

Performanse dekonvolucionih algoritama sa upotrebom grid reduction metode

Nebojša Kolarić

Telekomunikacije/Laboratorija za akustiku
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Beograd, Srbija

kn235008p@student.etf.bg.ac.rs, ORCID: 0009-0002-9483-6599

dr Miloš Bjelić

Telekomunikacije/Laboratorija za akustiku
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Beograd, Srbija

bjelic@etf.rs, ORCID: 0000-0002-5859-1654

Abstract—U ovom radu analizirane su performanse tri dekonvolucionih algoritama: DAMAS, FISTA i NNLS sa i bez primene *grid reduction* metode. Cilj istraživanja bio je da se oceni uticaj ove metode na brzinu izvršavanja, potiskivanje bočnih lobova i širinu glavnog loba u aplikacijama za mapiranje akustičnih izvora pomoću mikrofonskih nizova. Eksperimenti su sprovedeni nad realnim signalima snimljenim u anehoičnoj sobi i učionici. Rezultati pokazuju da primena *grid reduction* metode značajno ubrzava izvršavanje algoritama (smanjenje vremena obrade i do 70%), ali dovodi do šireg glavnog loba i slabijeg potiskivanja bočnih lobova u poređenju sa originalnim algoritmima. Uprkos tom kompromisu, rezultati ukazuju na to da *grid reduction* metoda može biti korisna u aplikacijama gde je vreme obrade kritično, poput *real-time* sistema za detekciju akustičnih izvora. Značaj rada ogleda se u analizi kompromisa između tačnosti i efikasnosti kod primene *grid reduction* metode u dekonvolucionim algoritmima.

Ključne reči—DAMAS, FISTA, NNLS, *grid reduction*

I. UVOD

Danas, *CB* (*Conventional Beamforming*) ima široku primenu u aplikacijama koje treba da mapiraju akustične izvore. Njegova prednost je brzo izvršavanje, jednostavna implementacija i robusnost. Dok su njegove mane: širok glavni lob, slabo potiskivanje bočnih lobova i mala prostorna rezolucija [1-2]. Za potrebe preciznije analize akustičnih izvora razvijeni su dekonvolucionni algoritmi. Ovi algoritmi koriste rezultat *CB* algoritma kao „prljavu mapu“ i pomoću iterativne dekonvolucije prave „čistu mapu“ tako što uklanjaju uticaj bočnih lobova koji su direktna posledica geometrije mikrofonskog niza. *Lawson* i *Hanson* su 1974. godine razvili prvi algoritam iz ove oblasti pod nazivom *NNLS* (*Non-Negative Least Squares*) [3]. Nakon njih su *Brooks* i *Humphreys* razvili *DAMAS* (*Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources*) algoritam i primenili na merenju buke kod vazduhoplovnih komponenti [4-5]. Zatim su 2005. godine razvili trodimenzionalni *DAMAS* algoritam za ispitivanje aeroakustične buke [6]. Nakon toga su 2006. godine razvili *DAMAS* algoritam za prostorno koherentne zvučne izvore [7]. *Beck* i *Teboulle* su 2009. godine razvili *FISTA* (*Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm*) algoritam u oblasti obrade slike [8]. Ovaj algoritam se koristi za efikasno otklanjanje šuma sa slike ali takođe daje odlične rezultate prilikom mapiranja akustičnih izvora [9].

Iako dekonvolucionni algoritmi daju bolje rezultate u odnosu na *CB* algoritam, njihov glavni nedostatak je dugo vreme izvršavanja. Zbog toga naučnici pokušavaju da na efikasniji način implementiraju postojeće algoritme tako da smanje vreme

procesiranja a da pritom zadrže sve njihove prednosti. *Dougherty* je 2005. primenom spektralne analize uz regularizaciju pomoću niskopropusnog filtra realizovao *DAMAS2* [10] koji ima značajno kraće vreme procesiranja u odnosu na originalni *DAMAS* algoritam. Zatim su *Klaus* i *Lars* 2006. godine primenili sličnu proceduru na *NNLS* algoritam da bi razvili *FFT-NNLS* (*Fast Furier Transformation*) [11]. Međutim, *DAMAS2* i *FFT-NNLS* se baziraju na pretpostavci da je *PSF* (*Point Spread Function*) pomerajno nepromenljiva. Ova pretpostavka je tačna samo u situacijama kada je oblast skeniranja pod malim otvornim uglom [10-11], što nije slučaj sa većinom realnih aplikacija. *Ma* i *Liu* su 2017. godine objavili dva rada na temu ubrzavanja vremena procesiranja *DAMAS* algoritma. Prvi rad se bavi upotrebom *wavelet* transformacije za redukovanje oblasti skeniranja [12], dok se drugi rad bavi odbacivanjem tačaka iz oblasti skeniranja koje ne nose informaciju [13]. U oba rada je skraćeno vreme procesiranja *DAMAS* algoritma, međutim samo metoda iz drugog rada *GR* (*grid reduction*) nije narušila prostornu rezoluciju originalnog *DAMAS* algoritma. Zbog dobrih rezultata nad *DAMAS* algoritmom, *Ma* i *Wang* su 2020. godine primenili istu ovu metodu nad *NNLS* i *FISTA* algoritmima kako bi analizirali njen uticaj [14]. U njihovom radu, prilikom poređenja rezultata dekonvolucionih algoritama sa i bez primene *GR* metode vizuelno se ne uočavaju značajne razlike. Čini se da je glavni lob očuvan, dok je potiskivanje bočnih lobova ostalo približno isto, uz primetno smanjenje vremena obrade. Ipak, budući da su generisane *heat mape* prikazane u dinamičkom opsegu do 20 dB, postoji mogućnost da bi se razlike u rezultatima mogle uočiti pri analizi u širem dinamičkom opsegu.

U ovom radu će biti analizirane i upoređene performanse originalnih dekonvolucionih algoritama sa njihovim *GR* verzijama (označenim kao *DAMAS-GR*, *NNLS-GR* i *FISTA-GR*) na 1/3 okatvnim opsezima od 2500 Hz i 5000 Hz. Pored vremena procesiranja, širine glavnog loba, uspešnosti potiskivanja bočnih lobova, analiziraće se i količina kompresije oblasti skeniranja u zavisnosti od frekvencije. Algoritmi će biti testirani u *offline* modu nad 2 seta signala koji su snimljeni pomoću neuniformnog mikrofonskog niza koji se sastoji od 18 mikrofona. Prvi set signala je snimljen u anehoičnoj sobi, dok je drugi set snimljen u regularnoj učionici za predavanje. Takođe, *heat mape* testiranih algoritama će biti prikazane u dinamičkom opsegu do 100 dB tako da će se videti pravi uticaj *GR* metode.

U prvom poglavlju je dat kratak istorijat algoritama kao i cilj rada. *CB* i dekonvolucionni algoritmi su opisani u drugom poglavlju. Treće poglavlje sadrži eksperimentalnu postavku i opis

izvedenog eksperimenta. Dok će u četvrtom poglavlju biti prikazani i prodiskutovani dobijeni rezultati. Na kraju u petom poglavlju je dat zaključak.

II. TEORIJSKA OSNOVA

A. Conventional Beamforming

Cilj *CB* algoritma je da formira usmereni snop tako da pojača signal koji dolazi iz određenog pravca, odnosno iz svake tačke unutar unapred definisane oblasti skeniranja. Prvi korak ka postizanju ovog cilja je proračun spektralne kovarijacione matrice [4]:

$$G(f) = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1m_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m_0 1} & \cdots & G_{m_0 m_0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gde je m_0 ukupan broj mikrofona u mikrofonskom nizu. Zatim je primenjena *DR* (*Diagonal Removal*) metoda nad matricom $G(f)$. Ova metoda postavlja vrednosti elemenata na glavnoj dijagonali matrice na nultu vrednost [13]. Nakon ovoga je potrebno proračunati *steering* vektor koji modeluje kašnjenje signala na svakom mikrofona [4]:

$$e_m(f, r) = \frac{|r-r_m|}{|r|} \cdot e^{-jk \cdot |r-r_m|} \quad (2)$$

gde je $|r|$ rastojanje od fokusa snopa do centra mikrofonskog niza, a $|r-r_m|$ je rastojanje od fokusa snopa do m -tog mikrofona i k je talasni broj $k=2\pi f/c_0$ (c_0 je brzina zvuka u trenutnom medijumu). Na kraju izlaz *CB* algoritma (prljava mapa) se može izračunati preko sledećeg izraza [4]:

$$b(r) = \frac{e(f, r)^H G(f) e(f, r)}{m_0^2} \quad (3)$$

gde operacija H predstavlja konjugovanu transpoziciju.

B. Definisanje inverznog problema

Cilj je postaviti problem tako da se ekstrahuje informacija o distribuciji snage izvora zvuka iz prljave mape [5]. U ovom procesu se eliminiše uticaj geometrije mikrofonskog niza koji je glavni uzrok postojanja bočnih lobova. Spektralna kovarijaciona matrica se može formulisati na drugačiji način [13]:

$$G(f) = \sum_{s=1}^S (|q_s|^2 e(f, r_s) e(f, r_s)^H) \quad (4)$$

gde je S ukupan broj tačaka u ravni skeniranja, q_s je amplituda zvučnog pritiska proizvedenog od strane izvora u tački s , a formula za *steering* vektor je u ovom izrazu promenjena na [13]:

$$e_m(f, r_s) = \frac{|r_s|}{|r_s-r_m|} \cdot e^{-jk \cdot |r_s-r_m|} \quad (5)$$

Uvrštavanjem izraza (4) u izraz (3) dobijamo:

$$b(r) = \sum_{s=1}^S (|q_s|^2 \frac{|e(f, r)^H e(f, r_s)|^2}{m_0^2}) = \sum_{s=1}^S (|q_s|^2 PSF(r|rs)) \quad (6)$$

gde *PSF* (*Point Spread Function*) mikrofonskog niza predstavlja odziv sistema na idealan tačkasti izvor zvuka [4].

Radi jednostavnosti izraz (6) se obično zapisuje na sledeći način:

$$Ax = b \quad (7)$$

gde vektor b predstavlja rezultat *CB* algoritma koji je prepakovan tako da bude vektor, matrica A predstavlja *PSF* funkciju i vektor x predstavlja qs vektor čije vrednosti želimo da odredimo. Dekonvolucionni algoritmi, koji će biti opisani u nastavku, pokušavaju kroz iteracije da otklone uticaj *PSF* funkcije iz prljave mape i dobiju čistu mapu koja sadrži samo qs .

C. Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources

DAMAS algoritam rešava sistem jednačina iz izraza (6) pomoću *Gauss-Seidel* relaksacione metode. U svakoj iteraciji je upotrebljeno ograničenje da snaga zvučnog izvora ne može biti negativna. Ovaj algoritam je definisan sa sledećim dvema jednačinama [13]:

$$r_i^{(n)} = \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} x_j^{(n+1)} + \sum_{j=i}^S A_{ij} x_j^{(n)} - b_i \quad (8)$$

$$x_i^{(n+1)} = \max(x_i^{(n)} - \frac{r_i^{(n)}}{A_{ii}}, 0) \quad (9)$$

gde je n ukupan broj iteracija koji se definiše na početku algoritma. Uobičajeno se za prvu iteraciju algoritma uzima da je $x^{(0)} = 0$.

D. Non-Negative Least Squares

Cilj *NNLS* algoritma [14] je minimizacija $\|Ax - b\|_2$, tako da je $x > 0$. Prvo se izračunava gradijent izraza $\|Ax - b\|_2$ u x prostoru :

$$w^{(n)} = -A^T (Ax^{(n)} - b) \quad (10)$$

zatim se put pretrage kroz trenutnu poziciju $x^{(n)}$ definiše kao :

$$\overline{w_i^{(n)}} = \begin{cases} 0, & \text{if } w_i^{(n)} < 0 \text{ \& } q_i^{(n)} = 0 \\ w_i^{(n)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

zatim se pomoćni vektor može izračunati pomoću izraza :

$$s^{(n)} = x^{(n)} + \lambda \overline{w^{(n)}} \quad (12)$$

Optimalni korak λ se estimira kao:

$$\lambda = -\frac{g^{(n)} \cdot (Ax - b)}{(g^{(n)})' \cdot g^{(n)}} \quad (13)$$

gde je $'$ operacija transpozicije, a $g^{(n)}$ je:

$$g^{(n)} = A \overline{w^{(n)}} \quad (14)$$

Na kraju finalni korak u svakoj iteraciji *NNLS* algoritma je:

$$x_i^{(n+1)} = \max(s_i^{(n)}, 0) \quad (15)$$

Kod *NNLS* algoritma se takođe kao i kod *DAMAS* algoritma za prvu iteraciju uzima da je $x^{(0)} = 0$.

E. Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm

FISTA algoritam predstavlja efikasnu metodu za rešavanje konveksnih optimizacionih problema čiji je problem oblika $Ax=b$, uz $L1$ regularizaciju, kako bi se dobila stabilna i retka rešenja [8-9]. Prki korak u ovom algoritmu je izračunavanje konstantnog koraka adaptacije:

$$L = 2\lambda_{\max}(A'A) \quad (16)$$

gde je $\lambda_{\max}(A'A)$ maksimalna sopstvena vrednost od matrice koja se dobija proizvodom matrica $A'A$. Kao i u prethodnim algoritmima za početnu vrednost vektora x se uzima nulti vektor $x^{(0)} = 0$, a za početnu vrednost promenljive t se uzima vrednost 1. Pošto se u ovom algoritmu proračun gradijenta vrši po vektoru y umesto vektora x , onda je potrebno inicijalizovati vektor y takođe kao nulti vektor $y^{(0)} = 0$. Dalji koraci *FISTA* algoritma koji se izvršavaju u svakoj njegovoj iteraciji su dati sledećim formulama:

$$\nabla f(y) = A'(Ay^{(n)} - b) \quad (17)$$

$$x_i^{(n+1)} = y_i^{(n)} - \frac{\nabla f(y)}{L} \quad (18)$$

$$x_i^{(n+1)} = \begin{cases} x_i^{(n+1)}, & x_i^{(n+1)} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$t^{(n+1)} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(t^{(n)})^2}}{2} \quad (20)$$

$$y_i^{(n+1)} = x_i^{(n+1)} + \left(\frac{t^{(n)} - 1}{t^{(n+1)}}\right) \cdot (x_i^{(n+1)} - x_i^{(n)}) \quad (21)$$

F. Grid Reduction

GR metoda se zasniva na odbacivanju redundantnih tačaka iz oblasti skeniranja, što ubrzava vreme procesiranja dekonvolucionih algoritama u svakoj iteraciji. Rezultat *CB* algoritma pored pozitivnih vrednosti može imati i negativne vrednosti koje nemaju nikakvu fizičku reprezentaciju [13-14]. *GR* metoda je bazirana na ovoj pretpostavci pa se dekonvolucionni algoritmi izvršavaju samo nad tačkama koje su veće od nule:

$$b(r) > 0 \quad (22)$$

Sada se izraz (8) menja u:

$$\overline{Ax} = \overline{b} \quad (23)$$

gde je $\overline{A} \in \mathbb{C}^{\overline{S} \times \overline{S}}$, $\overline{x} \in \mathbb{C}^{\overline{S} \times 1}$, $\overline{b} \in \mathbb{C}^{\overline{S} \times 1}$ i $\overline{S}$ je ukupan broj pozitivnih vrednosti na izlazu *CB* algoritma. Koraci za primenu *GR* metode:

1. Proračun *CB* algoritma prema izrazu (3)
2. Primena izraza (22) i čuvanje koordinata koje zadovoljavaju taj izraz
3. Kreiranje vektora $\overline{b}$ samo nad koordinatama iz druge tačke (koje su zadovoljile izaz (22))
4. Proračun matrice $\overline{A}$ samo nad koordinatama iz druge tačke (koje su zadovoljile izaz (22))
5. Izračunavanje nepoznatog vektora $\overline{x}$ pomoću dekonvolucionih algoritama

Metrika koja će biti upotrebljena za poređenje efikasnosti kompresije [14]:

$$\delta = S / \overline{S} \quad (24)$$

G. Uticaj *GR* metode na dekonvolucione algoritme

Neka je dat sistem:

$$Ax = b, \quad x \geq 0 \quad (25)$$

gde je $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $b \in \mathbb{R}^N$, $x \in \mathbb{R}^N$ i $x \geq 0$ je uslov fizičke realnosti u *DAMAS* algoritmu (da nema negativnih izvora).

Definišimo skup indeksa koji zadovoljavaju izraz (22):

$$L_+ = \{i \in \{1, \dots, N\} \mid b_i > 0\} \quad (26)$$

ovo su tačke u ravni skeniranja koje zadržavamo prilikom *GR* metode. Redukovani sistem se dobija tako što zadržimo samo redove i kolone koji pripadaju L_+ :

$$A_{GR} x_{GR} = b_{GR} \quad (27)$$

gde je $A_{GR} = A[L_+, L_+]$, $b_{GR} = b[L_+]$ i $x_{GR} = x[L_+]$. Označimo:

- $b_+ = b[L_+]$, *CB* vrednosti nad tačkama gde je $b_i > 0$
- $b_- = b[L_-]$, *CB* vrednosti nad tačkama gde je $b_i \leq 0$
- $x^* \in \mathbb{R}^N$, rešenje originalnog sistema
- $x_+^* = x^*[L_+]$, vektor koji sadrži samo komponente x_i^* za koje je $i \in L_+$
- $x_-^* = x^*[L_-] = 0$, nule na eliminisanim indeksima.

Teorema: Ako je $x_i^* = 0$ za sve $i \notin L_+$, tada rešenje originalnog sistema i redukovanog sistema su identična $x^*[L_+] = x_{GR}$.

Dokaz: Označimo elemente sistema blokovski:

$$A = \begin{bmatrix} A_{++} & A_{+-} \\ A_{-+} & A_{--} \end{bmatrix}, x^* = \begin{bmatrix} x_+^* \\ x_-^* \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_+ \\ b_- \end{bmatrix} \quad (28)$$

gde su $A_{++} \in \mathbb{R}^{|L_+| \times |L_+|}$ deo matrice A koji se odnosi na tačke sa pozitivnim *CB* vrednostima, $A_{+-} \in \mathbb{R}^{|L_+| \times |L_-|}$ veze između tačaka iz L_+ i tačaka izvan, $A_{-+} = A_{+-}^T$ i $A_{--} \in \mathbb{R}^{|L_-| \times |L_-|}$ deo koji se odnosi na eliminisane tačke. Kada uvrstimo elemente iz (28) u izraz (25) dobijamo:

$$Ax^* = \begin{bmatrix} A_{++} & A_{+-} \\ A_{-+} & A_{--} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_+^* \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{++}x_+^* \\ A_{-+}x_+^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_+ \\ b_- \end{bmatrix} \quad (29)$$

Sada imamo 2 sistema linearnih jednačina. Gornji sistem $A_{++}x_+^* = b_+$ i donji sistem $A_{-+}x_+^* = b_-$. Međutim donji sistem odbacujemo jer ne postoji rešenje koje može zadovoljiti ovu jednakost, pošto je izraz sa leve strane uvek pozitivan ($x_+^* \geq 0$, $A \geq 0$) a izraz sa desno strane uvek negativan ($b_- < 0$). Rešavanjem gornjeg sistema vidimo da je rešenje tog sistema zapravo x_+^* , a pošto je $x_{GR} = x[L_+] = x_+^*$ ovime je dokazano da *DAMAS-GR* daje isti rezultat kao i originalni *DAMAS* algoritam iako se izvršava na redukovanom ravni skeniranja.

NNLS i *FISTA* su iterativni optimizacioni algoritmi koji zavise od kompletnog skupa promenljivih u ravni skeniranja, dok je *DAMAS* rekursivni algoritam baziran na rešavanju sistema linearnih jednačina, gde je ignorisanje "beskorisnih" tačaka u ravni ($b(r) \leq 0$) moguće bez gubitka informacija jer one ionako ne učestvuju značajno u konstrukciji rešenja. Kod *NNLS* i *FISTA* algoritma manji broj varijabli znači drugačiji „put“ optimizacije i samim tim drugačije rešenje. Pošto se radi optimizacija u manjem prostoru, rešenje može biti najbolje moguće u redukovanom prostoru ali nije najbolje moguće u globalnom prostoru. Takođe ako eliminišemo tačku i iz ravni skeniranja, koja bi u optimalnom rešenju bila $x_i > 0$ onda će se rezultati

razlikovati. Zbog svega ovoga *GR* metoda može prouzrokovati drugačije rezultate u odnosu na originalne algoritme.

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Radi potrebe analize dekonvolucionih algoritama snimljeni su signali pomoću akustične kamere [15]. Ova akustična kamera ima neuniformni planarni mikrofonski niz sa 18 mikrofona. Signali su snimljeni u dva scenarija: u anehoičnoj sobi (prostorija bez refleksija) i u učionici (prostorija sa refleksijama). U oba slučaja su postojala 2 zvučnika koja su emitovala *MLS* sekvencu koja je širokopojasni signal. Ravan na kojoj su postavljeni zvučnici je bila na rastojanju 1.5 m od centra akustičke kamere, a međusobno rastojanje između zvučnika je iznosilo 0.5 m.

Analiza dekonvolucionih algoritama je izvršena na računaru koji poseduje AMD Ryzen 5 5500 3.6 GHz procesor, uz pomoć MATLAB programskog jezika. *FFT* je primenjen u 1024 tačaka, što je dalo frekvencijsku rezoluciju od 64 Hz. Period usrednjavanja je bio $K=5$ frejmova. Pre upotrebe *FFT* transformacije je upotrebljena *Hann*-ova prozorska funkcija i njen težinski koeficijent $ws=0.397$. Pošto otvor kamere podržava azimutne uglove od -30° do $+30^\circ$ i elevacione uglove od -22° do $+22^\circ$, dekonvolucionni algoritmi su računati u ovom opsegu sa korakom od 1° po azimutu i elevaciji. U cilju preciznije analize, rezultati će biti predstavljeni na $1/3$ oktavnim opsezima, umesto na pojedinačnim frekvencijama. Prvo su izračunati rezultati svih dekonvolucionih algoritama na svim frekvencijama od interesa a onda je urađeno njihovo usrednjavanje za odgovarajući terčni opseg. U ovom radu će biti prikazani rezultati na tercama čije su centralne frekvencije : 2500 Hz i 5000 Hz.

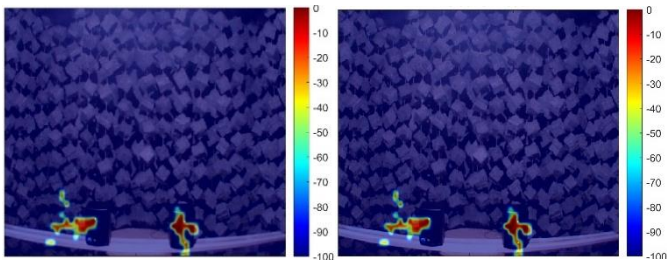
IV. REZULTATI I DISKUSIJA

A. Anehoična soba

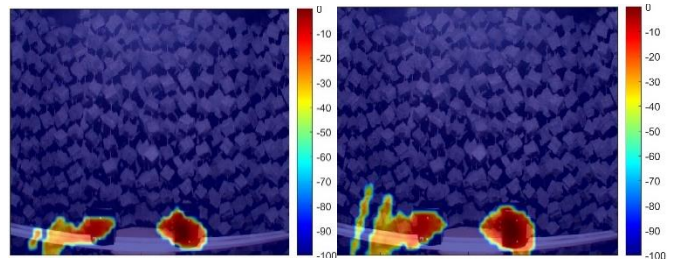
U ovom potpoglavlju će biti prikazani i analizirani rezultati dekonvolucionih algoritama sa i bez *GR* metode, kada je akustična kamera bila unutar anehoične sobe. Na $1/3$ oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom 2500 Hz, prosečan faktor kompresije je bio $\delta=2.28$, Tabela 1 prikazuje prosečna vremena izvršavanja i na narednim slikama su prikazani rezultati:

TABELA I. PROSEČNO VREME IZVRŠAVANJA DEKONVOLUCIONIH ALGORITAMA U ANEHOIČNOJ SOBI

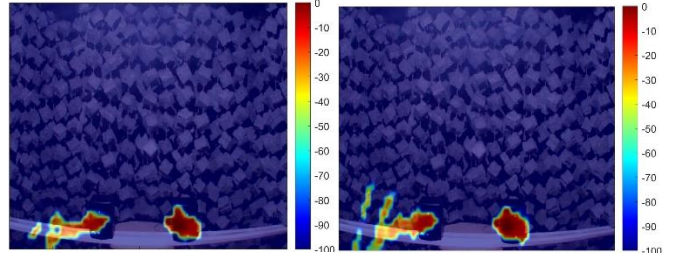
	DAMAS	DAMAS-GR	NNLS	NNLS-GR	FISTA	FISTA-GR
2500 Hz	34.94 s	3.21 s	26.36 s	4.98 s	9.55 s	1.73 s
5000 Hz	35.11 s	1.1 s	26.28 s	2.01 s	9.51 s	0.72 s



Sl. 1 DAMAS (levo), DAMAS-GR (desno) na 2500 Hz u anehoičnoj sobi

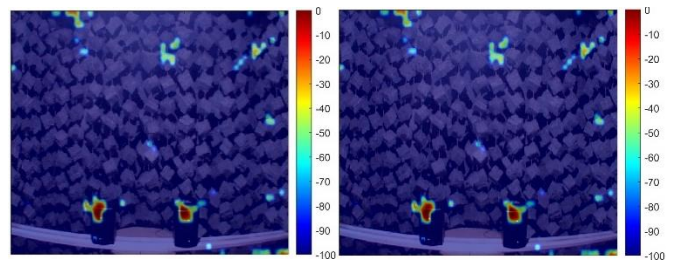


Sl. 2 NNLS (levo), NNLS-GR (desno) na 2500 Hz u anehoičnoj sobi

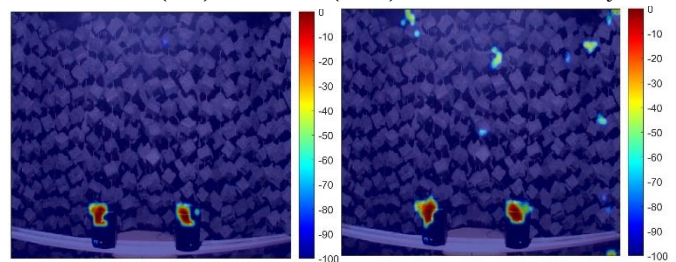


Sl. 3 FISTA (levo), FISTA-GR (desno) na 2500 Hz u anehoičnoj sobi

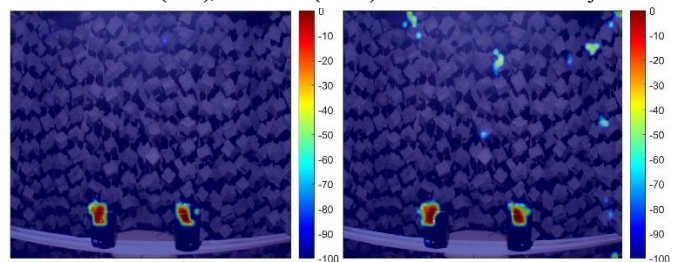
Na Sl.1 može se videti da je rezultat *DAMAS* algoritma potpuno identičan rezultatu *DAMAS-GR* algoritma, pri tom je uspešno smanjeno prosečno vreme procesiranja preko 10 puta (Tabela 1). Rezultati *NNLS* i *FISTA* algoritama su prikazani na Sl.2 i Sl.3. Na ovim slikama možemo primetiti da *GR* verzije ova dva algoritma imaju širi glavni lob i slabije potiskivanje bočnih lobova. Što se tiče prosečnog vremena izvršavanja (Tabela 1), ono je uspešno smanjeno za *NNLS* i *FISTA* algoritam. Na $1/3$ oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom 5000 Hz, prosečan faktor kompresije je bio $\delta=3.29$, a na sledećim slikama su prikazani rezultati dekonvolucionih algoritama:



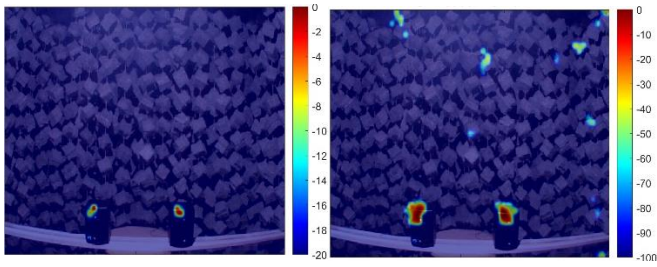
Sl. 4 DAMAS (levo), DAMAS-GR (desno) na 5000 Hz u anehoičnoj sobi



Sl. 5 NNLS (levo), NNLS-GR (desno) na 5000 Hz u anehoičnoj sobi



Sl. 6 FISTA (levo), FISTA-GR (desno) na 5000 Hz u anehoičnoj sobi



Sl. 7 *FISTA-GR* dinamika do 20 dB (levo), *FISTA-GR* dinamika do 100 dB (desno) na 5000 Hz u anehoičnoj sobi

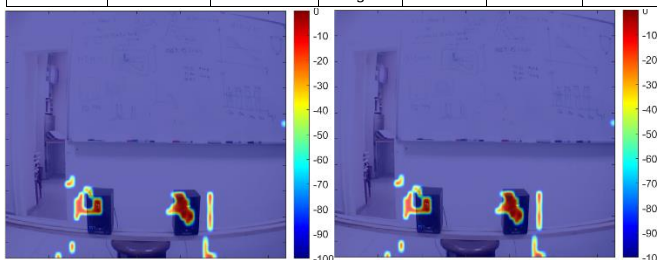
Na Sl.4 može se videti da *DAMAS-GR* algoritam opet daje potpuno identične rezultate kao originalni *DAMAS* algoritam. Prosečno vreme procesiranja *DAMAS* algoritma je smanjeno preko 30 puta (videti Tabelu 1). Rezultati *NNLS* i *FISTA* algoritama su prikazani na Sl.5 i Sl.6. Na ovim slikama može se primetiti da *GR* verzije ova dva algoritma daju lošije rezultate u odnosu na originalne verzije. Glavna razlika je smanjeno potiskivanje bočnih lobova, koji mogu prouzrokovati detekcije lažnih meta. Ovo je velika razlika u odnosu na [14] u kojem su dobijene iste kriterijumske funkcije za ova dva algoritma. Glavni uzrok je to što je u [14] primenjena dinamika do 20 dB, dok se u ovom radu koristi dinamika do 100 dB. Zbog ovoga je na Sl.7 prikazan isti rezultat *FISTA-GR* algoritma, samo je na slici levo dinamika do 20 dB i na njoj vidimo uzak glavni lob i nepostojanje bočnih lobova dok je na slici desno prikaz do 100dB. Primećujemo da je intenzitet dodatnih bočnih lobova kod *GR* verzija ovih algoritama između -30 dB i -90 dB, što nam ukazuje da nije preporučljiva njihova upotreba za aplikacije sa nižim odnosom signal-šum [16-17]. Pored ove razlike možemo uočiti i deformaciju glavnog loba, koji je malo širi. Što se tiče prosečnog vremena izvršavanja ono je uspešno smanjeno za *NNLS* i *FISTA* algoritam. Možemo primetiti da je na centralnoj frekvenciji 5000 Hz ostvarena veća ušteda u vremenu izvršavanja algoritama, što je i očekivano jer je faktor kompresije bio veći.

B. Učionica

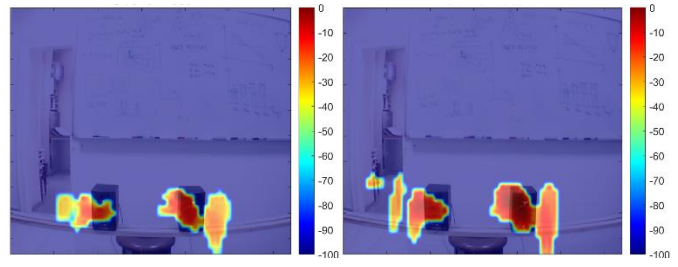
U ovom potpoglavlju će biti prikazani i analizirani rezultati dekonvolucionih algoritama sa i bez *GR* metode, kada je akustična kamera bila unutar regularne učionice. Na 1/3 oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom 2500 Hz, prosečan faktor kompresije je bio $\delta=2.07$, Tabela 2 prikazuje prosečna vremena izvršavanja i na narednim slikama su prikazani rezultati dekonvolucionih algoritama:

TABELA II. PROSEČNO VREME IZVRŠAVANJA DEKONVOLUCIONIH ALGORITAMA U UČIONICI

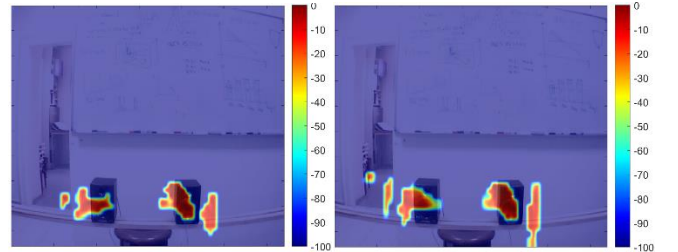
	<i>DAMAS</i>	<i>DAMAS-GR</i>	<i>NNLS</i>	<i>NNLS-GR</i>	<i>FISTA</i>	<i>FISTA-GR</i>
2500 Hz	35.14 s	5.25 s	26.55 s	6.5 s	9.54 s	2.32 s
5000 Hz	35.03 s	1.41 s	26.63 s	2.57 s	9.52 s	0.93 s



Sl. 8 *DAMAS* (levo), *DAMAS-GR* (desno) na 2500 Hz u učionici

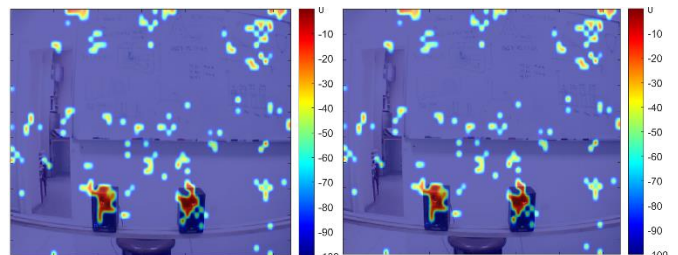


Sl. 9 *NNLS* (levo), *NNLS-GR* (desno) na 2500 Hz u učionici

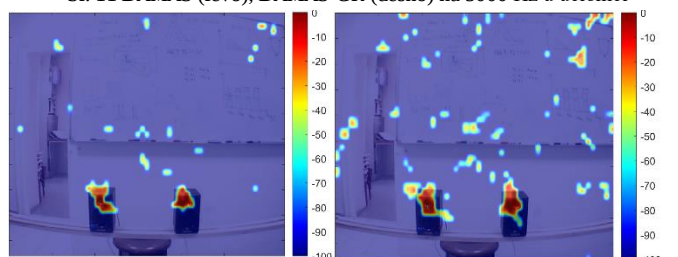


Sl. 10 *FISTA* (levo), *FISTA-GR* (desno) na 2500 Hz u učionici

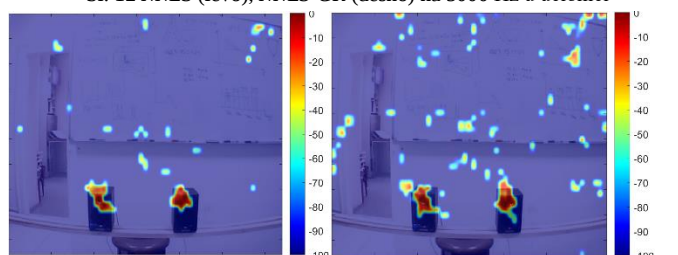
Na Sl.8, Sl.9 i Sl.10 su prikazani rezultati dekonvolucionih algoritama sa i bez *GR* metode u prostoriji sa refleksijama. Rezultati su isti kao i u slučaju anehoične sobe na 1/3 oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom od 2500 Hz. *DAMAS-GR* algoritam daje iste rezultate kao i originalni *DAMAS* algoritam, dok *NNLS-GR* i *FISTA-GR* algoritmi imaju širi glavni lob i slabije potiskivanje bočnih lobova u odnosu na originalne verzije algoritama. Prednost upotrebe *GR* metode je to što su prosečna vremena izvršavanja uspešno smanjena i data su u Tabeli 2. U učionici na 1/3 oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom 5000 Hz, prosečan faktor kompresije je bio $\delta=2.94$, a na sledećim slikama su prikazani rezultati:



Sl. 11 *DAMAS* (levo), *DAMAS-GR* (desno) na 5000 Hz u učionici



Sl. 12 *NNLS* (levo), *NNLS-GR* (desno) na 5000 Hz u učionici



Sl. 13 *FISTA* (levo), *FISTA-GR* (desno) na 5000 Hz u učionici

Na Sl.11, Sl.12 i Sl.13 su prikazani rezultati dekonvolucionih algoritama sa i bez *GR* metode u prostorijskoj sa refleksijama na terci od 5000 Hz. Za razliku od svih prethodnih slika ovde možemo uočiti veliki broj potencijalnih zvučnih izvora. Ovo nije iznenađujuće jer je snimak iz prostorijskoj sa refleksijama, pritom se učionica nalazi blizu prometne ulice pa postoji uticaj saobraćajne buke. Ovi faktori ne utiču značajno na našu analizu, budući da je fokus na poređenju rezultata algoritama sa i bez primene *GR* metode. Situacija se uopšte nije promenila, *DAMAS-GR* algoritam daje iste rezultate kao i originalni *DAMAS* algoritam. Dok *NNLS-GR* i *FISTA-GR* algoritmi imaju širi glavni lob i slabije potiskivanje bočnih lobova u odnosu na originalne verzije algoritama. Prednost upotrebe *GR* metode je to što su prosečna vremena izvršavanja uspešno smanjena i data su u Tabeli 2. Može se primetiti da je na 1/3 okatvnom opsegu sa centralnom frekvencijom 5000 Hz ostvarena veća ušteda u vremenu izvršavanja algoritama, što je i očekivano jer je faktor kompresije bio veći.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je odrađena analiza performansi dekonvolucionih algoritama (*DAMAS*, *NNLS* i *FISTA*) sa i bez *GR* metode kompresije. Algoritmi su testirani na realnim mernim podacima u uslovima sa i bez prisustva refleksija. Rezultati pokazuju da upotreba *GR* metode značajno smanjuje vreme obrade kod svih analiziranih algoritama, pri čemu je u pojedinim slučajevima zabeleženo ubrzanje veće od 30 puta. Ipak, samo kombinacija *DAMAS-GR* zadržava karakteristike originalnog *DAMAS* algoritma bez degradacije prostorne rezolucije. Nasuprot tome, kod *NNLS-GR* i *FISTA-GR* algoritama uočena je degradacija u vidu širenja glavnog loba i slabijeg potiskivanja bočnih lobova. Takođe je primećeno da je faktor kompresije bio veći na obe terce u slučaju anehoične sobe u odnosu na regularnu učionicu, što je omogućilo brže vreme izvršavanja algoritama. Ovo nije iznenađujuće s obzirom da u regularnoj učionici postoje dodatne refleksije koje utiču na rezultat *CB* algoritma da ima više pozitivnih vrednosti u svojoj kriterijumskoj funkciji. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se *NNLS-GR* i *FISTA-GR* algoritmi ne preporučuju za primenu u scenarijima u kojima postoje više zvučnih izvora od kojih je jedan dosta nižeg odnosa signal-šum, jer postoji povećan rizik od pojave lažnih izvora. Dok se *DAMAS-GR* algoritam preporučuje u svakoj situaciji jer će zadržati performanse originalnog *DAMAS* algoritma uz skraćeno vreme procesiranja. U budućim istraživanjima treba testirati performanse dekonvolucionih algoritama kada je kriterijum za odstranjivanje suvišnih tačaka veći od nule. Takođe, nad rezultatima *GR* metode je moguće primeniti neku metodu za ekstrakciju lokalnih maksimuma koja će dodatno smanjiti broj korisnih tačaka i ubrzati vreme izvršavanja dekonvolucionih algoritama.

ZAHVALNICA

Autori žele da se zahvale Zoranu Popoviću na svim savetima i sugestijama oko izrade rada.

LITERATURA

- [1] Merino-Martínez R, Sijtsma P, Snellen M, Ahlefeldt T, Antoni J, Bahr CJ, Blacodon D, Ernst D, Finez A, Funke S. „A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays“, CEAS Aeronaut Journal, vol. 10, pp. 197-230, March 2019.
- [2] Shen L, Chu Z, Yang Y, Wang G. „Periodic boundary based FFT-FISTA for sound source identification“, Applied Acoustics 2018, pp.87-91
- [3] Lawson, C. L. and Hanson, R. J., „Solving least squares problems“, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
- [4] Brooks TF, Humphreys WM. „A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays“, In: 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; May 2004.
- [5] Brooks TF, Humphreys WM. „A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays“, Journal of Sound and Vibration, vol. 294, pp.856–79, July 2006.
- [6] Brooks TF, Humphreys WM. „Three-dimensional applications of DAMAS methodology for aeroacoustic noise source definition“, In: 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 2005.
- [7] Brooks TF, Humphreys WM. „Extension of DAMAS phased array processing for spatial coherence determination (DAMAS-C)“, In: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conferences, May 2006.
- [8] Beck A, Teboulle M. „A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems“, SIAM Imaging Sci, pp. 183-202, March 2009
- [9] O. Lyllof, E. Fernandez-Grande, F. Agerkvist, J. Hald, E. T. Roig, M. S. Andersen, „Improving the efficiency of deconvolution algorithms for sound source localization“, JASA, vol. 138, pp. 172-180, July 2015.
- [10] Dougherty RP. „Extensions of DAMAS and benefits and limitations of deconvolution in beamforming“, In 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; May 2005
- [11] K. Ehrenfried, L. Koop, „A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources“, In 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, vol. 45, July 2007.
- [12] Ma W, Liu X. „Improving the efficiency of DAMAS for sound source localization via wavelet compression computational grid“, Journal of Sound Vibration, vol. 395, pp. 341–353, May 2017.
- [13] Ma W., Liu X. „DAMAS with compression computational grid for acoustic source mapping“, Journal Sound Vibration, vol. 410, pp. 473–484, December 2017.
- [14] J. Wang, W. Ma „Deconvolution algorithms of phased microphone arrays for the mapping of acoustic sources in an airframe test“, Applied Acoustics, vol. 164, July 2020.
- [15] Miloš R. Bjelić, Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza, Doktorska disertacija, Beograd 2018.
- [16] M. Stanojević, M. Bjelić, D. Š. Pavlović, M. Mijić „Measurements of noise energy angular distribution at the building envelope using microphone arrays“, Applied Acoustics, vol. 140, pp. 283-287, Nov 2018.
- [17] G.Chardon, J. Picheral, F. Ollivier „Theoretical analysis of the DAMAS algorithm and efficient implementation of the covariance matrix fitting method for large-scale problems“, Journal Sound Vibration, Sep 2021.

ABSTRACT

This paper analyzes the performance of three deconvolution algorithms: DAMAS, FISTA, and NNLS, with and without the application of the grid reduction method. The aim of the research was to assess the impact of this method on execution speed, sidelobe suppression, and mainlobe width in acoustic source mapping applications using phased microphone arrays. Experiments were conducted using real signals recorded in an anechoic chamber and a regular classroom. The results show that applying the grid reduction method significantly accelerates algorithm execution (processing time reduced by up to 70%), but leads to a wider mainlobe and weaker sidelobe suppression compared to the original algorithms. Despite this trade-off, the results indicate that the grid reduction method can be beneficial in applications where processing time is critical, such as real-time acoustic source detection systems. The significance of this study lies in its analysis of the trade-off between accuracy and efficiency in applying the grid reduction method in deconvolution algorithms.

Performance of deconvolution algorithms using a grid reduction method

Nebojša Kolarić, Miloš Bjelić