

## FILTRI IMPULSNOG ŠUMA U GOVORNOM I AUDIO SIGNALU ZASNOVANI NA MAD I PWMAD DETEKCIJI IMPULSA

Bogdan Korać, Vladimir Crnojević, Vlado Delić  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

**Sadržaj** – U ovom radu predstavljeni su novi algoritmi za uklanjanje impulsnog šuma iz audio i govornog signala. Algoritmi su zasnovani na median, MAD i PWMAD estimatorima poznatim iz robusne statistike. Kompleksnost ovih algoritama je istog reda veličine kao i kod median filtra. Ovo omogućava njihovu laku računarsku implementaciju, čak i za potrebe rada u realnom vremenu. Algoritam zasnovan na PWMAD estimatoru ima dodatnu pogodnost što ne zahteva dodatno podešavanje parametara u zavisnosti od signala na koji se primenjuje ili od tipa impulsnog šuma.

### 1. UVOD

Impulsni šum je pojava sa kojom se svakodnevno srećemo, bilo da je u pitanju govorni, audio ili signal slike. Kod govornog i audio signala manifestuje se kao neugodno krčanje i pucketanje, a u slici kao crne i bele tačke ili linije (salt and paper noise). Osim što je neprijatan za slušaoca ili posmatrača impulsni šum onemogućava dalju obradu signala: linearno filtriranje, prepoznavanje, itd. Iako postoji velik broj radova koji se bave problemom impulsnog šuma u slici, [1], [3], vrlo mali broj autora bavi se problemom impulsnog šuma u audio i govornom signalu. Jedan od takvih pokušaja, filter zasnovan na **SD-ROM (signal dependent rank order mean)** estimatoru, predstavljen je u radu [2]. Ovde predstavljeni algoritmi, zasnovani na **MAD** i **PWMAD detekciji impulsa**, primarno su projekatovani za filtriranje impulsnog šuma u slici. S obzirom da su MAD i PWMAD pokazali veoma dobre rezultate u filtriranju impulsnog šuma u slici, ovaj rad predstavlja rezultat njihovog prilagođavanja za 1D audio i govorni signal.

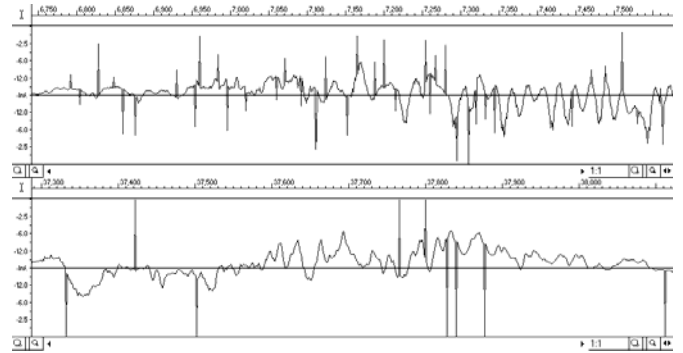
Linearni sistemi daju skromne rezultate u prisustvu impulsnog šuma. Zbog toga se za filtriranje impulsnog šuma koristi nelinearni filtri. Najpoznatiji među njima je **median** filter, na kome su zasnovani algoritmi predstavljeni u ovom radu. Median je robusni estimator srednje vrednosti koji iskazuje dobre performanse u prisustvu do 50% oštećenih vrednosti u uzorku [1]. Značajne karakteristike median filtra su dobra detekcija i filtriranje impulsa, očuvanje ivica signala, ali i potiskivanje visokofrekventnih komponenti u signalu. Median nije selektivan filter, pa stoga uniformno filtrira sve odbirke u signalu, bez obzira da li su oštećeni impulsnim šumom ili ne. Tačka otkaza median filtra je 50%, što znači da će dati korektan rezultat ako je više od polovine odbiraka u prozoru filtra ispravno [1]. Veći stepen oštećenja signala će usloveti korišćenje dužeg prozora median filtra, što će zbog njegove «niskofrekventne karakteristike» i neselektivnosti, dovesti do značajne degradacije signala.

### 2. IMPULSNI ŠUM

Impulsni šum predstavlja kratkotrajnu smetnju visoke energije koja blokira korisni signal. Uzroci nastanka impulsnog šuma su veoma različiti: labavi električni kontakti, grmnjavina, električne mašine, greške u A/D konverziji, greške u dekodovanju, i dr. Tipičan primer impulsnog šuma u audio signalu je pucketanje koje se javlja pri reprodukciji starih gramofonskih ploča.

U osnovi razlikujemo dve vrste impulsnog šuma. Kod **zasićenog** impulsnog šuma amplituda može imati maksimalnu ili minimalnu vrednost iz opsega u kom se nalazi

vrednost signala. Amplituda **uniformnog** impulsnog šuma može imati bilo koju vrednost iz radnog opsega sistema.



Sl.1. Primeri impulsnog šuma:  
Uniformni(gore) i zasićeni(dole)

Dve su najvažnije karakteristike impulsnog šuma:

- samo  $p$  procenata odbiraka signal je oštećeno impulsnim šumom
- vrednost oštećenog odbirka značajno odstupa od vrednosti okoline

Shodno navedenim karakteristikama možemo navesti matematičku reprezentaciju impulsnog šuma:

$$y_i = \begin{cases} n_i, & \text{sa verovatnoćom } p \\ x_i, & \text{sa verovatnoćom } 1-p, \end{cases} \quad (2.1)$$

gde su  $x_i$ ,  $y_i$  i  $n_i$  odgovarajući odbirci originalnog, oštećenog i signala šuma, respektivno.

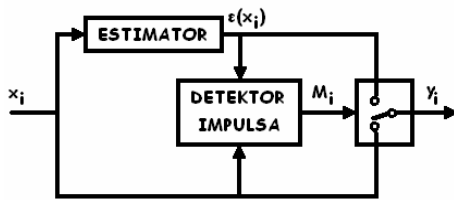
### 3. DETEKCIJA IMPULSA SA MAD ZAVISNIM PRAGOM

Rešenje koje nam omogućuje da sačuvamo dobre karakteristike median filtra, a minimizujemo loše je **vremenski-varijantno** filtriranje. To je koncept kod kojeg se filtriraju samo odbirci koji su oštećeni šumom, dok neoštećeni treba da ostanu netaknuti. Ova ideja vodi do **prekidačke šeme**, na kojoj su zasnovani svi savremeni filtri impulsnog šuma.

Vrednost izlaznog odbirka prekidačkog filtra može se izraziti kao linearna kombinacija originalnog odbirka i njegove estimirane vrednosti:

$$y_i = M_i \cdot \varepsilon(x_i) + (1 - M_i) \cdot x_i \quad (3.1)$$

Na osnovu vrednosti ulaznog odbirka  $x_i$  i estimirane vrednosti istog  $\varepsilon(x_i)$ , detektor impulsa donosi odluku da li je impuls oštećen ili ne. U slučaju odluke da je  $x_i$  oštećen, vrednost  $M_i$  uzima vrednost 1, pa će originalni odbirak  $x_i$  biti zamenjen njegovom estimiranom vrednošću  $\varepsilon(x_i)$ . U suprotnom, vrednost  $M_i$  će biti 0, pa će vrednost izlaznog odbirka  $y_i$  ostati nepromenjena u odnosu na ulaznu vrednost  $x_i$ . Stoga se  $M_i$  naziva **mapa šuma**.



Sl.2. Koncept prekidačke šeme

Statistički parametar koji sadrži informaciju o okolini odbirka  $x_i$  označavamo sa  $\Omega(x_i)$ . Mapa šuma  $M_i$  formira se obično poređenjem apsolutne razlike između  $x_i$  i  $\Omega(x_i)$  sa nekim pragom  $T$ ,

$$M_i = \begin{cases} 1, & |x_i - \Omega(x_i)| \geq T \\ 0, & |x_i - \Omega(x_i)| < T \end{cases} \quad (3.2)$$

Ukoliko za određivanje lokalne statistike  $\Omega(x_i)$  odaberemo median, signal devijacije možemo definisati kao

$$d_i = |x_i - \text{med}(\mathbf{x}_i)|, \quad (3.3)$$

koja predstavlja apsolutnu razliku između posmatranog odbirka  $x_i$ , i vrednosti dobijene median filtriranjem vektora  $\mathbf{x}_i$  čiji su elementi odbirci signala u prozoru dužine  $2K+1$  centriranog oko posmatranog odbirka  $x_i$ ,

$$\mathbf{x}_i = \{x_{i-K}, x_{i-(K+1)}, \dots, x_i, \dots, x_{i+(K-1)}, x_{i+K}\}. \quad (3.4)$$

Poređenjem devijacije  $d_i$  sa pragom  $T$  možemo realizovati prekidačku funkciju  $M_i$  na sledeći način,

$$M_i = \begin{cases} 1, & d_i \geq T \\ 0, & d_i < T \end{cases} \quad (3.5)$$

Ovakav algoritam dobro detektuje impulse, ali često tretira i neoštećene odbirke u visokofrekventnom delu signala kao impulse, pa time dovodi do prevelike degradacije signala.

Ključni problem ovog postupka je izbor optimalnog praga odlučivanja  $T$  definisanog u (3.5). Optimalna vrednost  $T$  zavisi od više faktora:

1. sadržaja signala (više izražene visoke ili niske frekvencije)
2. stepen oštećenja signala (procenat impulsnog šuma)
3. raspodela impulsnog šuma.

Visokofrekventne komponente signala nose veliki deo informacija u audio signalu te je njihovo očuvanje od ključnog značaja. Ako se za prag  $T$  odabere suviše mala vrednost, visokofrekventne komponente signala biće izgubljene i kvalitet zvuka značajno degradiran. Ukoliko se za  $T$  uzme suviše velika vrednost, u signalu će zaostati zanačajan deo impulsnog šuma. Očigledno je da postoje dva kontradiktorna zahteva pa je izbor praga  $T$  stvar kompromisa između degradacije signala i velikog procenta zaostalog šuma.

Jedan od načina za unapređenje detekcije impulsnog šuma je uvođenje **promenljivog praga**  $T=T_i=T(x_i)$  u kod određivanja mape šuma, čija se vrednost povećava u visokofrekventnom delu signala. Pošto visokofrekventnom delu signala odgovara povećana varijansa, jasno je da vrednost praga  $T$  mora biti povezana sa estimatorom koji odražava varijansu okoline posmatranog odbirka. Jedan od takvih estimatora je robusni estimator **MAD (median of the absolute deviations from the median)**, poznat u robusnoj

statistici kao estimator varijanse. MAD je definisan na sledeći način,

$$MAD_i = \text{med}(|x_i - \text{med}(\mathbf{x}_i)|). \quad (3.6)$$

Ukoliko koristimo MAD estimator za procenu varijanse, tada mapu šuma sa promenljivim pragom odlučivanja možemo definisati kao,

$$M_i = \begin{cases} 1, & d_i \geq T_i(MAD_i) \\ 0, & d_i < T_i(MAD_i) \end{cases} \quad (3.7)$$

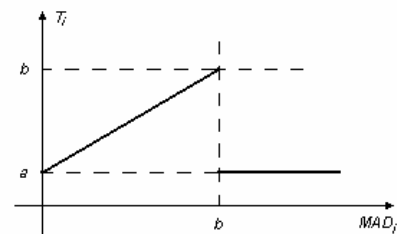
Kod određivanja promenljivog praga  $T_i(MAD_i)$ , zavisnog od MAD vrednosti okoline možemo formulisati sledeće kriterijume:

- Kada su MAD vrednosti veoma velike,  $MAD_i > b$ , verovatno su u pitanju zaostali impulsi. U tom slučaju vrednost praga  $T_i(MAD_i)$  treba postaviti na što manju vrednost, kako bi se obezbedila sigurna detekcija impulsa.
- U slučaju malih MAD vrednosti  $MAD_i < a < b$ , izvesno je da visokofrekventne komponente signala nisu izražene. Tada vrednost praga  $T_i(MAD_i)$  treba da je veća od vrednosti  $MAD_i$  u cilju očuvanja signala. U skladu sa povećavanjem vrednosti  $T_i(MAD_i)$  obezbeđuje se detekcija impulsa za dovoljno veliko  $d_i$ .
- Kada je  $a < MAD_i < b$ , postoji značajno prisustvo visokofrekventnih komponenti u signalu, pa tada vrednost praga  $T_i(MAD_i)$  mora biti srazmerna MAD vrednosti. Dodatno povećanje praga obezbeđuje bolje očuvanje signala, pogotovo u slučaju manjih MAD vrednosti.

U skladu sa navedenim zahtevima moguće je određivanje praga  $T_i(MAD_i)$  formulisati na sledeći način:

$$T_i = \begin{cases} a, & MAD_i \geq b \\ a + \frac{b-a}{b} MAD_i, & MAD_i < b \end{cases} \quad (3.8)$$

Grafički je ova zavisnost prikazana na slici 3.



Sl.3. Zavisnost praga odlučivanja  $T_i$  od robusne procene varijanse  $MAD_i$

#### 4. PWMAD DETEKCIJA IMPULSA

Ovaj koncept detekcije impulsa koristi modifikovani oblik estimatora MAD, takozvani PWMAD (*Pixel-Wise MAD*) orijentisan na nivo pojedinačnih odbiraka. Iz samog naziva estimatora očigledno je da on svoje poreklo vodi iz filtriranja impulsnog šuma slike. Ovaj naziv biće korišćen i u nastavku.

U PWMAD detekciji impulsa koristi se činjenica da je korisni signal snažno korelisan, dok signal šuma ima slabo izraženu korelaciju. Činjenica da je korisni signal korelisan,

za razliku od šuma omogućava razdvajanje šuma od korisnog signala. Tako je moguće dobiti signal sadrži uglavnom šum, pa se mapa šuma  $M_i$  može realizovati prostim poredjenjem takvog signala sa pragom  $T$ . Ovakav koncept ne zahteva prethodno obučavanje, niti optimizaciju parametara, a pri tome omogućava filtriranje svih tipova impulsnog šuma nezavisno od sadržaja korisnog signala. Estimacija i detekcija zasnovane su na median filtru, tako da je kompleksnost algoritma istog reda kao i kod median filtra.

Neka  $x_i$ ,  $m_i$ , i  $d_i$  predstavljaju odbirke zašumljenog signala, signala dobijenog median filtriranjem i signala devijacije dobijenog primenom (3.3), respektivno. Sa  $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{m}_i$  i  $\mathbf{d}_i$  označeni su vektori čiji su elementi odbirci odgovarajućih signala u okviru prozora dužine  $2K+1$  odbiraka, čiji se centar nalazi na poziciji  $i$ . Vektor  $\mathbf{x}_i$  dat je u (3.4). Median signal definisan je kao

$$m_i = \text{med}(\mathbf{x}_i), \quad (4.1)$$

a signal devijacije u skladu sa (3.3),

$$d_i = |x_i - m_i|. \quad (4.2)$$

Svaki odbirak u signalu  $x_i$  ima odgovarajuće odbirke u signalima  $m_i$  i  $d_i$  na istim pozicijama  $i$ , pa se mogu definisati operacije na nivou odbirka signala. Ovako je moguće odrediti vektor  $\mathbf{d}_i$ ,

$$\mathbf{d}_i = |\mathbf{x}_i - \mathbf{m}_i|, \quad (4.3)$$

preko koga definišemo modifikovani robusni estimator, PWMAD (*Pixel-Wise MAD*), orjentisan na nivo odbiraka odgovarajućih signala na sledeći način,

$$PWMAD_i = \text{med}(\mathbf{d}_i) = \text{med}(|\mathbf{x}_i - \mathbf{m}_i|). \quad (4.4)$$

Razlika između modifikovanog PWMAD estimatora i klasičnog MAD estimatora datog izrazom (3.6) zasnovane je na nejednakosti

$$|x_i - \text{med}(\mathbf{x}_i)| \neq |x_i - m_i| = d_i. \quad (4.5)$$

PWMAD je robusna procena varijanse kao i MAD, a dobija se median filtriranjem signala devijacije. Analizom PWMAD signala može se zaključiti da se u njemu nalazi korisna informacija dobijena iz signala devijacije, ali je šum eliminisan. Zbog definicije PWMAD estimatora i činjenice da median ne generiše nove vrednosti, odbirci u PWMAD signalu imaju vrednosti iz okoline odgovarajućih odbiraka u slici devijacije. Na osnovu te činjenice možemo zaključiti da se oduzimanjem PWMAD signala od signala devijacije može ostvariti redukcija korisne informacije iz signala devijacije, uz zadržavanje šuma.

Ovakva procedura se može realizovati iterativno, sve dok se od signala devijacije ne dođe do signala koji sadrži samo šum. Poredjenjem tog signala sa pragom  $T_d$  proizvoljne vrednosti bliske nuli, dobija se mapa šuma  $M_i$ .

Ako sa  $d_i^{(1)}$  označimo signal koji predstavlja apsolutnu razliku signala devijacije  $d_i$  i MAD signala, tada važi

$$d_i^{(1)} = |d_i - PWMAD_i| = |d_i - \text{med}(\mathbf{d}_i)|. \quad (4.6)$$

Označavanjem primarnog signala devijacije  $d_i$  sa  $d_i^{(0)}$ , iterativna procedura koja se sastoji od  $N$  koraka definiše se kao

$$d_i^{(n+1)} = |d_i^{(n)} - \text{med}(\mathbf{d}_i^{(n)})|, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (4.7)$$

Na kraju iterativne procedure dobija se signal  $d_i^{(N)}$  koji sadrži gotovo sav šum i minimalnu količinu korisnog

visokofrekventnog sadržaja signala devijacije  $d_i$ . Mapa šuma  $M_i$  posle  $N$  iteracija realizuje se prostim poredjenjem signala  $d_i^{(N)}$  sa fiksnim pragom  $T_d$ :

$$M_i = \begin{cases} 1, & d_i^{(N)} \geq T_d \\ 0, & d_i^{(N)} < T_d \end{cases} \quad (4.8)$$

Pošto nakon dovoljnog broja iteracija korisna komponenta signala nestaje, a ostaje samo šum, prag  $T_d$  može imati vrednost blisku nuli. Povećanjem broja iteracija  $N$  smanjuje se uticaj izbora vrednosti praga odlučivanja  $T_d$ .

## 5. REZULTATI

U cilju verifikacije rada predloženih algoritama i poredjenja njihovih performansi sa konkurentnim algoritmima, realizovan je veći broj eksperimenata kako na govornim, tako i na audio (muzičkim) signalima. Svi algoritmi testirani su za različite vrednosti parametara koji u njima figurišu, i ovde su dati najbolji rezultati. Kao primer, predstavljeni su rezultati dobijeni za jedan govorni i jedan muzički signal.

1. Datoteka Test1.wav (mono, 16-bit, 16 kHz, PCM audio format) koja sadrži govorni signal oštećena je sa 4% kombinovanog šuma (odnos zasićenog i uniformnog šuma 1:1) filtrirana ja median, SDRM, MAD i PWMAD algoritmima.

Tabela 1. Vrednosti odnosa signal/šum (SNR) u decibelima za različite dužine prozora, za datoteku Test1.wav

Filtar	5	7	9
Median	26.69	20.32	19.02
SDROM	27.09	21.08	20.40
MAD	28.28	21.44	20.31
PWMAD	31.02	24.90	23.44

Algoritmi su testirani za različite vrednosti parametara i kspperimentalno je ustanovljeno da se najbolji rezultati dobijaju za sledeće vrednosti:

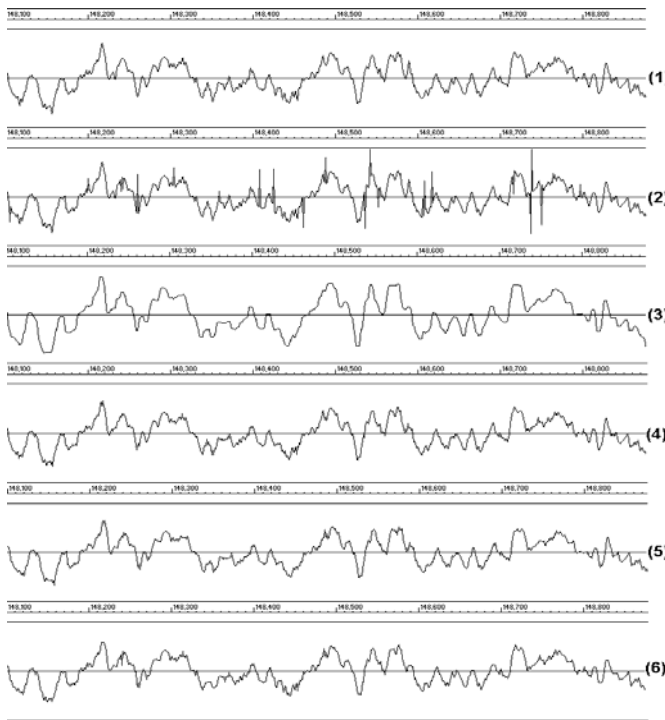
- Za MAD detekciju impulsa  $a=0.03$  i  $b=0.35$
- Za PWMAD detekciju  $T_d=0.02$  i br. iteracija=4
- Za SDRM algoritam ( $T_1=0.14$ ,  $T_2=0.4$ ), ( $T_1=0.12$ ,  $T_2=0.24$ ,  $T_3=0.36$ ) i ( $T_1=0.09$ ,  $T_2=0.18$ ,  $T_3=0.27$ ,  $T_4=0.36$ ) za dužine prozora 5, 7 i 9 respektivno

U svim slučajevima pretpostavlja se da je vrednost signala ograničena na interval  $[-1, 1]$ .

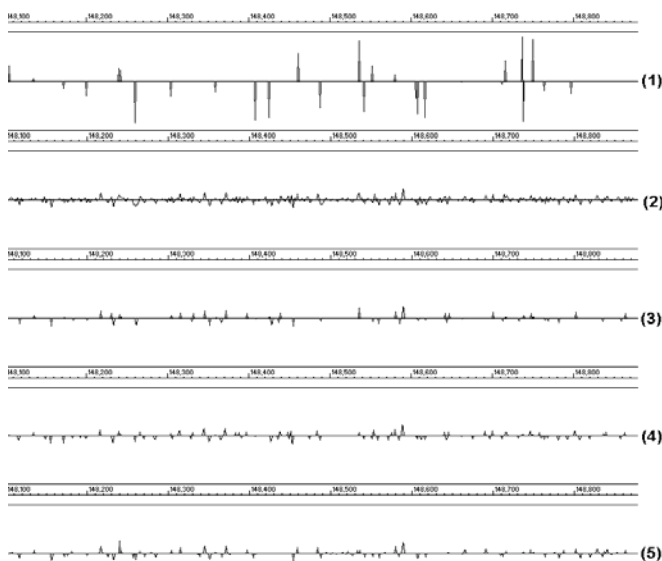
2. Datoteka Test2.wav (mono, 16-bit, 44.1 kHz, PCM audio format) koja sadrži audio signal oštećena sa 3% uniformnog šuma, filtrirana je median, SDRM, MAD i PWMAD algoritmima. Parametri algoritama su ostali identični za MAD i PWMAD detekciju, dok je za SDRM algoritam korišten set parametara primereniji uniformnom šumu: ( $T_1=0.035$ ,  $T_2=0.12$ ), ( $T_1=0.03$ ,  $T_2=0.08$ ,  $T_3=0.14$ ) i ( $T_1=0.025$ ,  $T_2=0.06$ ,  $T_3=0.09$ ,  $T_4=0.15$ ) za dužine prozora 5, 7 i 9 respektivno.

Tabela 2. Vrednosti odnosa signal/šum (SNR) u decibelima za različite dužine prozora, za datoteku Test2.wav

filtar	5	7	9
median	36.01	31.32	26.73
SDROM	37.97	35.48	30.42
MAD	40.55	36.71	32.02
PWMAD	41.21	37.05	33.51



Sl.4. Segment datoteke Test2.wav:  
 (1) originalni signal, (2) oštećeni signal,  
 (3), (4), (5) i (6) signali dobijeni filtriranjem median,  
 SDRM, MAD i PWMAD filtrima dužine prozora 7



Sl.5. Segment datoteke Test2.wav:  
 (1) razlika između originalnog i oštećenog signala, (2), (3),  
 (4) i (5) razlike između originalnog i signala filtriranog  
 median, SDRM, MAD i PWMAD filtrima respektivno

## 6.ZAKLJUČAK

Impulsni šum predstavlja značajan problem u govornom i audio signalu, jer iritira slušaoca i otežava njegovu dalju obradu i prepoznavanje. Algoritmi predstavljeni u ovom radu iskazuju dobre performanse u filtriranju impulsnog šuma u govornom i audio signalu. Oni su testirani za uniformni i zasićeni impulsni šum, te za govorni i audio (muzički) signal.

Performanse algoritama ocenjene su na dva načina: objektivno na osnovu parametra SNR (odnos signal/šum) i subjektivno na osnovu procene slušaoca. Subjektivno i objektivno, rezultati su daleko superiorniji u odnosu na median filtar. Tabele 1. i 2. pokazuju da su MAD i PWMAD značajno bolji od filtra zasnovanog na SDRM algoritmu [2]. Ovo se posebno odnosi na PWMAD filtar, koje je uz to ne zahteva nikakvo podešavanje pragova u zavisnosti od sadržaja signala i vrste i intenziteta šuma. S obzirom da se oba predstavljena filtra realizuju preko median filtra, kompleksnost ovih algoritama je istog reda kao i kod median filtra.

## LITERATURA

[1] Vladimir Crnojević, „Filtriranje impulsnog šuma u slici primenom nelinearnih filtera zasnovanih na robusnoj statistici“, doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, Septembar 2004.

[2] Charu Chandra, Michael S. Moore, Sanjit K. Mitra „An efficient method for the removal of impulse noise from speech and audio signals“, Dept. of Electrical and Computer Engineering University of California, Santa Barbara, Santa Barbara CA 93106-9560

[3] Vladimir Crnojević, Vojin Šenk, Željko Trpovski „Advanced Impulse Detection Based on Pixel-Wise MAD“, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol 11, No 7, July 2004

**Abstract** – A new class of algorithms for impulse noise filtering in speech and audio signals is presented. The algorithms are based on median, MAD and PWMAD robust estimators, well known in robust statistics. The order of complexity of these filters is the same as for median, thus providing their simple implementation, and work in real-time applications. PWMAD based algorithm does not require additional parameter setting for different signals or impulse noise types.

## SPEECH AND AUDIO IMPULSE NOISE FILTERS BASED ON MAD AND PWMAD IMPULSE DETECTION

Bogdan Korać, Vladimir Crnojević, Vlado Delić