umnožaka osnovne frekvencije. Preciznost automatskog određivanja koeficijenta inharmoničnosti B otežano je postojanjem „fantomskih“ parcijala koji su posledica različitih fizičkih procesa koji zavise od konstrukcije instrumenta, načina pobude, kao i materijala od kojih su žice napravljene. Kao posledica konstrukcije instrumenta i načina zatezanja žice, kod harfe su veoma izraženi višestruki pikovi u spektru koji otežavaju automatsko izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti. Koeficijent B je procenjen uz pomoć PFD algoritma i upoređen sa vrednostima koje su procenjene uz pomoć namenski napravljenog alata za manuelnu procenu. Vrednosti koeficijenata B za harfu upoređeni su sa vrednostima koeficijenta B kod klavira i čembala.

Ključne reči—Inharmoničnost parcijala, harfa, procena spektra, „fantomski“ parcijali

I. UVOD

Muzički ton karakteriše diskretan spektar sa harmonijskim raspoređenim komponentama na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije. Jedna od specifičnosti tonova žičanih instrumenata je pojava inharmoničnosti parcijala koja se ogleda u odstupanju frekvencija parcijala od harmonijskog niza. Ovo svojstvo je prisutno kod svih žičanih instrumenata, ali je kod nekih manje ili više izraženo. Konstrukcija instrumenta, dužina žice, materijal od koga je žica napravljena, način okidanja žice, kao i način pričvršćivanja i zatezanja dovode do različitih fizičkih procesa koji za posledicu imaju odstupanje frekvencija modova od pravilnog harmonijskog niza.

Druga osobina spektra tonova žičanih instrumenata je prisustvo parazitnih diskretnih komponenti koji su posledica više različitih faktora: sprežanja oscilovanja susednih žica, sprežanja oscilovanja žice sa drugim rezonantnim sistemima, kao i nelinearne pojave koje prouzrokuju pojavu takozvanih „fantomskih“ parcijala [1-3]. U slučaju harfe koja je predmet

analize u ovom radu, veoma su izraženi skoro svi nabrojani faktori koji kao posledicu imaju dodatne komponente u spektru tonova koje su tema brojnih istraživanja [1-5].

Usled transversalnih vibracija javljaju se nelinearnosti u procesu oscilovanja koji kao posledicu imaju pojavu takozvanih „fantomskih“ parcijala [3, 6]. Fantomski parcijali se pojavljuju kao zbrovi inharmoničnih parcijala nižeg reda ili kao dvostruke vrednosti parnih harmonika. Posledica dodatnih pikova u spektru u okolini inharmoničnih modova prouzrokuje amplitudsku modulaciju anvelope harmonika koja utiče na boju zvuka. Kod različitih žičanih instrumenata postoje manje ili više izraženi pojedini efekti koji utiču na formiranje prepoznatljive boje zvuka određenog instrumenta. Navedeni artefakti spektra dodatno usložnjavaju njegovu prirodu, što za posledice ima komplikacije prilikom procene koeficijenta inharmoničnosti.

U cilju karakterizacije tonova žičanih instrumenata na osnovu koeficijenta inharmoničnosti neophodno je obuhvatiti ceo registar instrumenta. S obzirom da se registri instrumenata razlikuju, kao i da ih čini mnoštvo tonova uglavnom od 80 do 100, potrebno je izvršiti automatizaciju procesa procene koeficijenta inharmoničnosti. U literaturi postoje različite metode i algoritmi za procenu koeficijenta inharmoničnosti [7,8,9]. Uglavnom se automatska procena koeficijenta inharmoničnosti zasniva na proceni diskretnih inharmonijskih parcijala u spektru. Procena takvih parcijala iz spektra tona često je otežana zbog prisustvu brojnih izraženih spektralnih komponenti u blizini inharmoničnih parcijala. U ovom radu razmatrani su specifičnosti automatske procene koeficijenata inharmoničnosti, kao i problemi koji su doveli do otežane realizacije automatske procene.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju rada prikazana je konstrukcija i način proizvodjenja tonova različitih tonskih visina, kao i karakteristike spektra i vremenskog razvoja pojedinih parcijala tonova harfe. U trećem poglavlju prikazana su dva postupka za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Jedan postupak zasniva se na automatskoj proceduri zasnovanoj na PFD (*Partial Frequency Deviation*) algoritmu sa procenom spektra na bazi AR (*Auto Regressive*) modela, a drugi postupak baziran je na manuelnoj proceni na bazi namenski napravljenog alata. U IV poglavlju prikazani su i diskutovani eksperimentalni rezultati proračuna koeficijenta inharmoničnosti za kompletan registar tonova harfe. Procena je izvršena za sve tri pozicije pedala kao i uporedna analiza automatskog i manuelnog postupka procene. Procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za harfu upoređene su sa vrednostima dobijenim za klavir i čembalo koji su analizirani u prethodnim istraživanjima.

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.bg.ac.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.bg.ac.rs).

Jelena Čertić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: certic@etf.bg.ac.rs).

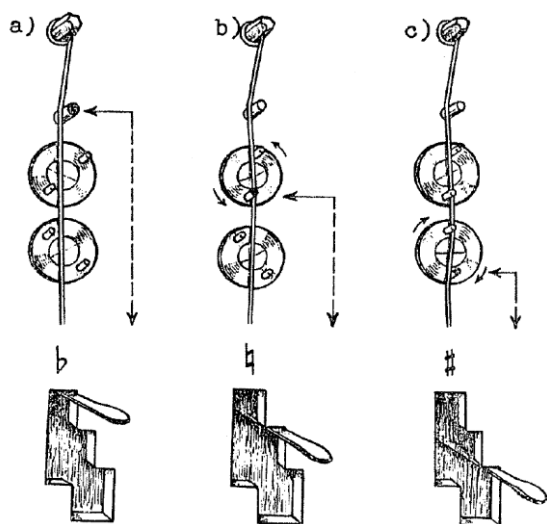
Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.bg.ac.rs).

II. OSNOVNE KARAKTERISTIKE HARFE

A. Konstrukcija harfe

Harfa je instrument u obliku trostranog okvira, visokog oko 180 cm, sa nizom žica razapetih u uspravnoj ravni. Okvir harfe se sastoji iz 5 osnovnih delova. Osnovu instrumenta čini postolje, koje se još naziva pedalijera, jer su u njegovim stepenastim prorezima smešteni pedale za preštimanje žica. Uspravno na postolju stoji šuplji stub, kroz čiju unutrašnjost prolaze čelične poluge koje povezuju pedale sa gornjim delom mehanizma za preštimanje. Drugi krak okvira čini rezonantno telo, koje je takođe šuplje. Zaobljena strana rezonatora je okrenuta nadole i uglavom se izgrađuje od bukovog ili javorovog drveta.

Treću stranu okvira čini drveni vrat. Kroz vrat su provučene čivije – metalni zavrtnji koji drže gornje krajeve žica. Same žice su zakačene s leve strane, a sa desne strane se čivije mogu, posebnim ključem, zatezati ili otpustiti, čime se podešava osnovno štimovanje žica. Zajednicu sa vratom čini most, u kome se između dve mesingane ploče, nalazi gornji deo mehanizma za preštimanje žica. Poluge ovog mehanizma, koje su kroz stub harfe povezane s pedalama u postolju, pokreću 90 bakarnih koturića postavljenih u dvostrukom nizu na spoljnoj levoj strani mosta. Svaki koturić ima po dva mala klina između kojih prolazi žica, a svaku žicu zahvataju po dva takva koturića [10]. Najniže dve do tri žice nemaju ove koturiće. Njihovi tonovi su vrlo retko u upotrebi, pa se pre sviranja štimovanje ključem podesi na onu tonsku visinu koja će biti potrebna. Na slici 1 prikazan je opisani sistem za preštimanje žica na harfi. Takođe, na slici 1 se može uočiti kako se u postolju harfe nalaze 3 stepenasta proreza, koje označavaju da se pedale harfe mogu postaviti u 3 različita položaja.



Sl. 1 Sistem preštimanja žice na harfi; a) položaj 1 – otvorena žica, b) položaj 2 – jedanput skraćena žica, c) položaj 3 – dvaputa skraćena žica [10]

U gornjem položaju pedala je opuštenu i ne deluje na gornji mehanizam, tako da klinovi koturića ne dotiču žicu i ona slobodno osciluje celom svojom dužinom. Ako se pedala pritisne i zakači u srednji položaj, taj se pritisak polugama prenosi do gornjeg od dva koturića i okreće ga za toliko, da njegovi klinovi zahvate žicu. U tom slučaju, njena aktivna

dužina je skraćena, pa žica daje ton viši od osnovnog štimovanja za pola stepena. Pomeranjem u donji položaj, pedala pokreće, posredstvom poluga, i donji koturić, pa njegovi klinovi još više skrate dužinu žice i povise joj ton još za pola stepena. Opisanim postupkom, se iz svake žice mogu izvući po 3 tona različite visine. Time se postiže znatna ušteda u broju žica, što je za spretnost sviranja od velike važnosti.

Jedna pedala mehanizmom zahvata istovremeno žice istoimenih tonova u svim oktavama (npr. G1, G2, G3, G4 itd.) i zahvaljujući preštivanju njihove hromatske varijante. Time je broj pedala sveden na 7. Oni su raspoređeni naspram leve i desne noge svirača i nose ime žica, koje kroz sve oktave, zahvataju [10]. Osnovno štimovanje harfe je dijatonski Ces-dur. Za ostvarenje te lestvice moraju sve žice da osciluju slobodno, celom dužinom, odnosno sve pedale moraju biti u gornjem položaju. Ako su sve pedale u srednjem položaju, dobija se C-dur, a donji položaj svih pedala daje Cis-dur. Kombinacijom različitih položaja pojedinih pedala može da da i bilo koju drugu lestvicu, osim naravno hromatske.

Tonski opseg harfe zahvata šest i po oktava: to je pri gornjem položaju pedala, od Ces1 do Ges7. Sa po 7 žica u okviru oktave, ukupan broj žica iznosi 46 ili 48. Orijentacija svirača u tolikom nizu žica olakšana je time, što su sve C žice obojene crveno, a sve F žice plavo. Dvanaest najnižih (najdužih) žica do As2 koje se još nazivaju bas žice imaju čelično jezgro, omotano metalnom niti; sledeći opseg od As2 do Es6 su žice od creva, i na kraju opsega od Fes6 do Ges7 žice su izgrađene od najlona.

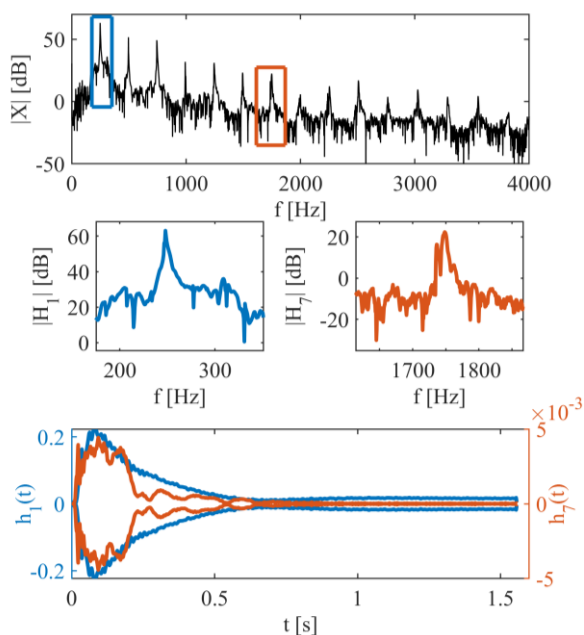
B. Vremenske i spektralne karakteristike tonova harfe

Harfa spada u žičane muzičke instrumente, gde se ton proizvodi trzanjem žice. Tako se i u spektru tonova harfe uočavaju pojave koje su karakteristične za žičane instrumente. Jedan od efekata je inharmoničnost koja se ogleda u odstupanju položaja parcijala od frekvencija koje su celobrojni umnožak osnovne frekvencije. Međutim, u spektru harfe, uočavaju se i druge pojave koje se ne mogu objasniti inharmoničnošću a koje otežavaju sistematsku, automatsku analizu karakteristika harfe kao tipa instrumenta i parametre koji bi opisali svaki pojedinačan instrument i omogućili objektivno poređenje instrumenata. Pojave kojima se može objasniti prisustvo artefakata u spektru signala harfe opisane su u literaturi i definišu se :

- kao posledice nelinearnosti [3,6] usled koje se javljaju komponente u spektru koje predstavljaju zbir harmonika.
- kao posledice pobuđivanja i drugih žica osim žice koja se okida [1,2] usled koje se „čuju“ i pri analizi spektra i vide komponente koje po frekvenciji odgovaraju parcijalima neke druge žice ili žica. Ova pojava opisana je posebno za hrafu i posledica je konstrukcije samog instrumenta.

Obe pojave mogu dovesti do toga da se u spektru signala pojave komponente, koje su po frekvenciji bliske nekom od osnovnih inharmoničnih parcijala. Pomenute komponente dovode do amplitudske modulacije parcijala. Na slici 2 prikazan je spektar jednog tona harfe sa detaljnijim prikazom spektra prvog i sedmog parcijala, kao i njihove vremenske obvojnice. Komponente su izdvojene primenom namenski napravljene banke filtera [11] na čijem su izlazu dostupni

uskopojasni signali pojedinačnih parcijala. Sa slike 2 se može uočiti da u okolini sedmog harmonika postoji izražena dodatna spektralna komponenta koja menja anvelopu pacijala i dovodi do toga da se anvelopa sedmog parcijala značajno razlikuje od tipične anvelope čiji je predstavnik anvelopa prvog parcijala. U okviru ovog rada, pojave dodatnih komponenti u spektru su razmatrane jer ograničavaju mogućnost za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti, o čemu će biti više reči u poglavljima III i IV.



Sl. 2 Spektralni toni C4 odsviranog na harfi sa prikazom vremenske obvojnice prvog i sedmog parcijala

III. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI

Nastanak zvuka kod žičanih instrumenata potiče od vibriranja žice. U zavisnosti od načina na koji se žica pobuđuje na vibriranje razlikujemo 3 podgrupe žičanih instrumenata (gudačke, trzane i udarne žičane instrumente). Bez obzira na različite podgrupe žičanih instrumenata, za sve tipove žičanih instrumenata kod kojih zvuk nastaje udarom žice ili njenim okidanjem, karakteristična je pojava inharmoničnosti parcijala. Izučavanjem prirode i fizičkih uzroka inharmoničnosti izvedena je zakonitosti po kojoj se može odrediti frekvencija inharmonijskih parcijala :

$$f_k = kf_0 \sqrt{1 + k^2 B}, \quad (1)$$

gde je k redni broj harmonika, f_0 osnovna frekvencija tona, a B koeficijent inharmoničnosti [12]. Za svaki ton postoji jedinstven koeficijent inharmoničnosti B koji u izvesnoj meri na istom instrumentu varira sa promenom tonskih visina.

Procena B zasniva se na proceni spektra i u literaturi su predloženi različiti algoritmi za njegovu automatsku procenu. [7,8,9]. U ovom radu za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti B razmatran je PFD algoritam [13]. Kako su automatskom procenom dobijene vrednosti B koje ne očekivano variraju sa promenom tonskih visina, paralelno

je izvršena procena B uz pomoć namenski napravljenog alata za manuelnu procenu.

A. Automatska procena koeficijenta inharmoničnosti na osnovu PFD algoritma

PFD algoritam se može razmatrati kao algoritam koji se izvršava u dve etape. U prvoj etapi algoritma je neophodno izvršiti procenu spektra signala i odrediti prvih k frekvencija parcijala analiziranog tona. Grupa Finskih naučnika koja je predložila PFD algoritam kao algoritam za automatsku procenu B , procenu spektra tona bazirala je na DFT (*Discrete Fourier Transform*) metodi [13].

U prethodnim radovima pokazani su nedostaci takve metode za procenu spektra tonova [14,15]. Zbog navedenih nedostataka kao metod za procenu spektra predložen je AR model [15].

AR modelovanje podrazumeva da se na osnovu segmenata signala procene koeficijenti modela. Znajući koeficijente modela, za signale kod kojih su spektralne komponente izražene moguće je izvršiti procenu frekvencija spektralnih komponenti. Detaljni opis primenjenog AR modela prikazan je u radovima [16]. Krajnji rezultat metode AR modelovanja je procenjivanje frekvencija spektralnih komponenti na osnovu položaja dominantnih polova.

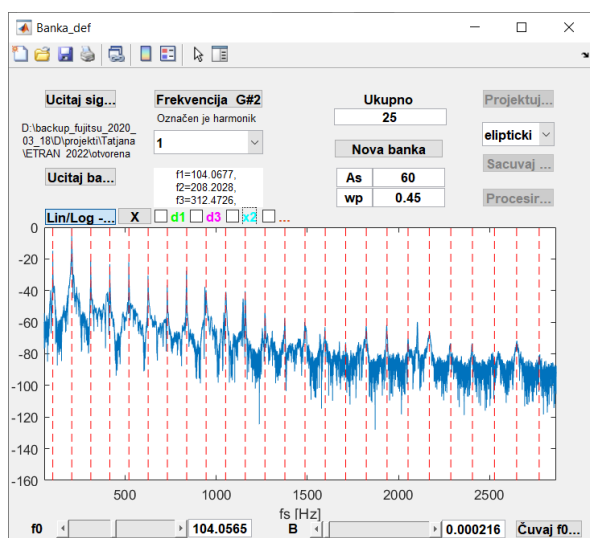
Druga etapa PFD je iterativni postupak koji se zasniva na izračunavanju devijacije frekvencije parcijala, gde se proračunava razlika niza frekvencija parcijala dobijenih iz procene spektra i odgovarajućeg niza frekvencija parcijala dobijenih na osnovu jednačine (1) za vrednost B u tekućoj iteraciji. Na osnovu trenda devijacije frekvencije, potrebno je doneti odluku da li se vrednost koeficijenta B smanjuje ili povećava [13]. Nakon određenog trenda devijacije moguće je modifikovati vrednost koeficijenta B polaznog tona. Minimizacijom krive devijacije postiže se konvergencija algoritma. Konačni rezultat cele procedure predstavlja jednobroja vrednost koeficijenta inharmoničnosti B za posmatrani ton.

B. Procena koeficijenta inharmoničnosti pomoću specijalizovanog alata

Sa ciljem da se detaljnije sagleda priroda spektra tonova realizovan je specijalizovani alat za analizu tonova muzičkih instrumenata. Alat je nastao kao unapređenje ranije realizovane komplementarne filterske banke [11]. Razvijanje alata je sprovedeno u MATLAB okruženju kao grafički interfejs (slika 3). Osnovne karakteristike alata koje su implementirane odnose se na sledeće kontrole: učitavanje signala, filtriranje namenski projektovanom bankom usklađenom sa karakteristikama spektra, određivanje osnovne frekvencije signala i definisanje pozicije parcijala u odnosu na zadatu vrednost B (prema formuli (1)), kao i uskopojasno filtriranje prema definisanim frekvencijama inharmonijskih parcijala. Uz pomoć dva klizača vrši se manuelno podešavanje koeficijenta inharmoničnosti B , za zadati broj parcijala.

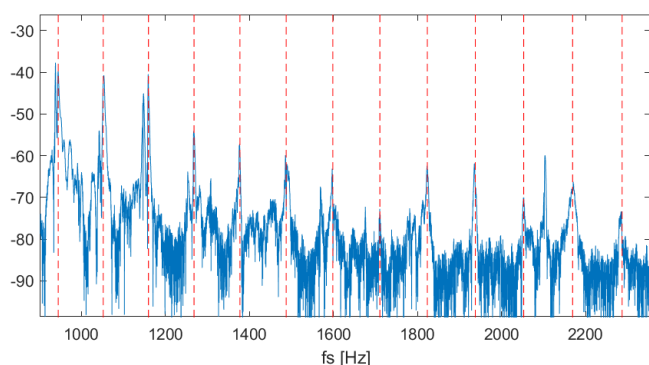
Na slici 3 dat je prikaz interfejsa specijalizovanog alata, gde je učitani signal ton As2 odsviranog na harfi. Na prikazanom logaritamskom spektru, isprekidanim crvenim linijama čiji je

broj određen brojem upisanim u polje „ukupno“ obeležene su pozicije parcijala tona. Pomeranjem klizača f_0 i B menjaju se pozicije isprekidanih crvenih linija. U cilju što bolje procene koeficijenta B neophodno je pozicionirati isprekidane crvene linije tako da odgovaraju vrhovima spektralnih komponenti parcijala analiziranog tona. Vrednosti f_0 i B za koje se isprekidane linije najbolje poklapaju sa spektralnim komponentama tona proglašavamo za procenjene vrednosti osnovne frekvencije i koeficijenta inharmoničnosti analiziranog tona.



Sl. 3 Prikaz interfejsa alata za analizu pojedinačnih tonova muzičkih instrumenata

Detaljnijim uvidom u spektar posmatranog tona (slika 4) u opsegu od 1000 do 2000 Hz, može se uočiti postojanje spektralnih komponenti veoma frekvencijski bliskih parcijalima odsviranog tona. Pored postojanja udvojenih parcijala, još jedan od neregularnih spektralnih artefakta tona As2 jeste pojava veoma amplitudski izražene spektralne komponente između 2000 i 2200 Hz, koji se nalazi tačno na polovini između 19og i 20og harmonika tona As2. Navedeni fenomeni koji se pomoću specijalizovanog alata mogu uočiti u spektru tona otežavaju automatizaciju procene koeficijenta inharmoničnosti za ceo opseg tonova harfe.



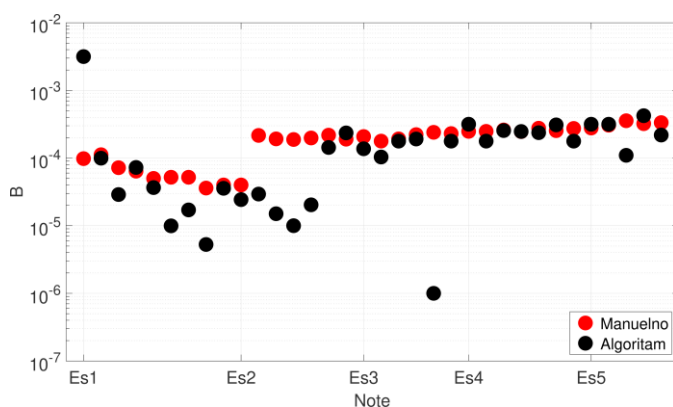
Sl. 4 Deo spektra tona As2 odsviranog na harfi

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

U prethodnom poglavlju izložene su dve metodologije za određivanje koeficijenta inharmoničnosti, automatska procena na osnovu PFD algoritma i procena pomoću specijalizovanog alata. Krajnji rezultat obe metodologije jeste vrednost koeficijenta inharmoničnosti za celokupni opseg harfe. Bazu čini 141 snimak tonova odsviranih na harfi. Snimljeni tonovi pokrivaju celokupni registar harfe, odnosno svih 47 žica su pobuđene za sva 3 položaja pedale. Tonovi harfe snimljeni su u prostorijama Fakulteta muzičke umetnosti u Beogradu.

A. Komparacija rezultata koeficijenta inharmoničnosti algoritmom i pomoću alata

Uticao dve metodologije na procenu koeficijenta inharmoničnosti najbolje se može uočiti poređenjem trenda krive koeficijenta B . Na slici 5 dat je grafik koeficijenta inharmoničnosti B za tonove harfe odsvirane za položaj 1 pedale, odnosno za slučaj kada je žica otvorena. Koeficijenti inharmoničnosti su dobijeni na osnovu dve metodologije, pomoću PFD algoritma i manualno, odnosno pomoću specijalizovanog alata. Za tonove iz srednjeg i višeg registra harfe koeficijenti B procenjeni na osnovu dve metodologije se ne razlikuju previše, dok za slučaj tonova iz nižeg registra dolazi do uočljivog razilaženja u vrednostima i to za red veličine. Glavni razlog za lošiju procenu koeficijenta inharmoničnosti na osnovu algoritma leži u kompleksnosti spektra tona harfe koji se odlikuje sa udvojenim parcijalima čije su vrednosti i frekvencijski i amplitudski veoma bliske, te se sam algoritam u odabiru spektralnih komponenti parcijala tona odlučio za pogrešan.

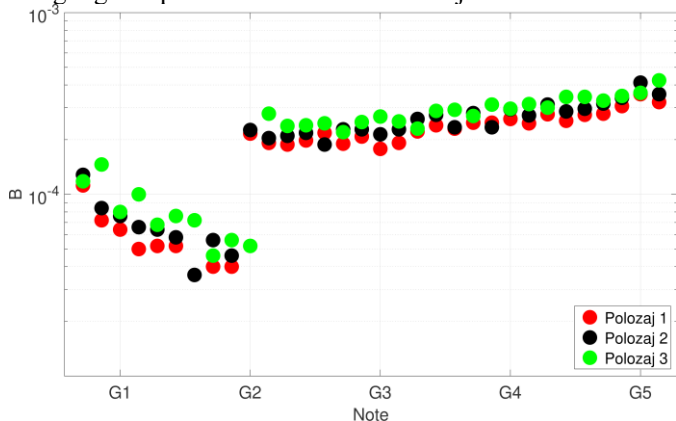


Sl. 5 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe za položaj 1 pedale određen algoritmom i pomoću specijalizovanog alata

B. Procena koeficijenta inharmoničnosti za različite položaje pedala harfe

Na slici 6 prikazani su koeficijenti B tonova odsviranih na harfi za sva tri položaja pedale. Trend krive koeficijenta B očuvan je za sva tri položaja pedale. Za razliku od trenda krive koeficijenta B koji je očuvan razlike u vrednostima koeficijenta B za tonove iz nižeg registra u odnosu na vrednosti koeficijenta B za tonove iz srednjeg i višeg registra postoji. Procenjene vrednosti koeficijenta B kreću se u rasponu od $3 \cdot 10^{-4}$ do $2 \cdot 10^{-3}$. Veće vrednosti B označavaju veću inharmoničnost, odnosno veće odstupanje inharmonijskih frekvencija u odnosu na očekivane frekvencije harmonijskog niza. Na osnovu skoka u vrednosti koeficijenta

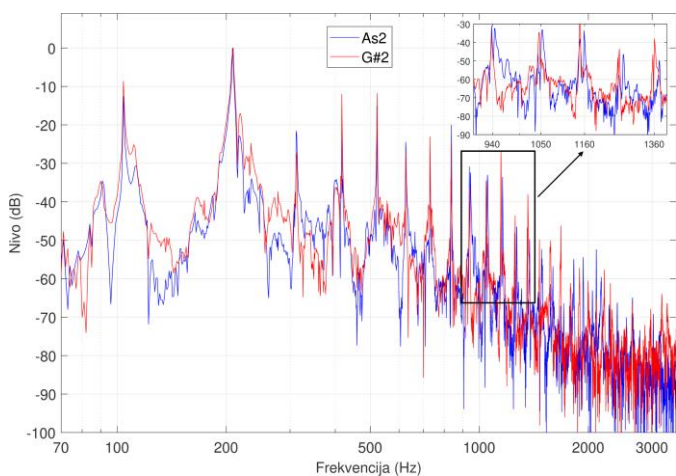
inharmoničnosti možemo zaključiti da na samu vrednost koeficijenta inharmoničnosti utiče značajno materijal od kojeg je žica napravljena, s obzirom da su tonovi iz nižeg registra proizvedeni na metalnim žicama, dok su tonovi iz srednjeg i višeg registra proizvedeni na crevnim i najlonskim žicama.



Sl. 6 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe za tri različita položaja pedale

Još jedan od fenomena harfe kao muzičkog instrumenta se može uočiti iz krive koeficijenta inharmoničnosti prikazanog na slici 6. Iako postoje tonovi koji su enharmonski parovi (tonovi jednakih tonskih visina, ali različite notacije npr. Gis i As) njihovi koeficijenti inharmoničnosti se međusobno razlikuju. Razlog za razlike u vrednostima koeficijenta B se krije upravo u fizici nastanka tona. Iako su to tonovi istih osnovnih frekvencija, da bi se na harfi dobio ton As pedala se nalazi u položaju 1, žica je otvorena i kao takva osciluje, dok za slučaj tona Gis pedala se nalazi u položaju 3 i pomoću mehanizma sa dva koturića žica je skraćena na dva mesta za razliku od žice kada se pedala nalazi u položaju 1. S obzirom na fizičko skraćivanje žice, menjaju se i granični uslovi oscilovanja žice. Opisane razlike za enharmonski par tonova As2 i Gis2 mogu se uočiti i u prikazima njihovih spektara. Na slici 7 dat je prikaz tonova As2 i Gis2 odsviranih na harfi. Sa slike se može uočiti da na frekvencijama od 1000 Hz parcijali tonova As2 i Gis2 se razilaze za par Hz, što za posledicu ima različite vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.

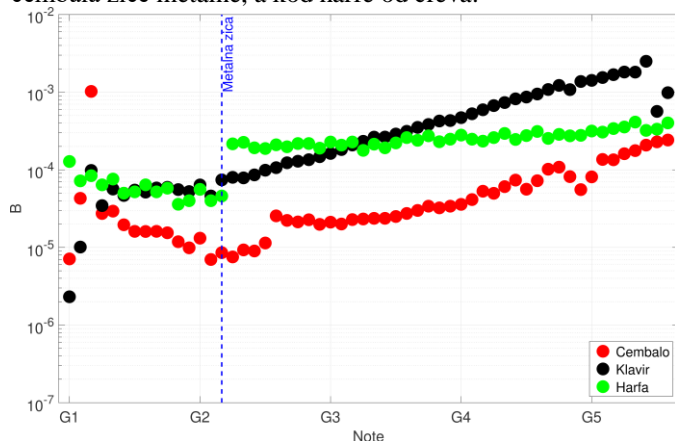
Osim razilaženja u frekvenciji inharmonijskih parcijala dolazi do pomeranja i „fantomskih“ parcijala koji su zavisni od osnovnih inharmonijskih parcijala.



Sl. 7 Prikaz spektra tonova As2 i Gis2 odsviranih na harfi

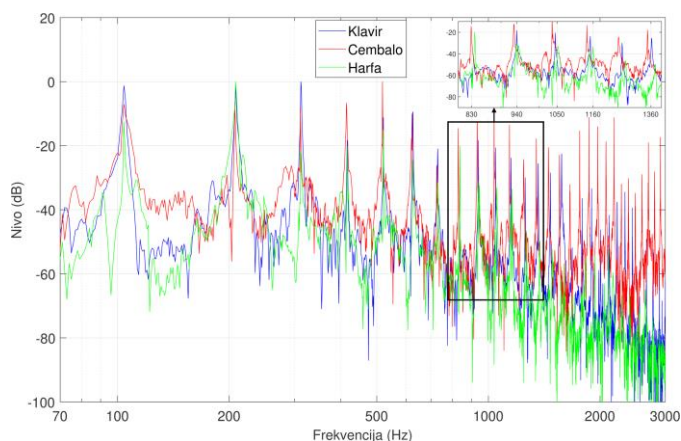
C. Poređenje procenjenosti vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za tonove harfe, klavira i čembala

Koeficijent inharmoničnosti predstavlja kako kvalitativan tako i kvantitativan atribut tona žičanih muzičkih instrumenata. Sa ciljem opisivanja razlike između različitih klasa žičanih instrumenata izvršeno je poređenje koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira, čembala i harfe. Na slici 8. prikazani su procenjeni koeficijenti inharmoničnosti za opseg tonova koji je zajednički za sva tri instrumenta, odnosno za tonove iz opsega od G1 do C6. S obzirom da se kod harfe ne može postići potpuna hromatika, kao kod klavira i čembala, pri izračunavanju koeficijenta inharmoničnosti tonova harfe, tonovi su birani tako da se njihove osnovne frekvencije slažu sa osnovnim frekvencijama tonova klavira i čembala. Takođe, koeficijenti B tonova harfe prikazani na grafiku određeni su pomoću specijalizovanog alata, a ne automatskom procedurom pomoću PDF algoritma. Na osnovu slike se može zaključiti da je trend krive koeficijenta inharmoničnosti za sva tri instrumenta očuvan. Vrednosti koeficijenta B tonova harfe iz nižeg registra se poklapaju sa vrednostima koeficijenta B klavira, što se objašnjava činjenicom da su žice od istog materijala, čak i poredive dužine. Takođe, činjenica da se u srednjem i višem registru vrednosti koeficijenata B harfe razlikuju i od koeficijenata B čembala i klavira može se opravdati različitim materijalom žice, gde su kod klavira i čembala žice metalne, a kod harfe od creva.



Sl. 8 Koeficijent inharmoničnosti B tonova harfe, čembala i klavira

Posledice različitih vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za tonove klavira, čembala i harfe mogu se uočiti uporednom analizom spektra tonova pomenutih instrumenata. Na slici 9 dat je prikaz spektra tona iste frekvencije odsviranih na klaviru, čembalu i harfi. Na osnovu spektra signala može se uočiti da iako su tonovi istih frekvencija pozicije njihovih parcijala se razlikuju, što doprinosi različitim vrednostima koeficijenta inharmoničnosti. Takođe, poređenjem spektara tonova za tri navedena instrumenta može se zaključiti da je broj izraženih parcijala kod tona harfe manji u odnosu na broj izraženih parcijala klavira i čembala. Ta činjenica direktno utiče na vrednosti koeficijenata inharmoničnosti, s obzirom da se njegova vrednost procenjuje na osnovu frekvencija parcijala tonova, gde spektralno bogatstvo parcijala doprinosi niže procenjenoj vrednosti koeficijenta inharmoničnosti, a njihovo odsustvo utiče na povećanje procenjene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.



Sl. 9 Prikaz spektra tonova iste frekvencije odsviranih na klaviru, čembalu i harfi

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je koeficijent inharmoničnosti tonova harfe kroz prizmu automatske procene i specifičnosti koje prati data problematika. Formirana je baza snimaka koja se sastoji od 141 tonova odsviranih na harfi. Harfa je izabrana kao instrument u cilju proširivanja prethodnog istraživačkog rada i upotpunjavanja do sada formirane baze tonova žičanih muzičkih instrumenata. Koeficijent inharmoničnosti je računat na osnovu automatske procedure pomoću modifikovanog PFD algoritma. Pokazano je da za pojedine tonove iz nižeg registra harfe dobijene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti na osnovu automatske procedure nisu dobro procenjene. Iz tog razloga realizovan je specijalizovani alat za analizu audio signala, pomoću koga se manuelnom inspekcijom može proceniti koeficijent inharmoničnosti tonova žičanih instrumenata. Novonastali specijalizovani alat otvara nove istraživačke mogućnosti, gde će nastavak istraživanja podrazumevati savladavanje problema automatske procene. Pored toga, kreirani alat otvara mogućnosti za proširivanje samog istraživanja dodavanjem mogućnosti ne samo analize tonova žičanih muzičkih instrumenata, već i njihove sinteze.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Zahvaljujemo se profesorki dr um. Mileni Stanišić na pomoći pri formiranju baze snimaka neophodnoj za ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] J-L. Le Carrou, F. Gautier, E. Foltête, "Experimental study of A0 and T1 modes of the concert harp", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 121(1), pp.559-567, January 2007.
- [2] J-L. Le Carrou, F. Gautier, R. Bateau, "Sympathetic String Modes in the Concert Harp", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 95, pp. 744-752, 2009.
- [3] Harold A. Conklin, Jr., "Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 105(1), pp.536-545, January 1999.
- [4] V. Bucur, "About the acoustic and other non-destructive methods for the characterization of old historical string musical instruments – an

overview", 22nd International Congress on Acoustics, ICA 2016, Buenos Aires – 5 to 9 September, 2016.

- [5] V. Bucur, "Handbook of Materials for String Musical Instruments", ISBN: 978-3-319-32078-6 Springer, 2016.
- [6] Harold A. Conklin, Jr., "Piano strings and "phantom" partials", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol. 102(1), pp.536-545, July 1997.
- [7] A.S. Galembo, and A. Askenfelt, A. "Signal representation and estimation of spectral parameters by inharmonic comb filters with application to the piano," *IEEE Trans. Speech Audio Process*, vol. 7, no.2, pp. 197–203, 1999.
- [8] A. Askenfelt and A.S. Galembo, "Study of the spectral inharmonicity of musical sound," *Acoust. Phys.* vol. 46, no. 2, pp. 121–132, 2000.
- [9] A. Klapuri, "Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness," *IEEE Trans. Speech Audio Process*, vol. 11, no. 6, pp. 184–194, 2003.
- [10] D. Despić, *Muzički instrumenti*, Univerzitet umetnosti Beograd, 1979.
- [11] J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, I. Salom, "Softverski paket za obradu i analizu audio signala", *TELFOR 2010*, pp. 1269-1272, Beograd, Nov., 2010
- [12] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of piano tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 6, pp. 749–761, 1962.
- [13] J. Rauhala, H.M. Lehtonen, V. Välimäki, "Fast automatic inharmonicity estimation algorithm" *Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, EL184, doi:10.1121/1.2719043, 2007
- [14] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, J. Čertić, "Analiza algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti različitih klavira", *Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN*, pp. AK1.2.1 - AK1.2.6, Beograd, Sep, 2020.
- [15] T. Miljković, J. Damjanović, J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, "Uticaj estimacije frekvencija harmonica na procenu koeficijenta inharmoničnosti čembala", *Zbornik radova 65. Konferencije ETRAN*, pp. 9 -14, Etno selo Stanišići, Sep, 2021.
- [16] P.A.A. Esquef, M. Karjalainen, and V. Välimäki, "Frequency-Zooming ARMA Modeling for Analysis of Noisy String Instrument Tones", *EURASIP J. Adv. Signal Process*, pp. 953-967, 2003.

ABSTRACT

This paper deals with the characterization of harp tones and presents continuation of research related to the string instruments characterization. The characterization of the harp tone is based primarily on the estimation of the inharmonicity coefficient. Inharmonicity is a property of the tones of string instruments and is reflected in the deviation of the partial frequencies from the integer multiple of the fundamental frequency. The accuracy of the automatic determination of the inharmonicity coefficient B is hampered by the existence of "phantom" partials which are consequences resulting from different physical processes that depend on the construction of the instrument, the excitation method, as well as the materials from which the strings are made. As a consequence of the instrument construction and the way the string is tightened, in harp multiple peaks in the spectrum are very pronounced, which makes it difficult to automatically calculate inharmonicity coefficient. The coefficient B was estimated using the PFD algorithm and compared with the values estimated using a purpose-built tool for manual estimation. The coefficient B values of the harp were compared with the values of the coefficient B of piano and harpsichord.

Inharmonicity coefficient of harp tones - Specificity and problems of automatic estimation

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović

Implementacija algoritama za kontrolu usmerenosti zvučnickog niza sa dva glavna loba na otvorenom hardveru

Tijana Đorđević, Stefan Aćimović, Miloš Bjelić

Apstrakt— U ovom radu prikazana je implementacija softverski usmerenih zvučnickih sistema. Softverski i hardverski implementirani usmereni zvučnicki sistemi, osim što povećavaju nivo zvuka u zatom pravcu, takođe dovode i do smanjenja reverberacije. U implementaciji korišćeni su zvučnicki niz i procesor na kome se izvršavaju tri različita algoritma za obradu signala. Prvo rešenje podrazumeva usmeravanje zvuka ka jednoj zatomj tački, a drugo i treće rešenje podrazumevaju usmeravanje zvuka ka dvema tačkama koje su proizvoljno zadate. Akcenat rada je na drugom i trećem rešenju koja se koriste u slučajevima kada želimo da obezbedimo pokrivanje dva pravca u auditorijumu. Pored tri nezavisna algoritma u radu je prikazana i simulacija pomoću koje je moguće predvideti dijagrame usmerenosti u sva tri slučaja. Rezultati algoritma kvantifikovani su merenjem dijagrama usmerenosti po 1/3 oktavnim frekvencijskim opsezima. Biće pomenuti detalji implementacije i pojedinosti na koje treba obratiti pažnju prilikom rada sa hardverskom platformom Bela. U radu su izložena poboljšanja koja su dobijena korišćenjem dva, umesto jednog snopa zvuka.

Ključne reči—hardverska platforma Bela, dijagram usmerenosti, softverska kontrola usmerenosti, zvučnicki niz.

I. UVOD

Sa napretkom sistema za ozvučavanje i sa povećanjem zahteva korisnika sve je više istraživanja u oblasti softverski usmerenih zvučnickih sistema. Istorijски gledano pre ovih sistema nastali su sistemi koji su se na terenu podešavali tako što se od nekoliko zvučnika napravi niz koji je zakrivljen. Zakrivljenje niza omogućavalo je da se signali fazno usklade i da se maksimalna energija emituje u zatom pravcu. Iako se ovi sistemi i danas koriste u mnogim aplikacijama, njihova nefleksibilnost je veliki problem. Potencijalno rešenje ovog problema može biti procesiranje signala koji se emituju na pojedinačnim zvučnicima. Glavna prednost ovih sistema je to što se usmeravanje zvuka može postići bez fizičkog pomeranja zvučnika. Promena željene tačke ka kojoj se fokusira zvuk može se uraditi bez menjanja položaja zvučnika. Zbog toga su ovi sistemi pogodni i za daljinsku kontrolu.

Tijana Đorđević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dt213283m@student.etf.bg.ac.rs).

Stefan Aćimović - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: as213306m@student.etf.bg.ac.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Softverski usmereni zvučnicki sistemi promenama kašnjenja signala za pojedinačne zvučnike usmeravaju zvuk ka željenoj tački. Ukoliko se signal ne procesira, maksimum će biti u osi koja je normalna na zvučnik, a pomenutim procesiranjem maksimum se pomera u željenom pravcu. Problem koji nastaje prilikom usmeravanja zvuka u jednom pravcu je izrazito jak bočni lob. Bočni lob se u mnogim slučajevima gotovo i ne razlikuje od glavnog loba. Na veličinu i širinu bočnog loba se ne može uticati, ona zavisi od frekvencije na kojoj se zvuk šalje, kao i rasporeda zvučnika na zvučnickom nizu. Teško je napraviti optimalnu geometriju zvučnickog niza koja bi za sve frekvencije podjednako dobro potiskivala bočne lobove. U ovom radu će biti prikazana rešenja za softversko usmeravanje zvuka u jednom pravcu kao uvod u rešenja koja prikazuju pokrivanje dva pravca.

Do sada je u literaturi bilo pomena o implementaciji jednog loba [1]. U radu su prikazani dijagrami usmerenosti za 1/3 oktavne opsege čije su centralne frekvencije: 630 Hz, 1250 Hz, 2500 Hz i 4000 Hz. Takođe, neka istraživanja su se bavila i implementacijom algoritma za pokrivanje dva pravca [2], međutim, opseg signala koji je posmatran je ultrazvučni. Budući da će se ovi algoritmi koristiti za ozvučavanje, merenja u radu su izvršena u zvučnom opsegu. Za fokusiranje zvuka neophodan je zvučnicki niz. Zvučnicki nizovi se sastoje od nekoliko zvučnika raspoređenih na različite načine. Korišćeni su zvučnici koji su postavljeni duž y-ose i fokusiraju zvuk ka tački na željenoj visini. Zvučnicki nizovi mogu biti sastavljeni od zvučnika sa različitim karakteristikama usmerenosti. Karakteristika pojedinačnih zvučnika utiče na formiranje dijagrama usmerenosti zvučnickog niza. Zvučnici koji se koriste u eksperimentu su kardiodni i to je neophodno implementirati u simulaciji.

Okosnicu ovog rada predstavlja implementacija sistema koji pokriva dva auditorijuma. Za ovu namenu dizajnirana su dva rešenja. Ideja prvog rešenja je da se polovina zvučnika koristi za usmeravanje signala ka jednoj tački, a druga polovina za usmeravanje signala ka drugoj tački. Budući da se za usmeravanje signala koristi samo polovina zvučnika, lobovi dijagrama usmerenosti će biti širi nego u slučaju kada usmeravanje vršimo sa svim zvučnicima. Drugo rešenje otklanja ovaj problem tako što koristi svih 8 zvučnika. Njegov glavni lob dijagrama usmerenosti za jedan pravac se praktično poklapa sa glavnim lobom u prvom slučaju kada se zvuk usmerava samo u jednom pravcu. U radu će biti prikazano poređenje rešenja kroz merne rezultate, kao i kroz simulaciju.

Budući da se ovakvi sistemi koriste za ozvučavanje prostora neophodno je da oni rade u realnom vremenu. Ograničenje koje donosi ovaj zahtev je složenost algoritma. Poželjno je da algoritam bude što jednostavniji i da se odgovarajući parametri sistema prilikom izvršavanja algoritma na hardveru uzimaju iz memorije.

Primena pomenutih algoritama može biti u sistemima za ozvučavanje koncertnih sala, bioskopa i drugih objekata gde je neophodno pokrivanje dva pravca (parter i galerija). Takođe, moguće je da zvučnički niz bude ugrađen u TV i da u kućnim uslovima imitira *surround* sisteme.

II. METODOLOGIJA

U nastavku će biti prikazana tri različita rešenja za softversko usmeravanje zvučnika. Kao što je pomenuto, osim algoritma koji će se izvršavati na procesoru razvijena je i simulacija za proveru rešenja. Simulacija se sastoji od programa koji generiše jedinični impuls za svaki pojedinačni zvučnik. Signal se posmatra u nekoj tački na mestu prijema i zbog toga je potrebno uračunati kašnjenje i slabljenje usled pređenog puta. Takođe, neophodno je uračunati i usmerenost pojedinačnih zvučnika koja zavisi od ugla, te signal sa svakog pojedinačnog zvučnika pomnožiti sa tom vrednošću. Ukupan signal u nekoj tački računa se kao zbir signala sa svih zvučnika. Da bi se dobio signal po 1/3 oktavnim opsezima neophodno je na kraju filtrirati ukupan signal.

A. Usmeravanje zvuka ka jednoj tački u prostoru

Prvo rešenje podrazumeva usmeravanje ka jednoj tački u prostoru. Da bi se ovo realizovalo neophodno je signale koji dolaze na ulaze Bela platforme obraditi i fazno uskladiti. Fazno usklađivanje ovih signala se vrši tako što se na različitim zvučnicima primeni različito kašnjenje. Kašnjenje zavisi od pozicije zvučnika i tačke ka kojoj se signal usmerava.

Računanje kašnjenja biće detaljno obrazloženo za ovo rešenje, a za ostala dva rešenja će biti pomenuta ograničenja i izmene. Na slici 1 prikazan je zvučnički niz i usvojeni koordinatni sistem. Centar koordinatnog sistema je sredina zvučničkog niza. Ugao φ je ugao između x -ose i prave koja spaja koordinatni početak i tačku A. Tačka A predstavlja tačku u kojoj je potrebno fokusirati zvuk. Rastojanje između tačke A i koordinatnog početka je D. Koordinate tačke A računaju se na osnovu sledećih izraza:

$$x_A = D \cdot \cos(\varphi) \quad (1)$$

$$y_A = D \cdot \sin(\varphi) \quad (2)$$

Rastojanje između tačke A i zvučnika i računa se na sledeći način:

$$r_i = \sqrt{(x_A - x_i)^2 + (y_A - y_i)^2} \quad (3)$$

gde su x_i i y_i koordinate pojedinačnih zvučnika.

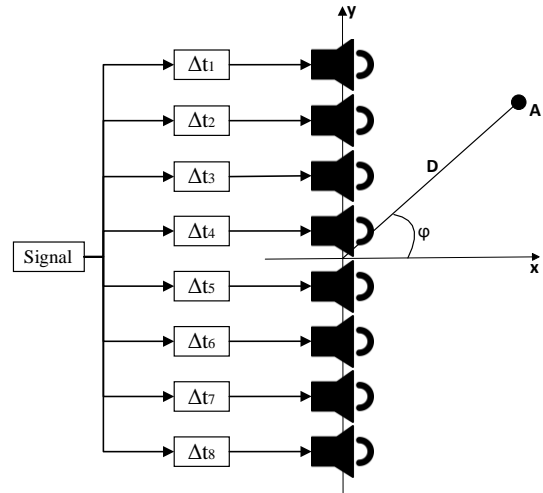
Ukoliko fazno ne uskladimo pojedinačne zvučnike, signal sa zvučnika 1 će prvi stići do tačke, a potom redom signali sa zvučnika 2, 3 itd. Kako bi se fazno uskladili signali neophodno je primeniti kašnjenja na svakom signalu. Kašnjenja se računaju prema sledećem izrazu:

$$\Delta t_i = \frac{r_{\max} - r_i}{c} \quad (4)$$

$$r_{\max} = \max \{r_i\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

gde je N ukupan broj zvučnika, u ovom slučaju 8, a c brzina prostiranja zvuka u vazduhu.

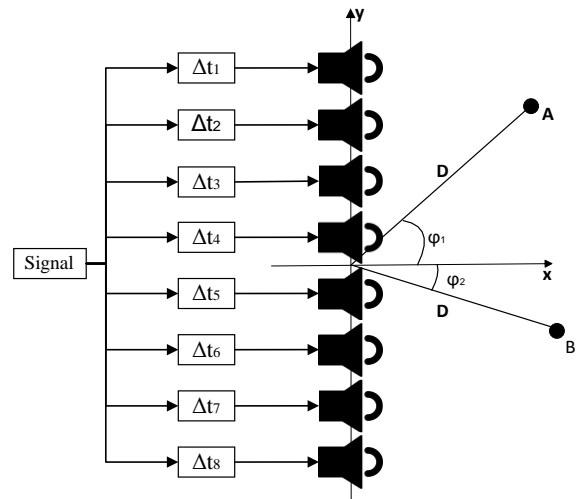
Problem prvog rešenja predstavljaju bočni lobovi. Prilikom usmeravanja signala veliki deo snage signala biva emitovan kroz bočni lob. Naredna rešenja zasnivaju se na dodavanju još jedne tačke ka kojoj će zvučnik usmeravati signal. Na ovaj način moguće je pokriti dva željena pravca zvukom. Primena se može naći u pokrivanju objekata koji se sastoje iz partera i balkona.



Sl. 1. Blok šema zvučničkog sistema za usmeravanje signala u jednom pravcu

B. Usmeravanje zvuka ka dvema tačkama u prostoru sa odvojenim zvučnicima

Drugo rešenje podrazumeva da se signali na prva četiri zvučnika i poslednja četiri zvučnika posebno obrađuju. Ovaj sistem prikazan je na slici 2.



Sl. 2. Blok šema zvučničkog sistema za usmeravanje zvuka ka dvema tačkama sa odvojenim zvučnicima

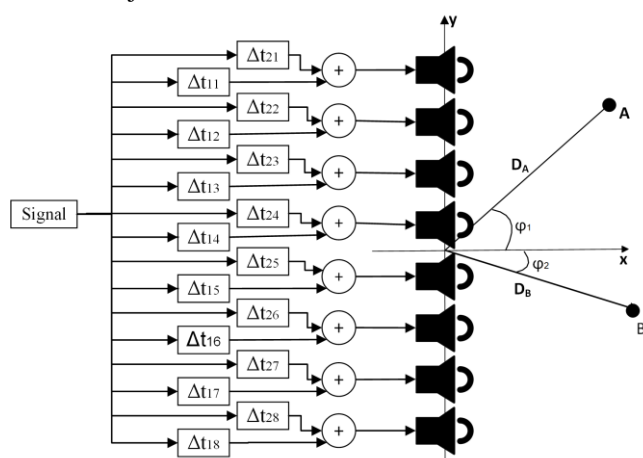
Zvučnici označeni brojevima od 1 do 4 emituju zvuk ka tački A, a zvučnici označeni brojevima od 5 do 8 emituju

zvuk ka tački B. Moguće je proizvoljno podesiti uglove φ_1 i φ_2 , a oba ugla su iz opsega $[-90^\circ, 90^\circ]$. Poželjno je da φ_1 bude veći od φ_2 , jer je na taj način slabljenje signala minimalno, pošto je rastojanje između zvučnika i prijemnih tačaka minimalno. Kašnjenja se računaju pomoću izraza (5) sa razlikom kod r_{max} . Maksimalna razdaljina računae se pojedinačno za zvučnike označene sa 1 do 4 i pojedinačno za zvučnike označene sa 5 do 8.

Prilikom implementacije se umesto 8 zvučnika koristi samo 4 za usmeravanje ka jednoj tački. Posledica ovoga su značajno širi glavni lobovi nego u prvom slučaju. Ovaj problem pokušavamo da prevaziđemo u narednom rešenju tako što umesto 4 koristimo svih 8 zvučnika za obe tačke.

C. Usmeravanje zvuka ka dvema tačkama u prostoru sa kombinovanim zvučnicima

U ovoj implementaciji koristiće se 8 zvučnika (slika 3) koji se usmeravaju ka dve nezavisne tačke.



Sl. 3. Blok šema zvučničkog sistema za usmeravanje zvuka ka dvema tačkama sa kombinovanim zvučnicima

Signali sa ulaza Bela platforme se obrađuju za svaku tačku pojedinačno, nakon čega se signali sabiraju za svaki pojedinačni zvučnik. Kašnjenja se računaju pomoću izraza (5), tako što se prvo posmatraju rastojanja do tačke A, a potom do tačke B. Ovim postupkom dobijamo 2 seta kašnjenja, posebno za tačku A i posebno za tačku B. Ova kašnjenja se nezavisno primenjuju na ulazni signal, potom se zakašnjeni signali sabiraju. Klipovanje se javlja kada je signal koji se prosleđuje funkciji *analogWrite()* veći od 1 ili manji od 0. Prilikom sabiranja neophodno je skalirati signale sa faktorom 0.5 kako ne bi došlo do klipovanja na Bela platformi. Faktor skaliranja iznosi 0.5 jer se sabiraju dva signala u opsegu $[0,1]$.

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Prilikom realizacije ovog sistema korišćeni su: zvučnički niz, hardverska platforma Bela i računar. Signal se iz izvora audio signala vodi se na ulaz hardverske platforme Bela. U njoj se ulazni signal multiplicira 8 puta i svaka kopija se dalje nezavisno procesira i prosleđuje na odgovarajući pojačavač, a odatle na zvučnik.

A. Zvučnički niz

Zvučnički niz koji je korišćen sastoji se od *Genius SP-D150* zvučnika. On sadrži 12 zvučnika sa kardioidnom karakteristikom usmerenosti. Prilikom eksperimenta biće korišćeno samo 8 zvučnika jer je to maksimalan broj audio izlaza kod audio ekspandera na hardverskoj platformi Bela. Zvučnici se nalaze na rastojanju od 6 cm. Unutar zvučničke kutije su osim zvučnika smešteni i pojačavači. Pojačavači se napajaju iz jednosmernog izvora za napajanje napona 9 V. Frekvencijska karakteristika jednog zvučnika koji je ugrađen u sistem je približno ravna na frekvencijama većim od 300 Hz [3].

Pre samog eksperimenta neophodno je sprovesti kalibraciju zvučnika. Potrebno je normalizovati nivoe signala tako da svi zvučnici za istu pobudu emituju isti nivo signala. Na slici 4 prikazan je zvučnički niz.



Sl. 4. Zvučnički niz

B. Hardverska platforma Bela

Hardverska platforma Bela je *open source single-board* uređaj za obradu signala. Bela se sastoji od platforme BeagleBone i namenske nadploče Bela. BeagleBone platforma je Linux kompatibilni sistem čiji je centralni deo ARM Cortex-A8 procesor sa 512MB RAM-a. Glavna prednost pri korišćenju Bele je malo kašnjenje koje će omogućiti da se reprodukcija zvuka odvija u realnom vremenu. Hardverska platforma Bela ima 2 stereo ulaza i 2 stereo izlaza za audio signal, zbog čega je neophodno koristiti audio ekspander [4]. Audio ekspander je dodatak koji povećava broj audio ulaza i izlaza. Na slici 5 prikazana je hardverska platforma Bela sa audio ekspanderom. Audio ekspander ima dodatne priključke na koje je moguće dovesti audio signal koji će nakon obrade biti prosleđen na analogne ulaze hardverske platforme Bela. Pre početka rada neophodno je povezivanje pojedinih pinova na audio ekspanderu. Konektori obezbeđuju vezu između audio ulaza ekspandera i analognih ulaza hardverske platforme Bela. Audio ulazi ekspandera su povezani sa

analognim ulazima hardverske platforme Bela, te će se ovom signalu pristupiti uz pomoć funkcija *analogRead()*, *analogWrite()* i *analogWriteOnce()*.



Sl. 5. Hardverska platforma Bela sa audio ekspanderom

Korišćenje 8 audio izlaza uvodi dodatno ograničenje kada je u pitanju frekvencija odabiranja. Umesto 44.1 kHz, frekvencija odabiranja biće 22.05 kHz. Bela platforma podržava objektno-orijentisanu paradigmu. Jezik u kome je pisan algoritam je C++. Poznato je da su jezici C/C++ daleko brži od ostalih zbog mogućeg direktnog pristupa memoriji i njenim registrima. Ovo doprinosi brzini izvršavanja algoritma na hardverskoj platformi Bela koja je ključna za *real-time* sisteme. Jezici koji se mogu koristiti su *Csound* i *SuperCollider*, a grafički interfejs se može pisati u *JavaScript*-u.

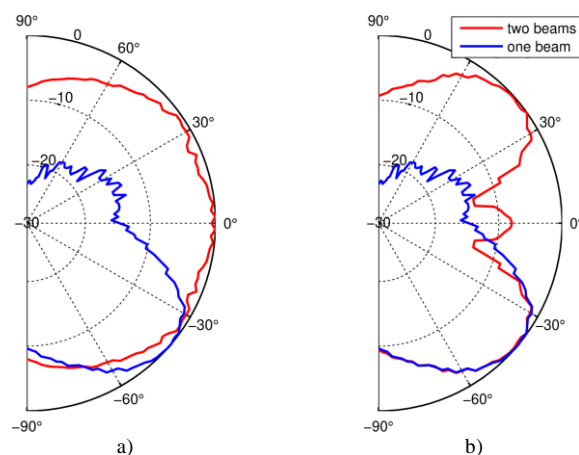
Ukoliko se u softveru ne izabere opcija za korišćenje audio ekspandera signal će biti u opsegu [0,1] i imaće jednosmernu komponentu od približno 0.44 V. To je posledica toga što Bela signale sa audio ekspandera čita kao analogne, a ne kao audio. Podešavanjima parametara na samoj platformi moguće je podesiti da ekspander automatski skalira signal sa [0, 1] na [-1, 1] i eliminiše jednosmernu komponentu.

Hardverska platforma Bela obrađuje blok po blok ulaznog signala i šalje ga na izlaz. Ovo Bela čini sistemom za obradu signala u realnom vremenu. Signal koji se pojavi na pinovima automatski se smešta u bafer, odakle biva iščitavan uz pomoć pomenutih funkcija za analogne signale.

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Na slici 6 prikazani su rezultati simulacije za 1/3 oktavni frekventijski opseg sa centralnom frekvencijom 1250 Hz za različite algoritme implementirane u ovom radu. Sa slike 6 a) se jasno vidi problem širine lobova kod rešenja u kom se koriste odvojeni zvučnici za formiranje dva glavna loba. Na slici 6 b) je rešenje sa kombinovanim zvučnicima kod koga možemo uvideti da rešava pomenuti problem.

Merenje je izvršeno u anechoičnoj sobi na Elektrotehničkom fakultetu. Za eksperiment je korišćen neusmereni merni mikروفon [5]. Snimane su vertikalna i horizontalna karakteristika usmerenosti zvučničkog niza. Mikrofonom je meren nivo zvuka u tačkama na zamišljenoj kružnici poluprečnika D . Rezolucija merenja je 15° .

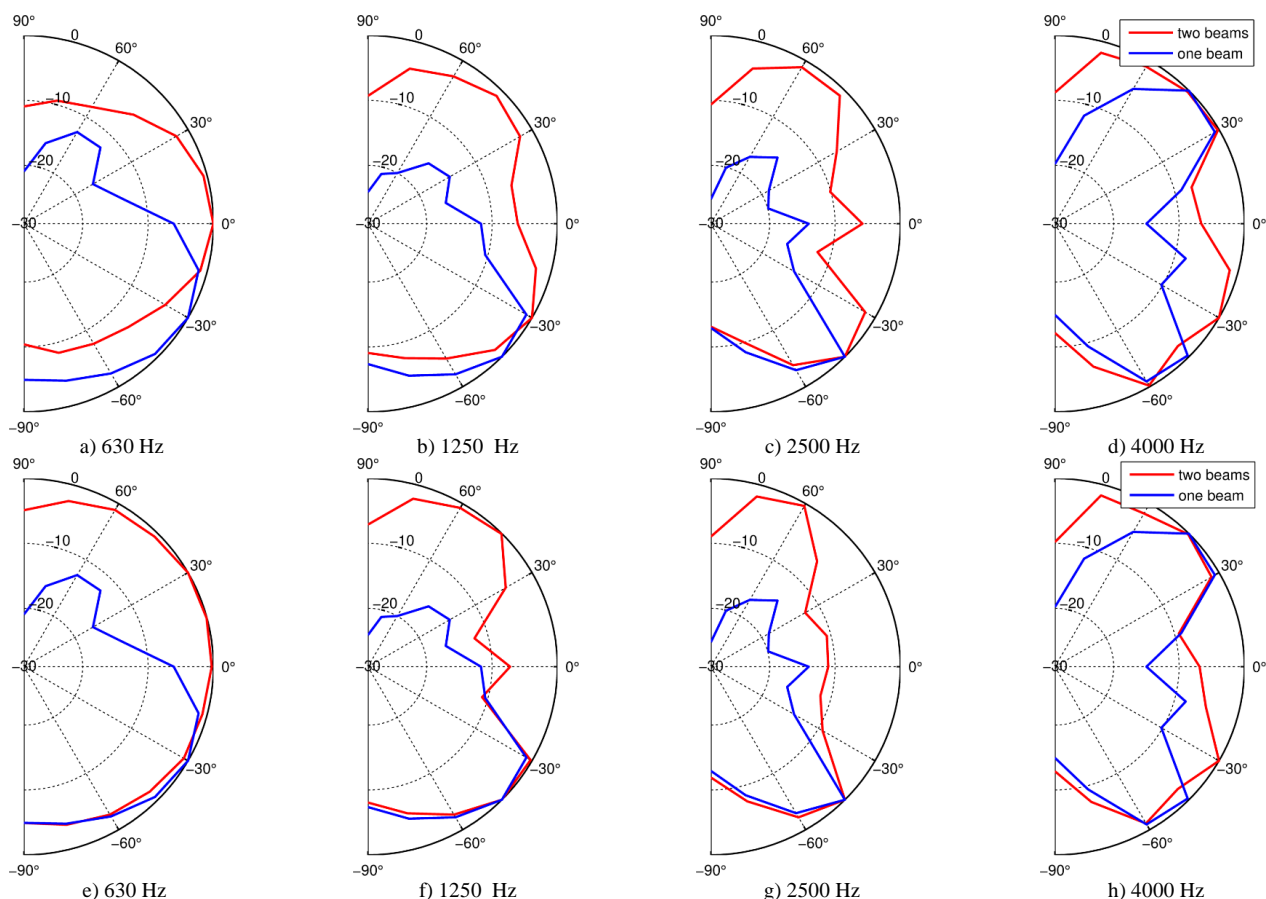


Sl. 6. Vertikalni dijagram usmerenosti zvučničkog niza na frekvenciji 1250 Hz za algoritam: a) sa odvojenim zvučnicima, b) sa kombinovanim zvučnicima.

Signal koji se šalje na procesor je MLS (Maximum-Length Sequence) sekvenca [6]. Poznato je da zvučnički nizovi kod kojih su zvučnici raspoređeni samo po jednoj dimenziji nisu u stanju da usmeravaju zvuk van te dimenzije. U eksperimentu zvučnik je postavljen vertikalno, te on nije u stanju da usmerava zvuk horizontalno. To je potvrđeno i u eksperimentima, horizontalni dijagram usmerenosti se ne menja korišćenjem algoritama za prostorno-vremensku obradu signala.

Na slici 7 prikazani su rezultati merenja pomenutih algoritama za različite opsege. Na slikama od a) do d) prikazani su dijagrami usmerenosti na različitim frekvencijama za prvo i drugo rešenje. Plavom bojom označeni su dijagrami usmerenosti za prvo, a crvenom bojom za drugo rešenje. U prvom rešenju signal se usmerava ka jednoj tački u prostoru koja se nalazi na rastojanju 2 m od centra zvučničkog niza i pod uglom od -45° . Drugo rešenje predstavlja usmeravanje zvuka ka dve tačke sa odvojenim zvučnicima. Tačke se nalaze na rastojanju od 2 m pod uglovima od -45° i 45° . Na slikama od e) do h) prikazani su dijagrami usmerenosti za prvo i treće rešenje. Plavom bojom je označen dijagram usmerenosti prvog, a crvenom trećeg rešenja. Treće rešenje podrazumeva usmeravanje signala ka dve tačke u prostoru sa svih 8 zvučnika. Tačke prema kojima se usmerava su identične kao i za prethodni slučaj.

Posmatrajući dijagrame usmerenosti za prvo rešenje dolazimo do određenih zaključaka. Merenja pokazuju da je zbog velike talasne dužine usmeravanje signala na niskim frekvencijama jedva primetno. Na višim frekvencijama usmeravanje signala se povećava, ali se povećava i veličina bočnih lobova. Sa slika se može videti da su u opsegu 4000 Hz glavni i sporedni bočni lob gotovo jednaki. Usmeravanje signala ka jednoj tački dovelo je do neželjenog usmeravanja signala ka još jednoj tački u prostoru. Na ovaj način gubi se deo energije, budući da se ne emituje u željenom pravcu. Izgled bočnog loba zavisi od frekvencije i rastojanja između zvučnika na zvučničkom nizu, te na to ne možemo uticati.



Sl. 7. Vertikalni dijagram usmerenosti zvučnog niza u slučaju usmeravanja zvuka ka jednoj tački (plava boja) i u slučaju usmeravanja zvuka ka dvema tačkama sa odvojenim zvučnicima na frekvencijama a) 630 Hz b) 1250 Hz c) 2500 Hz i d) 4000 Hz i u slučaju usmeravanja zvuka ka dvema tačkama sa kombinovanim zvučnicima na frekvencijama e) 630 Hz f) 1250 Hz g) 2500 Hz i h) 4000 Hz

Drugo i treće rešenje pokazuju da je moguće istovremeno softverski uticati na pravce u kojima će se signal emitovati. Ova rešenja su primenjiva u situacijama kada želimo da direktnim zvukom pokrijemo više različitih auditorijuma. Kao i kod prvog rešenja na nižim frekvencijama usmerenost je relativno mala, a na višim frekvencijama se uočava jasna pojava dva loba pod uglovima od -45° i 45° . Problem koji se javlja kod drugog rešenja jeste velika širina lobova na visokim učestanostima. Do smanjenja usmerenosti dovodi korišćenje samo polovine zvučnika. Treće rešenje koje je pomenuto rešava ovaj problem. Korišćenje svih osam zvučnika daje mogućnost boljeg usmeravanja signala. Možemo primetiti da su u ovom slučaju lobovi uži u odnosu na prethodni slučaj. Takođe, lobovi u ovom rešenju se gotovo podudaraju sa širinom glavnog loba iz prvog rešenja.

V. ZAKLJUČAK

Rezultati koji su dobijeni prikazuju da je moguće softverskom obradom signala upravljati širinom i pozicijom snopova signala. Pokazano je da je moguće dodati još jedan nezavisni snop signala bez kvarenja već postojećeg snopa. Takođe, rešen je problem koji se javlja prilikom korišćenja polovine zvučnika za usmeravanje zvuka ka dvema tačkama. Značaj dobijenih rezultata leži u činjenici da su ova rešenja primenjiva u praksi. Rezultati eksperimenata pokazuju dobro

poklapanje sa rezultatima simulacije, čime je potvrđena validnost simulacionog modela.

Budući rad će obuhvatati rešenja kod kojih će se drugačije računati kašnjenja. Moguće je za konkretnu geometriju niza i konkretan frekventijski opseg naći optimalna kašnjenja pomoću optimizacionog algoritma. Kašnjenja bi se razlikovala u zavisnosti od uslova koji bi se postavio. Neki od uslova bi mogli biti da odnos glavnih i bočnih lobova bude minimalan ili da širina lobova bude minimalna.

Na samom početku rada pomenuto je da je nemoguće u potpunosti eliminisati bočne lobove jer oni nisu samo posledica frekvencije na kojoj se signal šalje, već i geometrije niza. Još neka poboljšanja postojećih rešenja mogla bi se ogledati u tome da je moguće odrediti kojih 8 od 12 zvučnika je optimalno koristiti na zvučničkom nizu da bi se smanjio uticaj bočnih lobova. Takođe, problem bočnih lobova je moguće rešiti optimalnim rasporedom zvučnika na zvučničkom nizu, odnosno menjanjem geometrije niza.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] M. Bjelić, A. Golubović, M. MihiGolubović, M. MihiGolubović, M. Mijić, "Realizacija zvučnog sistema sa softverskom kontrolom usmerenosti," Beograd, Srbija, 2020
- [2] Chuang Shi, Yoshinobu Kajikawa, Woon-Seng Gan, "Generating dual beams from a single steerable parametric loudspeaker", Osaka, Japan, 2015
- [3] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Laboratorijski model zvučnog stuba sa softverski kontrolisanom usmerenošću, Tehničko rešenje 2015
- [4] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na: <https://learn.bela.io/>, pristupano 14.4.2022.
- [5] Tehnička dokumentacija proizvođača: [.http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/MiniSPL-Measurement](http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/MiniSPL-Measurement)
- [6] A. Mitra: On the Properties of Pseudo Noise Sequences with a Simple Proposal of Randomness Test, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research and Innovation, Vol. 2, No .9, 2008, pp. 631 – 636.

ABSTRACT

This paper presents the implementation of software-oriented speaker systems. Software and hardware implemented directional speaker systems, in addition to increasing the sound level in a given

direction, also lead to a reduction in reverberation. The implementation used a speaker array and a processor on which three different signal processing algorithms are executed. The first solution involves directing the sound to one set point, and the second and third solutions involve directing the sound to two points that are arbitrarily set. The emphasis of the paper is on the second and third solutions used in cases when we want to provide coverage of two directions in the auditorium. In addition to three independent algorithms, the paper also presents a simulation that can be used to predict directional diagrams in all three cases. The results of the algorithm were quantified by measuring the directivity diagrams in 1/3 octave frequency bands. The details of the implementation and the details to pay attention to when working with hardware Bela platform will be mentioned. The paper presents the improvements obtained by using two, instead of one sound beam.

Implementation of speaker array directional control algorithms with two main lobes on open hardware

Tijana Đorđević, Stefan Aćimović, Miloš Bjelić

Optimizacija pozicija zvučnika u zvučničkom nizu

Stefan Aćimović, Tijana Đorđević, Miloš Bjelić

Abstract— Optimizacioni algoritmi sve više nalaze primenu o raznim oblastima, kako nauke, tako i života. Uz analizu softverske kontrole usmerenosti zvučničkog sistema javila se i potreba za optimizacijom već postojećih rešenja. U ovom radu prikazano je kako se na više načina može doći do rešenja 2D optimizacione funkcije, gde se najbolje rešenja bira iz niza dovoljno dobrih. U radu je prikazan algoritam za prostorno-vremensku obradu signala koji omogućava upravljanje dijagramom usmerenosti u vertikalnoj ravni. Poboljšanje postojećih rezultata izvršeno je uz pronalaženje linearne pozicije 16 zvučnika u zvučničkom stubu, tako da njegov dijagram usmerenosti bude što usmereniji za određeni prostorni ugao i da je odnos glavnog i bočnih lobova što veći. Za ove rezultate koristili su se parametri u vidu dva koeficijenta koji su dovoljno dobro opisivali kvalitet rešenja, tako što se svako rešenje smeštalo u funkciju, a nalaženje najboljih se sprovodilo preko Pareto fronta. Popunjavanje tačaka, odnosno rešenja dodatno se ubrzalo sa genetičkim optimizacionim algoritmom koji je u znatno manje iteracija doveo do jednako dobrog rešenja kao i metod slučajnog generisanja potencijalnog rešenja.

Ključne reči — algoritmi, obrada signala, optimizacija, pareto front, genetički algoritam, softverska kontrola, usmerenost, zvučnički niz.

I. UVOD

Zvučnički sistemi koji se koriste u sistemima za ozvučavanje treba da prenesu zvučni sadržaj do slušalaca koji se nalaze u određenom delu prostora. Zvučna energija koja odlazi u deo prostora na kome nema slušalaca na otvorenom prostoru predstavlja gubitak, a u prostorijama ima negativne posledice na percepciju zvuka jer dodatno pobuđuje reverberacioni proces. Zbog toga se u sistemima za ozvučavanje koriste usmereni zvučnički sistemi da bi se najveći deo zvučne snage slao u prostor gde se nalaze slušaoci. Usmereni zvučnički sistemi podrazumevaju da se grupa zvučnika nalazi na jednoj lokaciji i da su koncentrisani u jedinstven sistem. U ovu grupu zvučničkih sistema, na primer, spadaju takozvani *Line array* sistemi, kod kojih se usmerenost postiže tako što je zvučnička skupina zakrivljena, to jest pojedinačni zvučnici se nalaze na različitim udaljenostima od mesta prijema [1].

Zvučnički nizovi čiji se dijagram usmerenosti obradom

signala usmerava postaju sve popularniji i tema su ovog rada. Ideja rada je razmatranje načina kako da se gubitak zvučne energije minimizira. Rešenje koje se razmatra u ovom radu je optimizacija pozicija 16 zvučnika, koji stoje u istoj osi, ali na različitim rastojanjima. U sličnim radovima iz ove oblasti predstavljena su uglavnom rešenja sa uniformnom raspodelom zvučnika ili sa jednostavnijom računicom koja je vezana za liniju kašnjenja i odgovarajuću raspodelu zvučnika. Metod nalaženja najboljih pozicija zvučnika u zvučničkom stubu svodi se na tehnike optimizacije 2D funkcije i nalaženja skupa pogodnih rešenja koja zajedno čine pareto front. Baš zbog prirode problema koja zahteva da se dve stvari optimizuju, a koje su zavisne. Pareto front se uveo kao potencijalni alat za rešavanje ovog problema. U ovom radu je služio kao kriterijum za ocenjivanje skupa rešenja od kojih je odabrano ono najpovoljnije. Pošto Pareto front daje skup (front) rešenja gde je svako podjednako dobro, komparativnom metodom je utvrđeno koje rešenje je dovoljno dobro za predstavljeni problem [2].

Od celog fronta bira se jedino rešenje, tako da najmanje šteti uslovima optimizacije. Uslovi su da je odnos glavnog i bočnog loba što veći (što bi značilo da je gubitak energije manji) i da je širina glavnog loba što manja (odnosno da je što više moguće usmeriti zvučnički niz po svim oktavnim opsezima i za sve zadate uglove).

Metode optimizacije koje su se koristile u ovom radu jesu slučajno generisanje rešenja u pareto front, kao i genetički algoritam [3]. Oba algoritma se svode na skupinu koeficijenata koji na neki način opisuju trenutno rešenje i koliko dobro ono zadovoljava oba gore pomenuta uslova, zatim se od najboljih mogućih rešenja, koja su sastavljena u front, odabira najbolje moguće. Ovakvo rešenje proverava se za sve uglove od značaja, kao i da li se može fizički realizovati, odnosno da nema preklapanja jednog zvučnika preko drugog. Uglovi od značaja su nam oni uglovi koji se koriste i kada se fizički usmeravaju nizovi zvučnika na većim ili manjim prostorima, okvirna granica može biti od 30° do 60° . Metode provere svode se na poređenje već postojećih rešenja sa uniformnom raspodelom zvučnika, kao i na prethodna dobijena rešenja, kako preko algoritma, tako i preko drugih radova iz literature.

II. METODOLOGIJA

A. Zvučnički niz i dijagram usmerenosti

Za definisanje problema optimizacije potrebno je uvesti element koji je povoljan, tako da se lako može vršiti obrada nad njim u softverskom, a i da se rezultat može primeniti i u

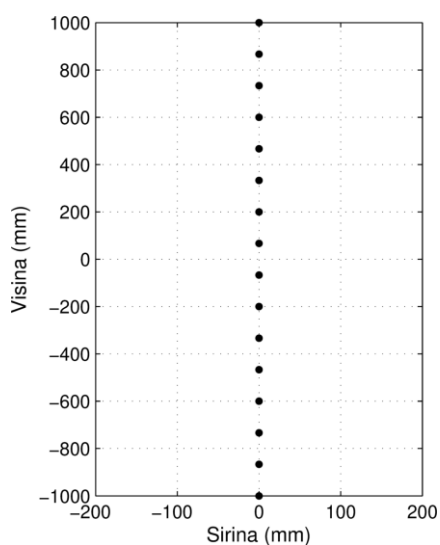
Stefan Aćimović - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: as213306m@student.etf.bg.ac.rs).

Tijana Đorđević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dt213283m@student.etf.bg.ac.rs).

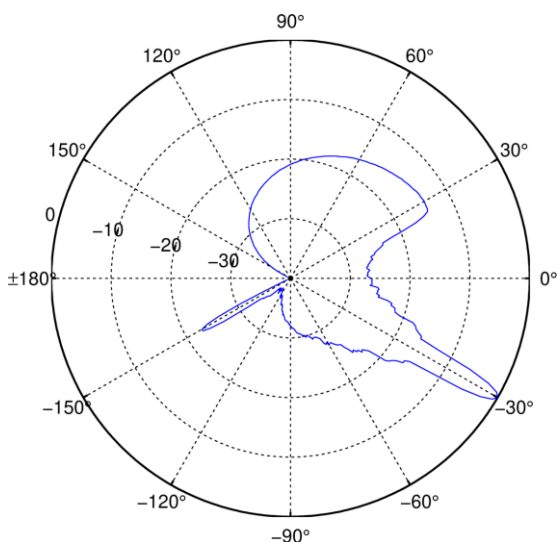
Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

hardverskom delu sistema. Metodologija koja je primenjena u ovom radu jeste menjanje relativnih pozicija svih 16 zvučnika, zatim računanje dijagrama usmerenosti koji se posle delom pretvara u koeficijente koji su služili za dalju optimizaciju.

Na slici 1 prikazana je pozicija zvučnika u uniformnom raspodelom pozicija zvučnika. Dimenzija zvučničkog niza koja je definisana u ovom radu je 2 metra. Na osnovu poznatih pozicija zvučnika i poznavanja njihovog dijagrama usmerenosti moguće je dobiti dijagram usmerenosti zvučničkog niza [4]. Adekvatnom obradom signala za pojedinačne zvučnike moguće je izvršiti usmeravanje glavnog loba u dijagramu usmerenosti za željeni prostorni ugao. Na slici 2 prikazan je izgled dijagrama usmerenosti uniformnog niza za određeni prostorni ugao [5].



Sl. 1. Raspored zvučnika za uniformnu geometriju zvučničkog stuba



Sl. 2. Dijagram usmerenosti uniformnog zvučničkog niza za prostorni ugao -30° i 1/3 oktavnog frekvencijski opseg 1250 Hz

Bočni lobovi predstavljaju problem u smislu gubitka energije, jer je cilj imati što usmereniji glavni lob [6], a idealno bi bilo da bočni lobovi budu maksimalno potisnuti. Kod uniformne raspodele zvučnika jasno se može videti da

energija koju ima bočni lob samo oko 10 dB manja u odnosu na glavni lob za frekvencije već oko 1000 Hz, što se vidi na Sl. 4. Sa povećavanjem frekvencije glavni i bočni lob postaju jednaki. Svaki rezultat koji za cilj ima da smanji odnos glavnog i bočnog loba čak i za 1 dB može se smatrati kao povoljnim rešenjem, jer je početna tačka odnosa lobova na nuli. Uz algoritme optimizacije dokazano je u radu da se bočni lob može smanjiti čak i do 10 dB.

B. Pareto front i slučajno generisana geometrija

Kod pristupa slučajnog generisanja pozicija zvučnika u zvučničkom nizu pozicije su generisane iz skupa $[-1, 1]$ metar, što su maksimalne dimenzije zvučničkog niza. Na osnovu dobijene geometrije izračunava se dijagram usmerenosti, usmeren za određeni prostorni ugao. Zatim je na osnovu dobijenog dijagrama moguće izračunati koeficijente sa kojima se opisuje širina glavnog loba, odnosno njegova usmerenost, kao i odnos glavnog i najvećeg bočnog loba. Koeficijenti se izračunavaju na osnovu sledećeg izraza:

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 * x[n], n \in \left[0, \frac{1}{3} * end\right] \\ x[n], n \in \left[\frac{1}{3} * end, end\right] \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta = \begin{cases} x[n], n \in \left[0, \frac{1}{3} * end\right] \\ 0.5 * x[n], n \in \left[\frac{1}{3} * end, end\right] \end{cases}$$

gde su α i β koeficijenti kojima se opisuju frekvencijski koraci od po 50 Hz za odnos glavnog i bočnog loba, kao i usmerenost glavnog loba respektivno. Ovde se jasno vidi da postupak optimizacije zapravo zavisi od dva parametra koja nisu nezavisne, već zajedno prave potencijalnu skupinu rešenja koja se može predstaviti u 2D površi. Za rešavanje ovog problema uveden je Pareto front.

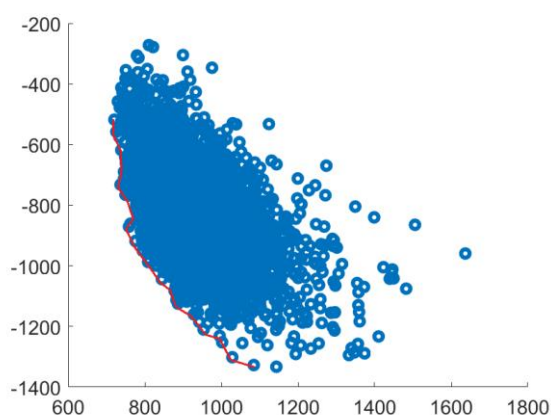
Pareto front (koji se takođe naziva Pareto granica ili Pareto skup), koristi se u višedimenzionoj optimizaciji i predstavlja skup svih Pareto efikasnih rešenja. Koncept se široko koristi u inženjerstvu. Omogućava se ograničenje pažnje na skup efikasnih izbora, te je umesto da se razmatra čitav opseg svakog parametra, pravljenje kompromisa u okviru ovog skupa jedna od stvari koje su neizbežne i neophodne.

Pareto front se može lako opisati kao pomoć u odabiru velikog niza kolača od kojih svaki ima određenu vrednost koliko je ukusan i koliko kalorija vredi. Te dve vrednosti su povezane i ne mogu se nezavisno menjati, obično što je kolač ukusniji, to više kalorija ima. Pareto front nam služi da od gomile kolača odaberemo nekoliko ili jedan koji će biti dovoljno sladak i imati onoliki broj kalorija koji možemo da pojedemo a da se ne osećamo loše. Za taj broj kalorija pareto nam sigurni može tvrditi da smo izabrali najsladši kolač i obrnuto, za kolač odabrane slatkoće nam može tvrditi da od ostalih kolača iste slatkoće, mi smo definitivno izabrali onaj sa najmanje kalorija.

Koeficijenti koji su primenjeni ovde dobijeni su empirijski gde se uz nekoliko eksperimenata dobilo saznanje o tome koji

je skup frekvencija više, a koji je manje važan za određivanje najbolje moguće pozicije zvučnog niza.

Na slici 3 prikazan je skup rešenja koji se dobiju bilo za slučajno generisanje zvučnog niza ili uz genetički algoritam. Svaka tačka predstavlja rezultat jedne geometrije koja se uz formulu koeficijenta stavlja na 2D *scatter* rezultat. Crvena linija predstavlja Pareto front odnosno sva rešenja koja su podjednako dobra. Cilj nam je da vrednosti na obe ose budu što manje, ali se uglavnom smanjivanjem jedne vrednosti povećava ona druga [7]. Za rešenja koja su povoljna ovom radu uzimao se kriterijum gde je značajnije imati smanjenje od 1 dB bočnog loba nego povećanje usmerenosti glavnog loba za 1°. Apsisa predstavlja rezultate koeficijenta koji opisuje usmerenost glavnog loba, dok ordinata predstavlja rezultate odnosa bočnog i glavnog loba. Na ovom primeru bi neko potencijalno rešenje bilo više prema desnoj strani Pareto fronta.



Sl. 3. Pareto front koji prikazuje povezanost oba uslova, širinu glavnog loba i odnos glavnog i bočnog loba zajedno sa koeficijentima.

C. Genetički algoritam

Koeficijenti primenjeni u ovom pristupu dobijeni su empirijski gde se uz nekoliko eksperimenata dobilo saznanje o tome koji je skup frekvencija više, a koji je manje važan za određivanje najbolje moguće pozicije zvučnog niza. Pored slučajne raspodele rešenja koristio se modifikovani genetički algoritam, čiji su osnovni principi uvek isti, ali se za ovaj problem algoritam u nekim delovima razlikuje od klasičnog pristupa. Genetički algoritam veoma je popularan optimizacioni algoritam i njegova rasprostranjenost i primena je velika. Od NASA antene koja prikuplja i šalje zrake određenih frekvencija sa najmanjim gubicima do svih omiljenih stvari koje možete staviti u kofer za avion, a da one ne prevaziđu određenu težinu [8].

Jasno je da se genetički algoritam koristi za traženje optimalnog rešenja od gomile ponuđenih uz dodatne uslove. Osnovni koraci genetičkog algoritma su sledeći:

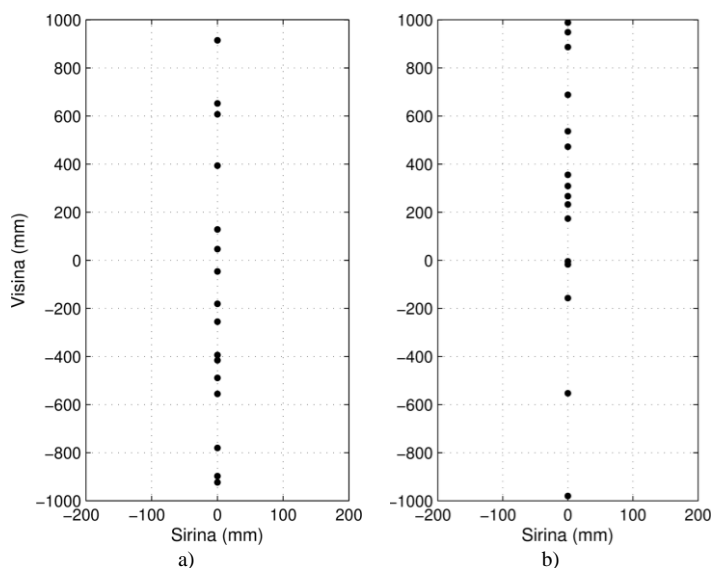
- Nulta generacija (skup genoma)
- Fitnes funkcija
- *Crossover* funkcija
- Odabir novih genoma
- Mutacija (opciono)
- Nova generacija

Algoritam radi po gore pomenutim tačkama, gde je nulta generacija zapravo populacija slučajno izabranih distanci zvučnika zvučnog niza. Sam početak je isti kao i za generisanje slučajnih pozicija zvučnika. Fitnes funkcija ovde je predstavljena na način koliko dobro jedan genom, odnosno raspodela zvučnog niza daje rezultat u vidu tačke pareto fronta. Svaki zvučnički niz nulte generacije prolazi kroz ovu funkciju. Nakon toga se odabiraju dva najbolja iz generacije i šalju se na *crossover* funkciju. Jedinke, odnosno zvučnički nizovi koji se šalju na *crossover* funkciju nazivaju se roditelji, a njihovi rezultati ukrštanja, deca. Roditelji se ukrštaju tako što se na slučajnom mestu prepolovi zvučnički niz i od tog mesta se zameni sa drugim roditeljem, isto tako se dešava i za drugog roditelja.

Nakon ovih rezultata odabiraju se ostali genomi koji će na neki način učestvovati u sledećoj generaciji. Tehnika koja je rađena u ovom radu jeste tehnika turnira, gde se nasumično biraju dva genoma, te onaj sa boljom fitnes funkcijom ide u turnir, postupak se ponavlja, te se onda dva pobednika vode na *crossover* funkciju, njihova deca se šalju u novu generaciju. Neki genomi generisani su ponovo slučajno i dodati u novu generaciju. Nakon toga postoji i opcionalna mutacija koja sa malom verovatnoćom menja jedan deo jednog slučajnog broja genoma, odnosno poziciju jednog od zvučnika u celom zvučničkom nizu. Tako se dobija nova generacija i ceo postupak se ponavlja ponovo kao i za nultu generaciju genoma.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 4 su prikazani rezultati slučajnog rasporeda zvučnika i rasporeda zvučnika dobijenog genetičkim algoritmom.

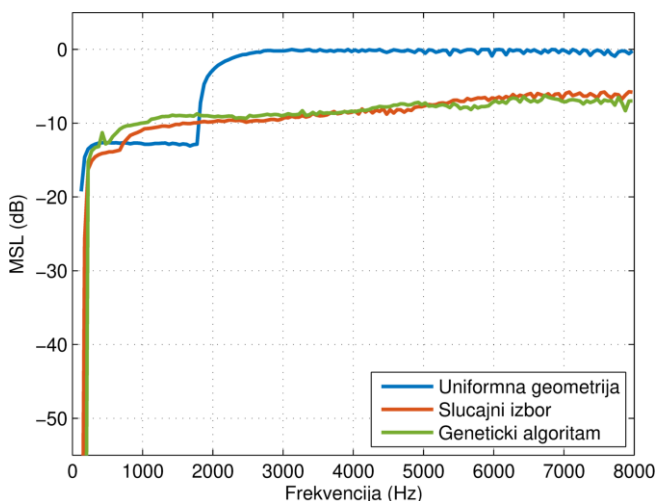


Sl. 4. Raspored zvučnika na osnovu rezultata algoritma: a) Slučajni raspored i b) Genetički algoritam

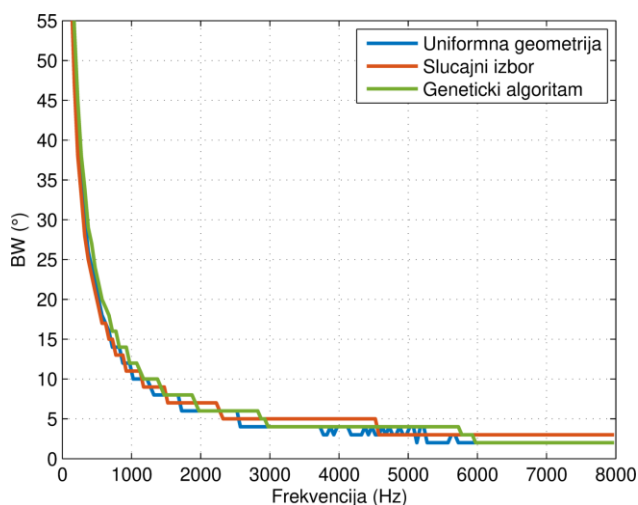
Na osnovu prikazanih geometrija izračunati su parametri pomoću kojih je moguće proceniti kvalitet rešenja: odnos glavnog i maksimalnog bočnog loba (MSL) i širina glavnog loba (BW). Ovi parametri izračunati su za frekvencijski opseg

od interesa i za prostorni ugao od -30 stepeni za glavni lob. Na slici 5 je prikazana frekvencijska zavisnost parametra koji predstavlja odnos glavnom i najvećeg bočnog loba.

Kod pristupa rešavanja gde su se pozicije zvučnickog niza sasvim slučajno generisale dobijene su znatno niže vrednosti bočnih lobova, za gotovo ceo frekvencijski opseg. Isti slučaj daje i genetički algoritam, što je bio cilj. U odnosu na uniformnu raspodelu jasno se vidi da slučajno generisanje daje daleko bolje rezultate za bilo koji frekvencijski opseg, a da time nije narušilo usmerenost glavnog loba, što znači da definitivno postoji kombinacija rasporeda zvučnika u zvučnickom nizu koja se može i hardverski realizovati, isti rezultat u odnosu na uniformnu raspodelu zvučnika vidi se i sa genetičkim algoritmom. Sa slike 5 se vidi da se za slučajno generisanje nešto bolji odnos lobova vidi na nižim frekvencijama, dok kod viših dominira genetički algoritam. Oba rešenja se mogu smatrati za dobrim, jer je razlika ovih rešenja između 1 dB do 2 dB u nekim frekvencijskim opsezima. Važna napomena je ta da je za generisanje rešenja slučajne raspodele bilo potrebno preko 200000 iteracija algoritma, dok se sličan rezultat postigao sa 1500 iteracija genetičkim algoritmom.



Sl. 5. Frekvencijska zavisnost nivoa bočnih lobova zvučnickog niza



Sl. 6. Frekvencijska zavisnost nivoa bočnih lobova zvučnickog niza

Zvučnički niz dobijen slučajnim generisanjem pozicija zvučnika predstavlja daleko bolje rešenje od uniformne raspodele pozicija. Ovakvo rešenje može se dobiti uz veliki broj različitih rešenja i svođenja rezultata na front, bez ikakve dodatne optimizacije, koja bi ta rešenja dalje poboljšavala. Već sa ovim pristupom može se pokazati da za 16 zvučnika, sa kardiodnom usmerenosti postoje rešenja softverskog usmeravanja zvučnika takva da je u svim oktavnim opsezima od važnosti odnos glavnog i bočnog loba iznosi približno 10 dB. Prednost uniformne raspodele zvučnika je ta što na različitim uglovima usmerenosti ona daje jako malu širinu glavnog loba, što se može videti na prikazanom grafiku. Rešenje koje je dobijeno slučajnim generisanjem rešenja, ne samo da je bolje u smislu odnosa lobova, nego je i zadržalo visok nivo usmerenosti glavnog loba na svim frekvencijskim opsezima. Kao jedna od mera za izbor povoljnog rešenja bio je i kriterijum da je razlika bočnog i glavnog loba od dodatnih 2 dB znatno bitnija nego smanjenje usmerenosti glavnog loba za 2° .

Rezultati dobijeni genetičkim algoritmom su veoma slični rezultatima slučajne raspodele, samo što postoji jedna važna razlika razlika koja se ogleda u vremenu izvršavanja algoritma. Vreme koje je bilo potrebno računaru da dođe do optimalnog rešenja sa slučajnom raspodelom bilo je tri dana, dok je genetički algoritam došao do jednako dobrog rešenja za sat vremena.

IV. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati jasno prikazuju da su rešenja dobijena optimizacijom na oba načina daleko bolja od polaze situacije. Sa softverskom simulacijom je pokazano da se na različite načine može doći do rešenja koje u većini delova frekvencijskog spektra od značaja uspeva da suzbije bočni lob za čak 10dB, a da pritom ne šteti povećanju širine glavnog loba.

Budući radovi koji se zasnivaju na modernijim metodama optimizacije stoje na raspolaganju. Potrebno je uvesti dodatna ograničenja na algoritam, tako da se definitivno omogući i hardverska realizacija rešenja. Pored biranja najbolje pozicije zvučnika u zvučnickom nizu, takođe se javlja mogućnost da se odabiraju i najoptimalnija kašnjenja sa istim i sličnim algoritmima sa kojima se dolazilo do gore pomenutih rešenja.

Zbog fizike problema, na niskim frekvencijama je jako teško dodatno usmeriti glavni lob, a da to ne utiče na povećanje odnosa glavnog i bočnog loba, pogotovo na višim frekvencijama. Takođe se vidi i da se bočni lobovi nikada ne mogu potpuno suzbijati, te se gubitak energije može samo optimalno smanjiti. Ovaj rad samo otvara novo poglavlje u kome je optimizacija ponovo našla svoju primenu, a ostavlja skup mogućnosti i ideja kojima se ovakvi problemi mogu dodatno razložiti i potencijalno još bolje i efikasnije rešiti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

REFERENCES

- [1] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations," in Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997, doi: 10.1109/5.622504.
- [2] A. Kesireddy, L. R. Garcia Carrillo and J. Baca, "Multi-Criteria Decision Making - Pareto Front Optimization Strategy for Solving Multi-Objective Problems," 2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation (ICCA), 2020, pp. 53-58, doi: 10.1109/ICCA51439.2020.9264536.
- [3] S. D. Immanuel and U. K. Chakraborty, "Genetic Algorithm: An Approach on Optimization," 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES), 2019, pp. 701-708, doi: 10.1109/ICES45898.2019.9002372.
- [4] D. N. Swingler and R. S. Walker, "Line-array beamforming using linear prediction for aperture interpolation and extrapolation," in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, no. 1, pp. 16-30, Jan. 1989, doi: 10.1109/29.17497.
- [5] Array Signal Processing, NJ, Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1985.
- [6] M. Bjelić, A. Golubović, M. MihiGolubović, M. MihiGolubović, M. Mijić, "Realizacija zvučničkog sistema sa softverskom kontrolom usmerenosti," Beograd, Srbija, 2020
- [7] X. -B. Hu, M. Wang, X. -B. Hu and M. S. Leeson, "Calculating the complete pareto front for a special class of continuous multi-objective optimization problems," 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2014, pp. 290-297, doi: 10.1109/CEC.2014.6900297.
- [8] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and applications [in engineering design]," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, Oct. 1996, doi: 10.1109/41.538609.

ABSTRACT

Optimization algorithms are increasingly being applied in various fields, both science and life. Along with the analysis of the software control of the direction of the speaker system, there was also a need to optimize the already existing solutions. In this paper, it is shown how the solution of the 2D optimization function can be reached in several ways, where the best solutions are chosen from a series of good enough ones. The paper presents an algorithm for spatial-temporal signal processing that enables control of the direction diagram in the vertical plane. For these results, parameters in the form of two coefficients were used, which described the quality of the solution well enough. Each solution was placed in a function, and finding the best was carried out via the Pareto front. Filling in the points, ie the solution, was additionally accelerated with the genetic optimization algorithm, which in significantly fewer iterations led to an equally good solution as the method of random generation of a potential solution.

Optimization of a loudspeaker system with software-controlled directivity

Stefan Aćimović, Tijana Đorđević, Miloš Bjelić

Realizacija sistema za aktivnu kontrolu buke u cevi na otvorenom hardveru

Marija Ratković, Nebojša Kolarić, Miloš Bjelić

Apstrakt— ANC (Acoustic Noise Control) sistemi su neophodni u prostorijama gde se traži eliminisanje neželjenih zvukova. U ovom radu bavili smo se simulacijom i implementacijom na hardveru ANC sistema u cevi. Testirani su adaptivni algoritmi FxLMS (Filtered x Least Mean Square) i NFxLMS (Normalized Filtered x Least Mean Square). Algoritmi su poređeni po robusnosti sistema, neophodnom redu adaptivnog filtra i brzini konvergencije. U simulaciji su kao test signali korišćeni: sinusoida, klipovana sinusoida i šum realnog ventilatora. U zavisnosti od kompleksnosti test signala menjali su se parametri adaptivnog filtra. Rezultati pokazuju da je moguće potisnuti akustičku buku do određene granice u zavisnosti od kompleksnosti signala, kao i da je moguće takve algoritme implementirati na otvorenom hardveru.

Ključne reči— Aktivna kontrola buke, adaptivni algoritmi, filtri, hardverska implementacija, LMS.

I. UVOD

Jedna od najuspešnijih primena ANC (*Acoustic Noise Control*) sistema je njihova implementacija u cevi [1]. Razlog tome je što veliki broj uređaja koji prave buku koriste cevi za njihovu primarnu namenu, samim tim jednostavno je implementirati ovakav sistem. Potiskivanje buke prouzrokovane šumom ventilatora, koji se nalaze u mnogim električnim uređajima kao što su transformatori, računari i sistemi za klimatizaciju, je jedna od najčešćih primena ovakvih sistema. Ovakvi akustički zvukovi mogu nepoželjno da utiču na čoveka, da ga psihički zamaraju i ometaju u radu.

U ANC sistemu, digitalni kontroler vrši obradu nad neželjenim signalom i na njegovom izlazu se generiše signal koji je iste amplitude a suprotne faze sa primarnom bukom koju želimo potisnuti. Superpozicijom ova dva zvučna signala na izlazu iz sistema (cevi) se formira zona koja je približna zoni tišine, potiskivanjem početnog šuma [2].

Tradicionalne metode za potiskivanje šuma, poput korišćenja apsorpcionih materijala imaju lošije performanse na niskim frekvencijama. Zbog toga je ANC predložen kao rešenje za taj problem, da bi se u kombinaciji sa zvučnim apsorberima što više smanjio neželjeni akustički šum. Primena ovakvog sistema pronalazi svoje mesto u prostorijama u kojima je neophodno obezbediti što veći nivo

tišine, kao što su muzički studio, koncertne sale. Postići će se potiskivanje buke na niskim frekvencijama i doprineti klasičnim načinima potiskivanja buke. Konkretna buka na koju se misli su šumovi ventilatorskih sistema koji se koriste za protok vazduha u samim prostorijama. Samim tim što ove velike cevi kroz koje struji vazduh nije moguće zapušiti sa nekim akustičkim materijalom, neophodno je naći drugi način za postizanje tišine što nam omogućava ovakav način implementacije.

Ideja ovog rada je ispitivanje mogućnosti implementacije ovog sistema za adaptivnu obradu signala na realnom modelu korišćenjem otvorenog hardvera *Bela*, uz ispitivanje krajnjih mogućnosti hardvera i njegovih mogućnosti za primenu u realnim sistemima. Model na kom je sistem implementiran se sastoji od cevi sa zadebljanim zidovima, dva zvučnika i dva mikrofona, koji imaju za cilj da na što bolji način simuliraju realnu cev za ventilaciju kroz koju se prostiru ravanski talasi.

U literaturi [1] je opisana implementacija ovog sistema sa FxLMS (*Filtered x Least Mean Square*) algoritmom [3]. Ovaj algoritam pruža stabilnost čitavom sistemu, što je njegova ključna prednosti u odnosu na poznati LMS (*Least Mean Square*) algoritam [4]. U ovom radu je ispitan FxLMS i zaključeno je da koeficijenti adaptivnog filtra sporo konvergiraju do svojih optimalnih vrednosti. Na osnovu toga je zaključeno da je potrebno upotrebiti drugi adaptivni algoritam [5]. Algoritam koji je približno jednostavan kao i FxLMS je NFxLMS (*Normalized Filtered x Least Mean Square*) [6]. On omogućava bržu konvergenciju koeficijenata, što je jako bitno prilikom implementacije ovog sistema na hardveru.

Krajnji cilj ovog istraživanja je ispitivanje za koji ulazni signal i koju kompleksnost algoritma je moguće realizovati ovakav sistem na hardveru. U radovima iz literature [7] je korišćena frekvencija odabiranja od 8 kHz, što je daleko manje od frekvencije koju je neophodno koristiti u realnom sistemu kako bi čitav sistem funkcionisao. Tokom testiranja sistema testirano je više frekvencija odabiranja, uz ograničenje da sa povećanjem frekvencije odabiranja raste kompleksnost. Posebna pažnja se obraća na maksimalno slabljenje koje će sistem u hardverskoj implementaciji obezbediti, i razlike u odnosu na slabljenje postignuto u simulaciji.

II. METODOLOGIJA

A. ANC

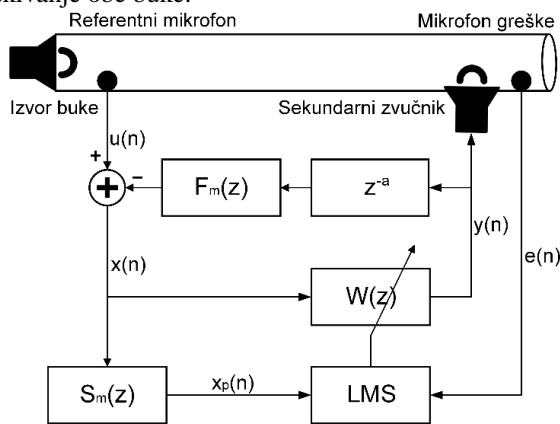
Aktivna kontrola buke je elektroakustički sistem koji potiskuje primarnu buku. Sistem je baziran na principu

Marija Ratković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: rm180095d@student.etf.bg.ac.rs).

Nebojša Kolarić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: kn180670d@student.etf.bg.ac.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

superpozicije. Na slici 1. je prikazan model ANC-a. Sistem zahteva referentni mikروفон neophodan za prikupljanje referentnog signala koji potiče od izvora buke, a koji treba potisnuti. Na kraju cevi se nalazi mikروفон koji prikuplja zbirni signal primarne i sekundarne buke, odnosno skuplja ukupnu grešku. Sekundarna buka proizilazi iz sekundarnog zvučnika koji emituje signal tako da je suprotan primarnoj buci. To ima za cilj da anulira primarnu buku i na taj način stvara zonu tišine u tom okruženju. ANC kontroler podešava svoje parametre na osnovu signala skupljenih na primarnom i sekundarnom mikروفonu, kontroler je baziran na LMS adaptivnom algoritmu. Algoritam je zadužen da podešava koeficijente adaptivnog filtra tako da se greška na sekundarnom mikروفonu minimizira. Na izlazu iz kontrolera se generiše signal koji će biti reprodukovano na sekundarnom zvučniku, koji je jednak po amplitudi i suprotan po fazi sa primarnom bukom. Njihovim kombinovanjem dobija se potiskivanje obe buke.



Sl. 1. Blok šema ANC sistema

B. Opis algoritma

U ovom delu je detaljno objašnjen FxLMS algoritam [8], na osnovu blok šeme prikazane na slici 1. Impulsni odzivi modelovanih filtara, $S_m(z)$ i $F_m(z)$, su određeni pomoću adaptivnog algoritma za identifikaciju nepoznatog sistema. Impulsni odzivi primarne i sekundarne putanje modelovani su funkcijom *fir2*, koja je ugrađena u Matlabu. Primarna buka na ulazu u referentni mikروفon koju treba potisnuti može biti izražena kao:

$$d(n) = P \times u(n) \quad (1)$$

gde P predstavlja impulsni odziv primarnog puta od referentnog mikrofona do mikrofona greške, a $u(n)$ predstavlja odbirke signala na referentnom mikروفonu. M predstavlja red filtra koji je modelovan od impulsnog odziva P . Za dalju obradu unutar LMS algoritma neophodno je obraditi ulazni signal $u(n)$ sa referentnog mikrofona.

U realizaciji ovog sistema se javlja problem akustičke povratne sprege koja potiče od sekundarnog zvučnika ka referentnom mikروفonu. Iz tog razloga neophodno je modelovanje još jednog impulsnog odziva F koji podrazumeva tu putanju i koji utiče na ulazni signal.

$$x(n) = u(n) - k(n) \quad (2)$$

gde $k(n)$ predstavlja signal koji je bio izlaz sekundarnog zvučnika zakašnjen za a odbiraka, propušten kroz filter reda K koji je modelovan impulsnim odziv, F_m [9].

$$k(n) = F_m \times y_a' \quad (3)$$

Broj odbiraka a za koji treba zakasniti sekundarni signal je izračunat kao odnos dužine dela puta od sekundarnog zvučnika do referentnog mikrofona i brzine prostiranja zvuka. Tako dobijena vrednost u vremenu pomnožena je vrednošću frekvencije odabiranja kako bi se dobio potrebn broj odbiraka. Neophodno je uračunati i vreme kašnjenja samog hardvera, označeno sa t_{Bela} , pri implementaciji algoritma na hardveru.

$$a = (t - t_{Bela}) \times f_s \quad (4)$$

U simulaciji nije neophodno korišćenje ovog dela, jer nema reprodukcije sa sekundarnog signala na sekundarni mikروفon. Samim tim nema ni ometanja u vidu akustičke povratne sprege. Ipak u realnoj implementaciji neophodno je posvetiti pažnju ovom delu. Na osnovu izloženog Zaključuje se da je u simulaciji $k(n)=0$.

Sekundarna putanja podrazumeva deo cevi od sekundarnog zvučnika do mikrofona greške, uz to ona obuhvata: digitalno analogni (D/A) konvertor, filter za rekonstrukciju, pojačavač, zvučnik i akustičku putanju od zvučnika do mikrofona greške, mikروفon, mikrofonski pretpojačavač i A/D konvertor. Neophodno je da ulazni signal pre ulaska u LMS algoritam bude propušten kroz model impulsnog odziva sekundarne putanje S_m [10], reda N .

$$x_p(n) = S_m \times x_1' \quad (5)$$

gde je x_1' ulazni signal za LMS algoritam, koji je jedan od parametara koji konfigurišu u relaciji za izračunavanje koeficijenata adaptivnog filtra, reda H . Signal y koji se reprodukuje na sekundarnom zvučniku dobija se propuštanjem signala x_p kroz adaptivni filter W . Svaki od odbiraka se računa na sledeći način:

$$y(n) = W \times x_2' \quad (6)$$

Sekundarna buka na mikروفonu greške $y_p(n)$, koja treba da potisne primarnu buku $d(n)$, dobija se propuštanjem sekundarne buke sa sekundarnog zvučnika kroz filter koji modeluje sekundarnu putanju S i ima red N :

$$y_p(n) = S \times y' \quad (7)$$

Signal greške $e(n)$ je primljen na mikروفonu greške, i on predstavlja razliku primarne i sekundarne buke:

$$e(n) = d(n) - y_p(n) \quad (8)$$

U FxLMS algoritmu koeficijenti adaptivnog filtra W se u svakoj iteraciji optimizuju kako bi greška $e(n)$ bila što manja, računaju se na sledeći način:

$$w(n+1) = w(n) + \mu \times x_p(n) \times e(n) \quad (9)$$

Parametar μ je konstantna male vrednosti koja se zadaje tako da konvergencija koeficijenata bude što brža. Ova vrednost ne sme biti prevelika da se optimalna vrednost ne bi preskočila u nekoj od iteracija. Algoritam bi trebalo da se izvrši onoliko puta koliko je potrebno da greška dostigne neku određenu, dovoljno malu vrednost. To će se postići kroz stalno menjanje koeficijenata filtra kako bi se što bolje prilagodila greška traženoj vrednosti.

U simulaciji je umesto FxLMS algoritma korišćen NFxLMS, kako bi koeficijenti brže iskonvergirali do optimalnih vrednosti [11]. Za NFxLMS se može koristiti manji red adaptivnog filtra što je ključni razlog za njegovo korišćenje u ovom radu, prilikom implementiranja na hardveru je potrebno smanjiti broj računskih operacija što se na ovaj način postiže. Jedina razlika između ova dva algoritma je što se drugačije računaju koeficijenti $w(n+1)$, tačnije promenljiv je korak adaptacije $\mu(n)$. Koeficijenti NFxLMS algoritma se računaju:

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n) \times x_p(n) \times e(n) \quad (10)$$

Parametar $\mu(n)$ se izračunava kao:

$$\mu(n) = \frac{\mu}{s + \delta} \quad (11)$$

gde δ predstavlja malu proizvoljnu konstantu. Vrednost $s(n)$ je izraženo kao:

$$s(n) = \sum_{i=0}^{H-1} x_p(n-1)^2 \quad (12)$$

C. Implementacija algoritma na realnom modelu

Algoritam je testiran na realnom modelu koji se sastoji od cevi dugačke približno jedan metar, dva zvučnika, primarnog i sekundarnog i dva mikrofona, kao što je prikazano na slici 2.

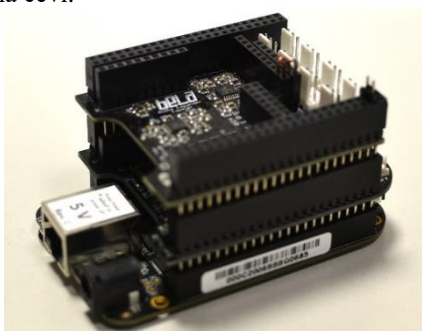


Sl. 2. Izgled korišćene cevi za hardversku implementaciju

Cev je dugačka 1 m, njen prečnik iznosi 7.5 cm. Korišćeni su širokopojasni zvučnici čija veličine membrane iznosi 3". Korišćeni su neusmereni elektret mikrofoni. Cev ima rezonantne frekvencije, koje se mogu odrediti preko izraza:

$$f = \frac{c}{4 \times L} \quad (13)$$

gde je c brzina zvuka u vazduhu koja iznosi približno 340 m/s, a L je dužina cevi.



Sl. 3. Bela procesor

Za implementaciju algoritma korišćena je platforma Bela, koja predstavlja računarski sistem namenjen za obradu audio signala, bazira se na BeagleBone platformi. Izgled Bela procesora prikazan je na slici 3. Glavna karakteristika ovog procesora je malo kašnjenje kada se obrađuju audio signali i

sistemi, kao što je ANC sistem. Korišćeni su dva audio ulaza i jedan audio izlaz koje Bela poseduje, sa frekvencijama odabiranja 22050 Hz. Primarni mikrofoni i mikrofoni greške su bili povezani na po jedan kanal ulaza, a sekundarni zvučnik je bio povezan na izlaz Bele. Primarni zvuk je generisan pomoću generatora, kojim su generisani signali različitih vremenskih oblika.

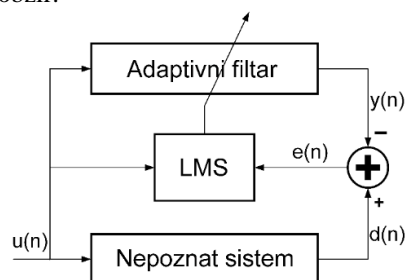
Adaptacija algoritma za generisanje sekundarnog zvuka izvršena je pomoću integrisanog razvojnog okruženja koje ovaj sistem poseduje. Razvojno okruženje bazirano je programskom jeziku C.

D. Modelovanje impulsnih odziva

U cevi je izvršeno snimanje svih potrebnih impulsnih odziva za softversku realizaciju (impulsni odziv primarne putanje, sekundarne, kao i putanje unazad od sekundarnog zvučnika do referentnog mikrofona). Kao što je ranije navedeno za konkretnu softversku implementaciju ovog sistema nije bio potreban impulsni odziv putanje unazad, F , ali će za hardversku implementaciju biti neophodan, zato je i on snimljen. Dobijene impulsne odzive je bilo neophodno modelovati, kako bi bili iskorišćeni u algoritmu.

U simulaciji ovi impulsni odzivi su bili modelovani FIR filtrima, korišćenjem ugrađenih funkcija, trudeći se da amplitudska i fazna karakteristika modela budu što sličnije originalnoj. Rezultati simulacija su zavisili od izabranih redova filtara. U zavisnosti od složenosti test signala neophodni redovi filtara su se menjali, od stotog pa sve do dve hiljaditog reda. U realizaciji u realnom vremenu na hardverskoj platformi ti redovi su preveliki i nije moguće koristiti ih. Zbog toga je bilo neophodno na drugi način modelovati tražene impulsne odzive.

Manji red filtara, do stotog reda, je dobijen modelovanjem impulsnih odziva preko paralelne veze IIR filtara drugog reda. Amplitudska karakteristika tako dobijenog modela je približno istog oblika kao i kod originalnog impulsnog odziva. Sa ovakvim modelima algoritam nije konvergirao, iz čega se zaključuje da amplitudska karakteristika nema veliki uticaj i da je mnogo bitnija fazna karakteristika koja se na ovaj način ne uzima u obzir.



Sl. 4. Blok šema za prepoznavanje nepoznatog sistema

Kao optimalno rešenje za modelovanje ovih putanja, tako da red filtra bude dovoljno mali i da se fazna karakteristika na što bolji način modeluje, korišćenje adaptivni algoritam za prepoznavanje nepoznatog sistema. Principijska blok šema sistema prikazana je na slici 4. Na ovaj način je očuvana i fazna i amplitudska karakteristika u onoj meri u kojoj je to neophodno kako bi čitav sistem funkcionisao. U simulaciji i u hardverskoj implementaciji su korišćeni isti modelovani filtri stotog reda.

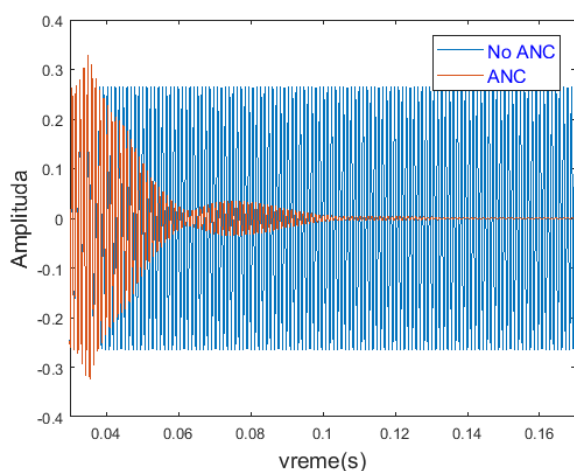
U hardverskoj implementaciji nije bilo potrebe modelovati primarnu putanju, jer će signal proći taj put i pretrpeće uticaj impulsnog odziva primarnog puta. Primarni signal koji treba potisnuti će biti pod uticajem zvuka sa sekundarnog zvučnika i to moramo izbeći. Zato je neophodno koristiti impulsni odziv putanje unazad kako bi uspeo da se generiše signal koji se pušta na sekundarnom zvučniku, koji je optimalan za potiskivanje primarnog signala.

III. REZULTATI

A. Rezultati simulacije

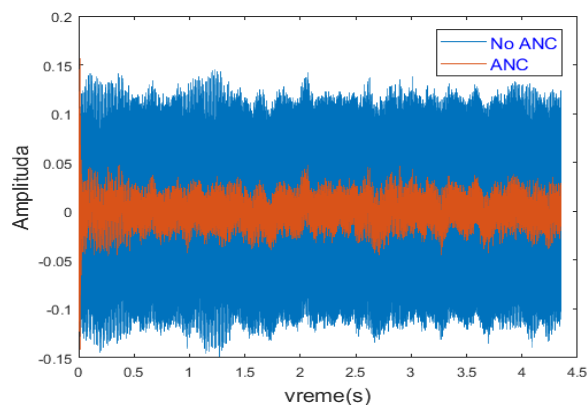
Korišćeno je više različitih primera signala kao izvore buke na referentnom zvučniku, kako bi se ispitale performanse sistema. Za svaki od slučajeva je bilo potrebno koristiti različite redove adaptivnog filtra. Za složenije signale bilo je neophodno povećati red filtra, kako bi dobili što bolje potiskivanje zvuka sa referentnog zvučnika. Takođe, pored menjanja redova filtra neophodno je bilo podešavati i statički korak adaptacije μ . Pritom se mora obratiti pažnja da vrednost μ ne bude prevelika jer bi se preskočilo optimalno rešenje i filter bi prooscilovao.

Prvi najjednostavniji primer na kome je isproban sistem je bila sinusoida koja je potisnuta u potpunosti, što se može videti sa slike 4. Na slici 4 je prikazan vremenski oblik originalnog signala na ulazu u mikrofonsku grešku kada ne bi bilo ANC sistema i signal greške e , gde jasno uviđamo da postaje nula. Za ovaj primer bio je dovoljan da vrednost reda adaptivnog filtra bude $H=50$, a korak adaptacije $\mu=0.001$.

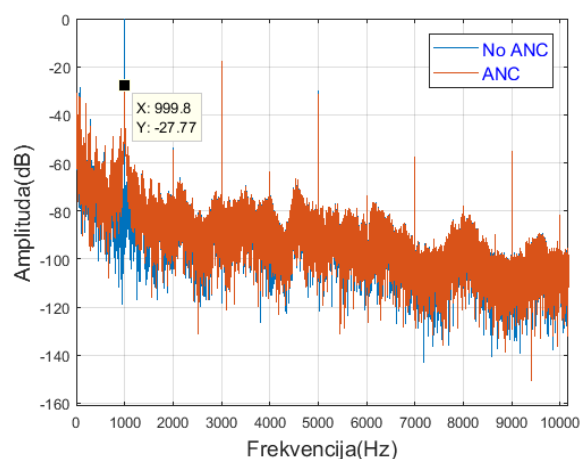


Sl. 4. Vremenski oblik originalnog i signala greške za sinusnu pobudu

Sledeći slučaj na kom je testiran sistem je „klipovana“ sinusoida. Ovaj signal je dobijen direktnom reprodukcijom signala na referentni zvučnik u cevi i njegovim snimanjem na primarnom i sekundarnom mikrofonskom. Samim tim nije bilo potrebe propuštati ulazni signal kroz impulsni odziv P , jer je korišćen snimljeni primarni signal na mikrofonskoj greški. Ovaj signal je složeniji i nije se mogao potpuno potisnuti kao u prvom slučaju, ali se vidi na slici 5. da je dosta oslabljen. Koeficijenti teže konvergiraju jer je sam signal složeniji. Korišćen je red filtra $H=100$, a $\mu=0,0005$.

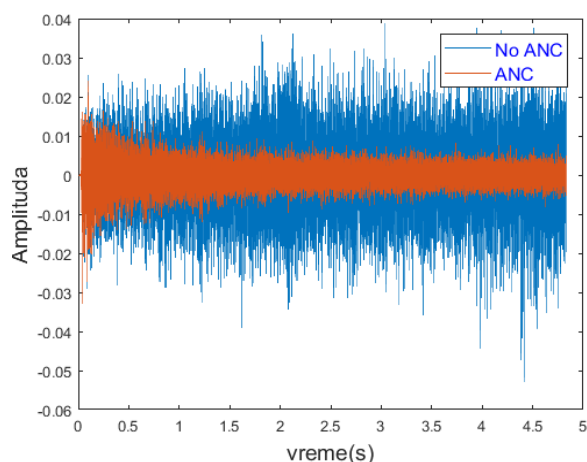


Sl. 5. Vremenski oblik originalnog i signala greške pobudni signal klipovane sinusoida



Sl. 6. Spektar originalnog signala i signala greške za šum oblika klipovane sinusoida

Kao što se vidi na slici 6. na kojoj su prikazani spektri originalnog i potisnutog signala najviše je potisnut osnovni harmonik i to za 27 dB. Pored potiskivanja prvog harmonika uočava se da na ostale harmonike algoritam nije imao uticaj i ne potiskuje ih. Najvažnije je upravo potiskivanje na osnovnoj frekvenciji što je upravo postignuto.



Sl. 7. Vremenski oblik originalnog signala i signala greške za šum ventilatoa

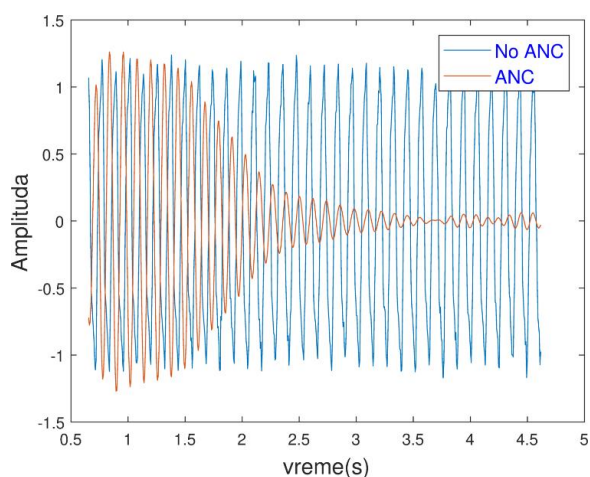
Najsloženiji širokopojasni signal koji je testiran je snimak ventilatora. Zbog same složenosti ovog signala potiskivanje je bilo najlošije, ali ipak postoji što se vidi na slici 6. Kada se

poredi signal bez ovog algoritma kada samo prođe kroz cev i signala greške kada se koristi algoritam, jasno se primećuje razlika da je signal oslabljen i to za 13 dB kada se koristi ANC. Zbog same složenosti signala algoritam mora biti kompleksniji kako bi koeficijenti konvergirali. Samim tim bilo je potrebno da red adaptivnog filtera bude veći i iznosi $H=700$, korak adaptacije μ iznosi 0.002. Takođe, modelovana sekundarna putanja se adaptirala u odnosu na Gausov šum i red adaptivnog filtera za prepoznavanje nepoznatog sistema morao biti 600 da bi se dobro modelovala sekundarna putanja.

B. Hardverska implementacija na Beli platformi

Implementacije na hardveru su dosta zahtevnije od softverskih simulacije jer se mora voditi računa o nizu problema. Jedan od problema je na primer određeno vreme izvršavanja čitave obrade signala na jednom odbirku. Ovaj problem uvodi ograničenja odmah na početku i zahteva da redovi filtera (modelovanih i adaptivnog) budu što manji da bi obrada signala stigla da se izvrši za određeno vreme. Maksimalno dozvoljeno vreme obrade je $1/f_s$, gde je f_s frekvencija odabiranja. To dovodi do nemogućnosti korišćenja složenijih i bržih adaptivnih algoritama od LMS-a, jer će biti povećan broj računskih operacija i samim tim duža obrada. Drugi problemi na koje se mora paziti su modelovanje adekvatnog kašnjenja, tako da izlaz sekundarnog zvučnika reprodukuje odbirak u trenutku kada isti taj odbirak stiže od primarnog zvučnika da bi oba signala superponirala i poništila. Ovo je rešeno tako što je izmereno rastojanje između referentnog mikrofona i sekundarnog zvučnika, koje iznosi $L=0.87$ m. Pa je kašnjenje izračunato i iznosi $t=2.55$ ms. Nakon toga treba oduzeti kašnjenje koje je potrebno za propagaciju signala sa ulaza na izlaz (kašnjenje hardvera) Ovo vreme iznosi $t_{Bela}=0.93$ ms. Na kraju kako bi se dobio broj odbiraka, vreme t_{Bela} je pomnoženo sa frekvencijom odabiranja:

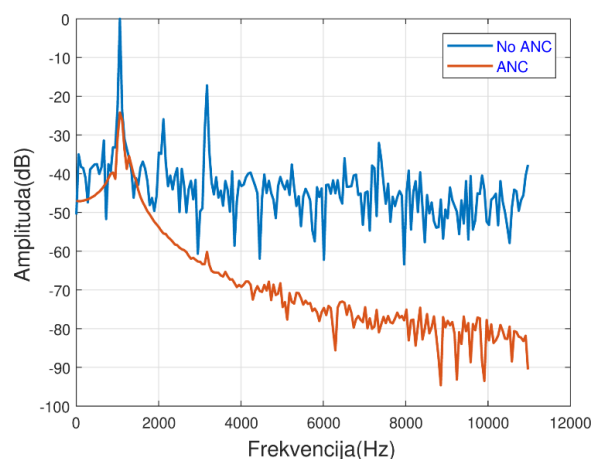
$$samples = (t - t_{Bela}) \times f_s = 35. \quad (15)$$



Sl. 8. Vremenski oblik originalnog signala i signala greške za sinusoidalnu pobudu za implementaciju na hardveru

Prvi signal koji je korišćen za testiranje sistema, korišćenjem generatora kao izvora, je sinusoida frekvencije 900 Hz. Na slici 8 prikazan je vremenski oblik sinusoide na

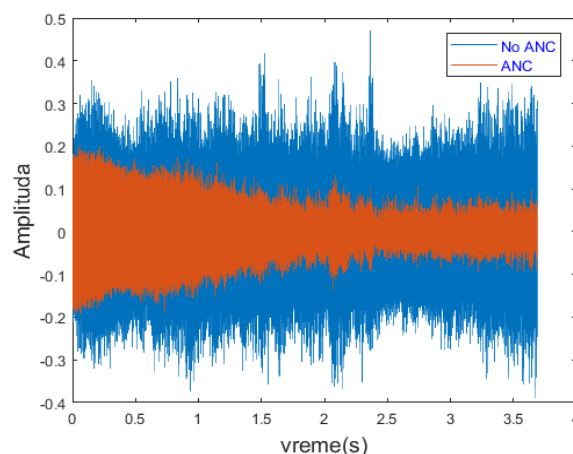
ulazu u zvučnik i signala greške koji se prikuplja na mikrofona greške. Jasno se primećuje da je sinusoida potisnuta u velikoj meri nakon 3.5 s.



Sl. 9. Spektr originalnog signala i signala greške za sinusoidalnu pobudu za implementaciju na hardveru

Ako se poredi signal greške koji se dobija u softverskoj realizaciji (slika 4) i signal dobijen u hardverskoj realizaciji jasno se uviđa da hardversko rešenje ne potiskuje sinusoidalni signal u potpunosti. Na slici 9 prikazani su spektri originalnog signala i signala greške. Zaključuje se da je algoritam uspeo da potisne sinusoidu i oslabi je za 24 dB u odnosu na signal smetnje. Red adaptivnog filtera korišćen za ovaj test primer iznosio je $H=100$, a koeficijent adaptacije $\mu=0.00002$.

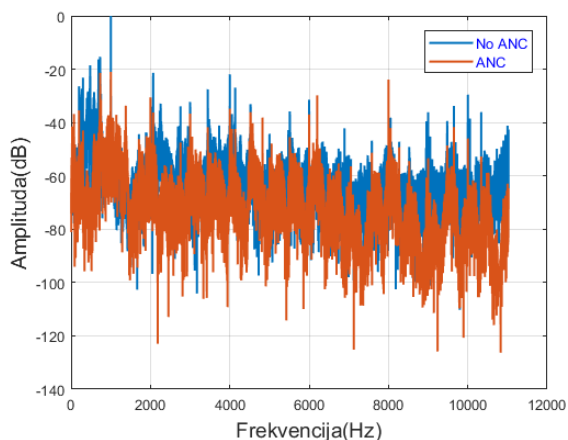
Drugi primer koji je testiran je signal klipovane sinusoide reprodukovane na referentnom zvučniku. Klipovana sinusoida je kompleksniji signal i teže je potisnuti ga. Na slici 10 su prikazani signali skupljeni na referentnom mikrofona i na mikrofona greške, gde jasno uviđamo da je uspešno potisnuta primarna buka. Red adaptivnog filtera neophodan da bi algoritam dobro radio je $H=100$, a korak adaptacije $\mu=0.00008$. Ovaj primer je uspešno potisnut i oslabljen za 20 dB, kao što se može videti na slici 11.



Sl. 10. Vremenski oblik originalnog signala i signala greške za klipovanu sinusoidalnu pobudu za implementaciju na hardveru

Algoritam na hardveru je testiran i za šum ventilatora, što je njegova suštinska primena, ali rezultat nije pozitivan. Šum ventilatora je mnogo složeniji signal od ova dva prethodno

opisana, samim tim neophodno je da red filtra bude mnogo veći. Povećavanjem reda filtra povećava se i potrebno vreme za izvršavanje čitavog procesa i prevazići će se maksimalno vreme koje je moguće na hardveru. Cilj narednih istraživanja i obrađivanja ovog sistema će upravo biti optimizovanje algoritma tako da uspešno potiskuje šum ventilatora.



Sl. 11. Spektar originalnog signala i signala greške za sinusoidalnu pobudu za implementaciju na hardveru

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je implementacija ANC algoritma kroz softversku simulaciju i hardversku realizaciju. Softversko rešenje je jednostavnije implementirati jer predstavlja simulaciju realnog problema iz kojeg se izostavlja veliki broj spoljašnjih faktora koji otežavaju realizaciju sistema na hardveru. Implementacijom algoritma u softveru se dobijaju približno najbolja moguća rešenja kojima će se težiti u realnim sistemima. Jedna od najvećih razlika između ova dva načina testiranja algoritma je što implementacija na hardveru korišćenjem pravog modela mora biti u realnom vremenu. Postoji ograničeno vreme za koje algoritam mora biti izvršen, samim tim neophodno je smanjivati redove filtera modelovanih impulsnih odziva, kao i red adaptivnog filtra čime se gubi na performansama samog algoritma. Dodatne komplikacije koje se javljaju kad se implementira sistem na pravom modelu je kompenzacija kašnjenja koja potiče od samog procesiranja na platformi Bela, kao i pojava akustičke povratne sprege na koju se mora obratiti posebna pažnja. Takođe Bela hardver ima određena ograničenja, kao što su frekvencija odabiranja, kašnjenje koje se javlja prilikom obrade podataka, kao i maksimalno vreme za koje se mora izvršiti algoritam. Iz svih navedenih razloga zaključuje se da će finalna rešenja na realnom sistemu biti lošija, što se i vidi iz prikazanih rezultata. Kroz softversku implementaciju test signal sinusoide je oslabljen za 36 dB dok na realnom modelu pri reprodukciji signala sinusoide maksimalno slabljenje iznosi 24 dB. Može se videti da postoji razlika ali suštinski u oba slučaja sinusoidalna buka je potisnuta. Takođe za primer u kome je primarni signal klipovana sinusoida se vidi razlika u potiskivanju od 20 dB pri primeni na hardveru.

Buduća nadogradnja ovog rada će se kretati u smeru pronalazanja rešenja za potiskivanje realnog šuma ventilatora na realnom modelu u cevi. Rešenje tog problema

predstavljalo bi primenu ANC sistema u svakodnevnom životu. Mogućnosti korišćenja ovakvih sistema bile bi u određenim prostorima gde je od velikog značaja potiskivanje spoljašnje buke na niskim frekvencijama, koja potiče od ventilatora, klima uređaja, ventilacionih sistema itd.

ZAHVALNICA

Autori žele da se zahvale profesorki Jeleni Čertić na korisnim savetima prilikom implementacije algoritama. Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] S. Sadeghi, J. Poshtan, M. Kahaci, "The simulation and implementation of an active noise control system in a laboratory duct", European control conference, Cambridge, UK, pp. 1252-1256, 1-4. September, 2003.
- [2] Stephen J. Elliott, "Signal Processing for Active Control", Academic Press, 2001.
- [3] S. M. Kuo, D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review", Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 6, pp. 943-973, 1999.
- [4] B. Widrow, S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, New Jersey, 1985.
- [5] M. T. Akhtar, W. Mitsuhashi, "Improving Performance of FxLMS Algorithm for Active Noise Control of Impulsive Noise", Jr. Sound Vib., vol. 327, No. 3-5, pp 647-656, Nov. 2009.
- [6] M. T. Akhtar, W. Mitsuhashi, "A modified normalized FxLMS algorithm for active control of impulse noise", 18th European Signal Processing Conference, Aalborg, Denmark, August 23-27, 2010.
- [7] H. Lan, M. Zhang, W. Ser, "A weight-constrained FxLMS algorithm for feedforward Active noise control systems", IEEE signal processing letters, vol. 9, No. 1, January, 2002.
- [8] Simon Haykin, "Adaptive filter theory", 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [9] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, "Active Noise Control Systems- Algorithms and DSP Implementations", John Wiley, 1996.
- [10] Sakshi Gaur, V. K. Gupta, "A review on Filtered-x LMS algorithm", International Journal of Signal Processing Systems vol. 4, No. 2, April 2016.
- [11] I. T. Ardekani and W. Abdulla, "Study of convergence behaviour of real time adaptive active noise control systems," in Proceedings of 2010 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual (APSIPA) Summit and Conference, Biopolis, Singapore, 14-17 December 2010, Pages 534-537.

ABSTRACT

ANC (Acoustic Noise Control) systems are necessary in the premises where the elimination of unwanted sounds is required. In this paper, we have done simulation of ANC system in the duct and implementation on hardware. FxLMS (Filtered x Least Mean Square) and NFxLMS (Normalized Filtered x Least Mean Square) adaptive algorithms were tested, they were compared by robustness, necessary order of adaptive filter and convergence rate. In the simulation were used: sinusoid, clipped sinusoid and fan noise. Depending on the complexity of the test signal the parameters of the adaptive filter have changed. The results show that it is possible to suppress acoustic noise to a certain limit depending on the complexity of the signal.

Acoustic noise control in a duct

Marija Ratković, Nebojsa Kolarić, Milos Bjelić