

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

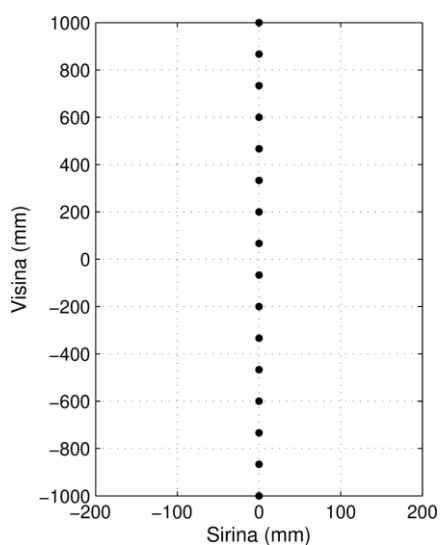
Stefan Aćimović - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: as213306m@student.etf.bg.ac.rs).

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

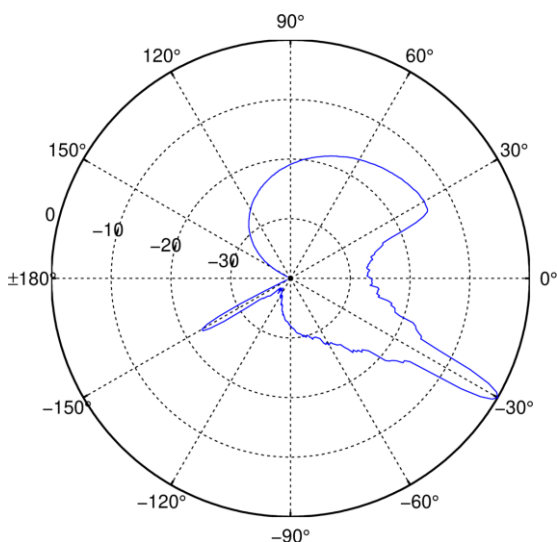
Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

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 i 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.

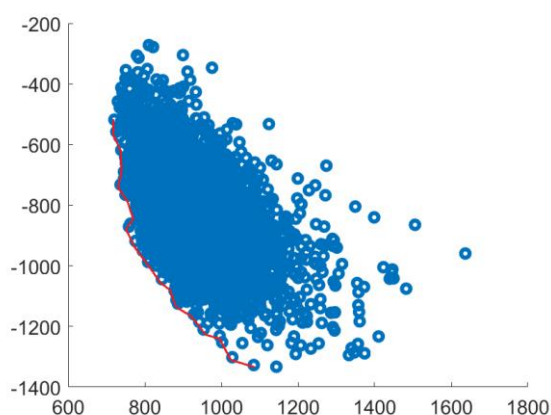
Pareto front (koji se takođe naziva Pareto granica ili Pareto skup), koristi se u višedimenzionoj optimizaciji i predstavlja skup svih Pareto efikasnih rešenja. Koncept se široko koristi u inženjerstvu. Omogućava se ograničenje pažnje na skup efikasnih izbora, te je umesto da se razmatra čitav opseg 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 onoliko 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 koeficijentata 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°. Apsica 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:

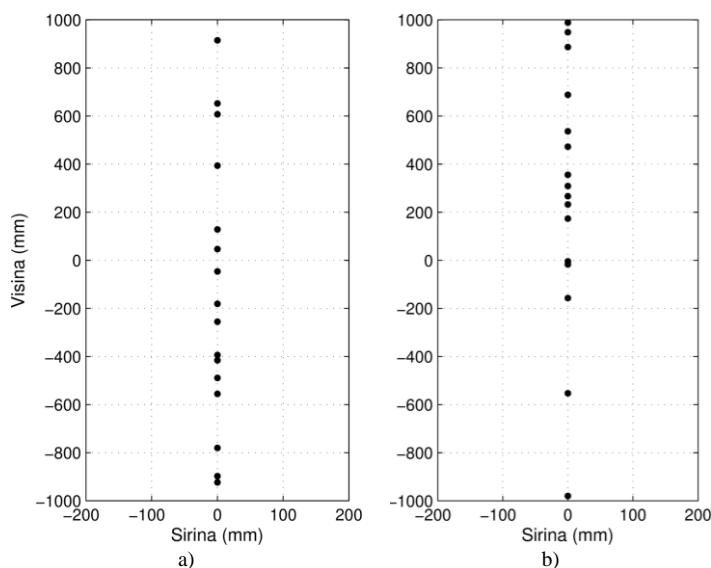
- Nulta generacija (skup genoma)
- Fitnes funkcija
- *Crossover* funkcija
- Odabir novih genoma
- Mutacija (opciono)
- Nova generacija

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.

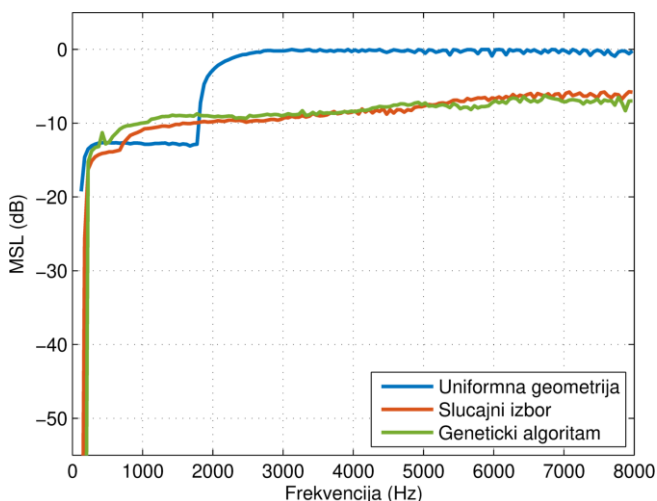


Sl. 4. Raspored zvučnika na osnovu rezultata algoritma: a) Slučajni raspored i b) Genetički algoritam

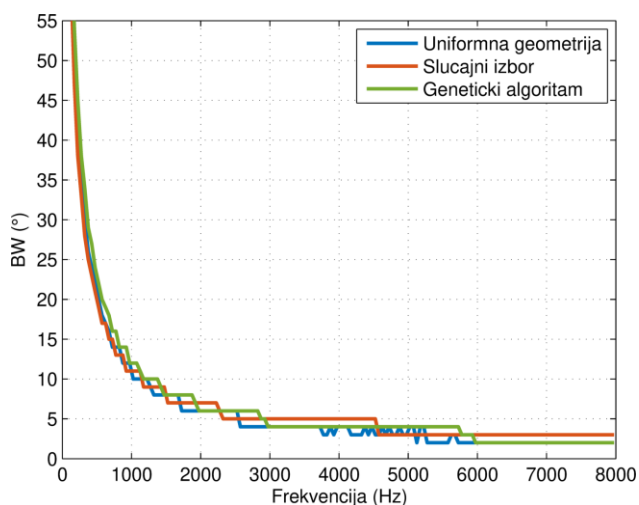
Na osnovu prikazanih geometrija izračunati su parametri pomoću kojih je moguće proceniti kvalitet rešenja: odnos glavnog i maksimalnog bočnog loba (MSL) i širina glavnog loba (BW). Ovi parametri izračunati su za frekvencijski opseg

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 suzbiti, 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