

ANALIZA PRIMENE MLS I SINE SWEEP TEHNIKA ZA MERENJE IMPULSNOG ODZIVA PROSTORIJA

Dejan Ćirić, Miroslava Milošević, Vladimir Dragičević, *Elektronski fakultet u Nišu.*

Sadržaj – Impulsni odziv, odnosno, prenosna funkcija linearnih, vremenski invarijantnih sistema se može meriti primenom različitih tehnika i metoda. Savremene tehnike koje pružaju najveće mogućnosti su MLS (Maximum Length Sequence) i Sine Sweep tehnika. MLS metoda je zasnovana na pseudo-slučajnom belom šumu, dok je ova druga zasnovana na eksponencijalnom Sine Sweep signalu. Obe tehnike se mogu primeniti na jednostavnom mernom sistemu baziranom na PC računaru. Poređenje pomenutih tehnika je izvršeno kroz merenja impulsnih odziva konkretne prostorije i određivanje njenih akustičkih karakteristika. Pored toga, izvršena je i optimizacija uspostavljanja početka pobudnog signala kod Sine Sweep tehnike. Rezultati pokazuju relativno bolju dinamiku odziva prostorije dobijenu Sine Sweep tehnikom i manju osetljivost na izobličenja.

1. UVOD

Za savremenu analizu akustičkih sistema koriste se dva načina merenja: karakterizacija linearne prenosne funkcije sistema - kroz merenje njenog impulsnog odziva i analiza nelinearnosti - kroz merenja harmonijskih izobličenja različitog reda [1].

Danas se za merenje impulsnog odziva sistema najčešće koristi tehnika sekvence maksimalne dužine (MLS), ali su u upotrebi i neke druge tehnike kao što je vremenski zakašnjena spektrometrija (Time-Delay Spectrometry - TDS) [2-5]. Obe pomenute metode su zasnovane na pretpostavci idealne linearnosti i vremenske invarijantnosti sistema. MLS metoda je veoma osetljiva na nelinearnost i vremensku invarijantnost, i potrebno je da pobudni signal bude precizno sinhronizovan sa snimanjem odziva sistema.

Da bi se prevazišla neka od značajnih ograničenja MLS tehnike, predložena je nova tehnika Sine Sweep koja koristi prednosti TDS metoda [6]. Došlo se zaključka da je korišćenjem sinusnog signala čija se frekvencija menja po eksponencijalnom (logaritamskom) zakonu moguće simultano dekonvoluirati linearni impulsni odziv sistema i impulsne odzive za svaki red harmonijskih izobličenja [5, 6]. Ovi impulsni odzivi su razdvojeni duž vremenske ose. FFT analizom svakog od njih, mogu se izdvojiti linearni frekvencijski odziv i odgovarajući spektar izobličenja. Ovo znači da je sistem potpuno okarakterisan samo jednim, brzim i jednostavnim merenjem. Sama tehnika je otpornija na manje promene u vremenu sistema koji se testira, kao i na manju grešku sinhronizacije između emitovanja pobude i snimanja odziva [6].

MLS i Sine Sweep tehnika su u ovom radu ukratko prikazane sa teoretskog aspekta. Opisan je prost merni sistem baziran na PC računaru i odgovarajuća softverska podrška kojom je moguće primeniti obe tehnike. Izvršena je optimizacija pobudnog signala kod Sine Sweep tehnike. Da bi se izvršila uporedna analiza korišćenih tehnika, impulsni

odzivi jedne konkretne prostorije su izmereni primenom i MLS i Sine Sweep tehnike i analizirani sa aspekta razlika u talasnom obliku, dinamici, pozadinskom šumu i akustičkim karakteristikama dobijenim na osnovu izmerenih impulsnih odziva.

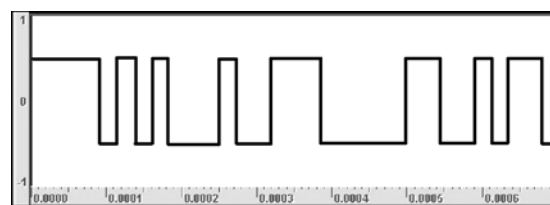
2. MLS I SINE SWEEP TEHNIKA

Za praktično merenje impulsnog odziva, odnosno prenosne funkcije, najjednostavnije je primeniti poznati signal kao ulaz $x(t)$, i izmeriti odziv sistema $y(t)$. Pri tome, najčešće se koriste širokopojasni, deterministički i periodični signali, kao što je MLS, ali sve više i Sine Sweep signal.

MLS je definisan kao pseudo-slučajna sekvenca binarnih cifara (0 i 1), koje su generisane primenom pomeračkog registra, Sl. 1. Značajne osobine ove sekvence su [3-5]:

- Periodičnost: signal se može ponavljati kontinualno, a usrednjavanjem odziva sistema kroz mnogo ponovljenih sekvenci, dobija se relativno dobar odnos signal-šum.
- Binarnost: kada se signal kreće samo između dve ekstremne vrednosti, *crest* faktor je 0 dB, što daje maksimalnu snagu u opsegu ograničenom amplitudom signala.
- Ravan spektar: spektar ovog signala je gotovo savršeno ravan, nalik spektru belog šuma.
- Autokorelacija je Dirakova delta funkcija, što omogućava dekonvoluciju impulsnog odziva sistema korelisanjem merenog odziva sa originalnom sekvencom.
- MLS sekvenca ima prednost izračunavanja korelacije brzim algoritmom (brza Hadamardova transformacija).

Jedan od osnovnih nedostataka MLS tehnike je osetljivost na nelinearna izobličenja i promenljivost u vremenu. Na primer, kada mereni sistem pokazuje neku vrstu nelinearnosti, dolazi do pojave "fantomskih ehoa" u definisanim pozicijama impulsnog odziva koje su u direktnoj vezi sa konfiguracijom pomeračkog registra korišćenog za generisanje MLS-a.



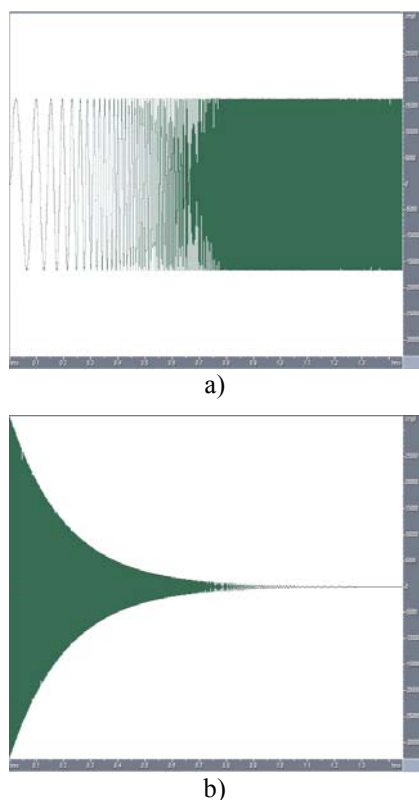
Sl.1. MLS signal reda 5

Sine Sweep signal je sinusoidalni signal, kome se frekvencija kontinualno menja od početne do krajnje frekvencije posmatranog opsega [6], Sl. 2. Ova promena može da bude linearna kao kod TDS tehnike ali i logaritamska koja pokazuje znatno bolje karakteristike. Sine

Sweep signal sa logaritamskom promenom frekvencije se može generisati sledećim izrazom:

$$x(t) = \sin \left[\frac{\omega_1 T_t}{\ln(\omega_2/\omega_1)} \left(e^{\frac{t}{T_t} \ln(\omega_2/\omega_1)} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

gde je ω_1 početna, a ω_2 krajnja frekvencija opsega, dok je T_t trajanje Sine Sweep signala u sekundama. Inverzni Sine Sweep odnosno filter ovog signala dobija se tako što se pobudni Sine Sweep signal vremenski invertuje a zatim se njegova amplituda oslabi za 6 dB/oct, počevši od 0 dB pa do nivoa od $-6\log_2(\omega_2/\omega_1)$, Sl. 2.b). Linearna konvolucija snimljenog odziva sistema i ovog inverznog Sine Sweep signala daje traženi impulsni odziv merenog sistema.



Sl.2. Pobudni Sine Sweep signal a) i njegov vremenski inverzni oblik oslabljen 6 dB/oct b)

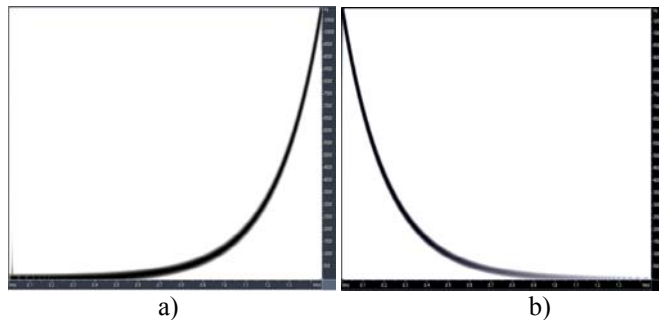
Sonograf Sine Sweep signala, koji daje spektar ovog signala u vremenu i sonograf vremenski inverznog signala dati su na Sl. 3. Kada je y osa (frekvencijska osa) logaritamska onda su prikazani sonografi prave linije. Konvolucijom Sine Sweep signala sa njegovim inverznim oblikom dobija se Dirakov impuls, Sl. 4.a). Impuls dobijen direktno na ovaj način ima određena izobličenja koja se ogledaju u talasanju na visokim frekvencijama i ona traju izvesno vreme pre i posle impulsa (oblasti označene nijansama sive boje na Sl. 4).

FFT analizom Sine Sweep signala dobija se spektar koji opada 3 dB/oct (Sl. 5). Ovo pojačanje niskih frekvencija, poput onog kod ružičastog šuma je poželjno jer se na taj način omogućava veća dinamika merenja zato što pozadinski šum uglavnom ima više nivoe na niskim frekvencijama.

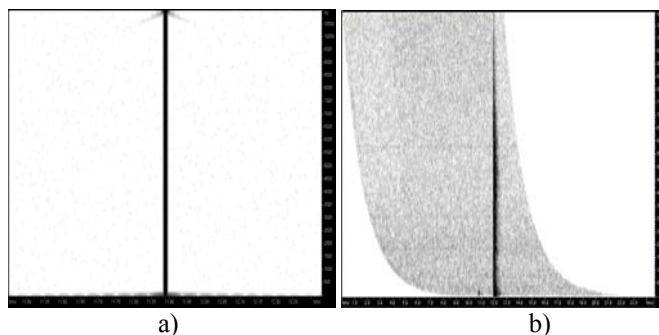
3. MERENJE AKUSTIČKIH KARAKTERISTIKA PROSTORIJE I ANALIZA REZULTATA

Da bi se odredile akustičke veličine konkretne prostorije izvršena su merenja impulsnog odziva laboratorije za elektroakustiku Elektronskog fakulteta u Nišu. Za merenja je korišćen razvijeni merni sistem baziran na PC računaru koji se sastojao od kondenzatorskog mikrofona B&K type 4144, mikrofonskog pretpojačavača B&K type 2619, izvora napajanja mikrofona B&K 2807, PC računara sa zvučnom karticom, pojačavača Ei Hi-Fi 160 i dodekaedarskog zvučnika.

Kao softver u ovom mernom sistemu, korišćen je program Cool Edit i Aurora moduli koji su ugrađeni u Cool Edit [6]. Ovim programom moguće je na lak način kreirati pobudni signal, obaviti merenje, izdvojiti impulsni odziv, izvršiti obradu i analizu dobijenih rezultata. Matematičke operacije kao što su konvolucija, dekonvolucija, FFT analiza, kao i kompletno izračunavanje akustičkih parametara izvršavaju se relativno brzo. U Multitrack modu omogućeno je sinhronizovano reprodukovanje i snimanje signala. Takođe, na lak način moguće je grafički prikazati dobijene rezultate.



Sl.3. Sonografi pobudnog Sine Sweep signala a) i njegovog inverznog oblika oslabljenog 6 dB/oct b)

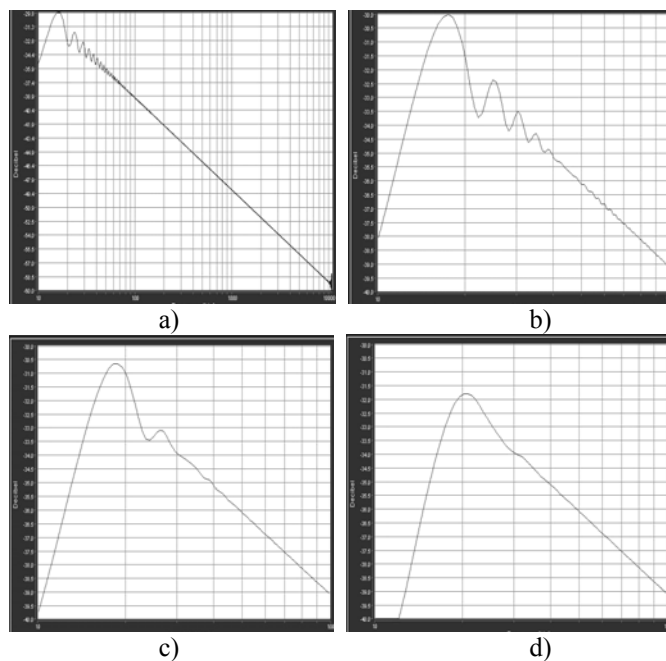


Sl.4. Sonografi impulsnih odziva dobijenih pomoću Sine Sweep tehnike, Dirakov impuls a) i impuls izmeren u prostoriji b)

Posmatrajući spektar Sine Sweep signala, mogu se primetiti izvesne fluktuacije na početku i kraju, Sl. 5.a). One se javljaju usled naglog uspostavljanja i naglog prekida signala. Da bi se pomenute fluktuacije smanjile ili potpuno uklonile, potrebno je umanjiti ili neutralisati efekte naglog uspostavljanja signala i njegovog naglog prekida, odnosno treba uvesti postepeno uspostavljanje i postepeno opadanje pobudnog Sine Sweep signala.

Pomenuti efekat se može ostvariti direktno primenom fade-in operacije Cool Edit-a na početak signala i fade-out

operacije na kraju signala. Time se može dobiti zadovoljavajuće glatka kriva, bez većih fluktuacija. Da bi se dobilo optimalno vreme za uspostavljanje signala, izvršeno je ispitivanje uticaja ovog vremena na smanjenje fluktuacija u frekvencijskom domenu. Tako je postepeno uspostavljanje prednje ivice (fade-in) primenjeno na pola periode, jednu i dve periode Sine Sweep signala što je prikazano na Sl. 5.b), 5.c) i 5.d), respektivno.



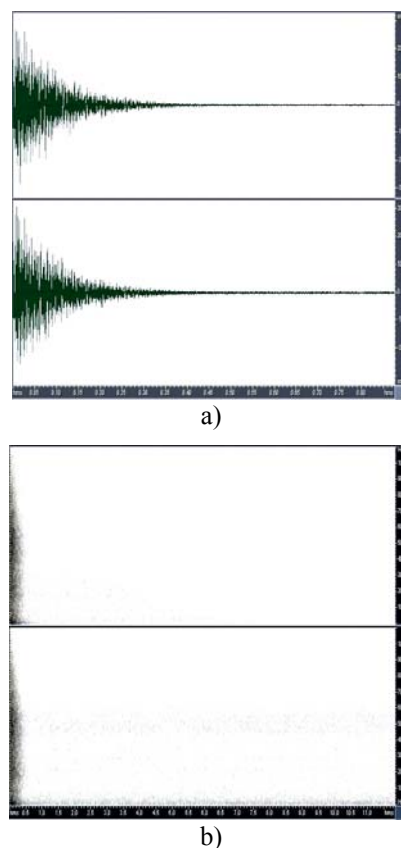
Sl.5. Analiza efekta postepenog uspostavljanja Sine Sweep signala u frekvencijskom domenu

Iz navedenog prikaza se vidi da je moguće "ispeglati" fluktuacije nastale usled naglog početka signala. Pri tome već primena fade-in-a u jednoj periodu daje izvesno smanjenje fluktuacija, ali za njihovu značajnu redukciju potrebno je primeniti fade-in operaciju u nešto dužem intervalu (npr. dve periode), dok bi za potpunu eliminaciju fluktuacija potrebno primeniti fade-in u tri periode. Međutim, ovo su rezultati za jedan konkretan primer Sine Sweep signala koji ima frekvencijski opseg [11-11025] Hz, trajanje 1.45 s a frekvenciju odmeravanja 44100 Hz. Za donošenje generalnog zaključka, trebalo bi detaljnije ispitati šta se dešava kada se menja trajanje signala i frekvencija odmeravanja.

Impulsni odzivi pomenute prostorije su izmereni u 3 tačke korišćenjem MLS signala reda 18 kao pobude čije je trajanje 11.889 s a frekvencija odmeravanja 22050 Hz. Za Sine Sweep metod je generisan Sine Sweep signal istog trajanja kao MLS sa istom frekvencijom odmeravanja. Njegov frekvencijski opseg bio je [11-11025] Hz.

Izabran je optimalni nivo reprodukcije MLS signala koji je dao odnos signal/šum (pik/šum) od oko 51 dB, pri čemu su izobličenja bila relativno mala. Ovaj nivo (pojačanje) je zadržan za sva merenja u prostoriji primenom MLS tehnike. Za Sine Sweep metod je takođe korišćen ovaj isti nivo, ali pošto on nije optimalan za ovaj metod, korišćen je i nešto viši nivo. Impulsni odzivi dobijeni korišćenjem MLS i Sine Sweep signala nemaju istu amplitudu pa je potrebno normalizovati jedan od njih da bi se omogućilo njihovo poređenje. Takođe, kako je početak impulsnog odziva dobijenog Sine Sweep tehnikom na kraju pobudnog signala

(u vremenu 11.889 s) onda treba izvršiti njegovo pomeranje u vremenu odsecanjem početnog dela odziva tako da se početak ovog impulsnog odziva poklopi sa početkom odziva dobijenog MLS tehnikom. Impulsni odzivi dobijeni posle normalizacije i pomeranja su prikazani na Sl. 6.



Sl.6. Impulsni odzivi prostorije a) i sonografi impulsnih odziva b) dobijenih Sine Sweep signalom (gore) i MLS signalom (dole)

Kao što se može primetiti sa slike, impulsni odzivi su gotovo identični. Međutim, iako se početni delovi oba odziva praktično poklapaju, ovo ne važi za zadnje delove impulsnih odziva koji predstavljaju pozadinski šum. Kod impulsnog odziva dobijenog pomoću Sine Sweep metode, šum ima opadajući karakter dok je kod impulsnog odziva dobijenog pomoću MLS metode on stacionaran. Zbog toga je diskutabilno koliki je nivo šuma impulsnog odziva dobijenog Sine Sweep metodom.

Analiza impulsnih odziva MATLAB softverom je pokazala da je dinamika odziva (odnos pik/šum) izmerenog korišćenjem MLS tehnike oko 51 dB, dok je ovaj odnos kod odziva izmerenog Sine Sweep tehnikom oko 61 dB, pri čemu je kao nivo šuma uzet srednji nivo iz celog opsega šuma. Pokazalo se da su rezultati dinamike odziva kod Sine Sweep tehnike vrlo zavisni od opsega šuma koji se uzima za analizu zbog pomenutog opadanja nivoa šuma.

Na osnovu impulsnog odziva prostorije moguće je izračunati veliki broj akustičkih parametara koji su u saglasnosti sa međunarodnim ISO standardom 3382 [7]. Tako mogu se dobiti odnosi ranog i kasnog zvuka za granicu od 50 ms (C_{50}) i 80 ms (C_{80}), zatim definisanost (D_{50}), vreme centra (T_s), rano vreme opadanja (EDT) i vremena reverberacije izračunata korišćenjem različitih opsega opadanja ($T20$, $T30$ i

Tuser). Ovi parametri dobijeni na osnovu odziva izmerenih MLS tehnikom i Sine Sweep tehnikom su prikazani u Tabeli 1 i 2, respektivno.

Izvršeno je i ispitivanje uticaja povećanja nivoa pobudnog Sine Sweep signala. Za tu namenu su korišćena dva nivoa pobude: prethodno pomenuti optimalni nivo za MLS tehniku i nivo viši za oko 7 dB. Ovakvo povećanje nivoa pobude kod MLS tehnike dovodi do smanjivanja odnosa pik/šum jer uticaj izobličenja postaje dominantan. Sa druge strane, ovo se ne događa kod Sine Sweep tehnike. Analizom impulsnih odziva korišćenjem MATLAB softvera dobijena je dinamika odziva za oba nivoa pobudnog signala. Tako, za niži nivo pobude, odnos pik/šum je oko 61 dB (kao što je već pomenuto ranije), dok je za viši nivo pobude ovaj odnos oko 68 dB. Ovim se pokazuje da je Sine Sweep tehnika manje osetljiva na izobličenja i da je moguće dobiti veći dinamički opseg nego primenom MLS tehnike.

Tabela 1. Akustički parametri dobijeni iz impulsnog odziva izmerenog korišćenjem MLS tehnike

Freq.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Lin	A
Sign[dB]	88.27	88.18	82.73	81.93	87.91	92.74	93.70	97.26	97.53
C50 [dB]	-0.34	0.18	1.79	1.79	0.28	2.19	2.31	1.43	1.84
C80 [dB]	3.97	7.06	5.74	5.29	4.03	5.60	6.28	5.22	5.46
D50 [%]	48.02	51.03	60.16	60.15	51.62	62.34	62.98	58.17	60.45
Ts [ms]	76.53	61.77	57.30	57.83	62.98	52.92	50.03	55.98	53.91
EDT [s]	0.78	0.57	0.65	0.81	0.79	0.70	0.61	0.70	0.70
T20 [s]	0.75	0.81	0.71	0.76	0.76	0.68	0.61	0.71	0.69
r T20	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T30 [s]	1.01	0.96	0.73	0.71	0.74	0.67	0.62	0.75	0.69
r T30	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Tuser [s]	0.89	0.82	0.72	0.73	0.75	0.68	0.61	0.71	0.69
r Tuser	0.96	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

RTU = RT User (-5. dB, -30. dB)

Tabela 2. Akustički parametri dobijeni iz impulsnog odziva izmerenog korišćenjem Sine Sweep tehnike

Freq.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Lin	A
Sign[dB]	87.83	87.64	82.46	81.41	87.47	92.17	93.43	96.79	97.05
C50 [dB]	-0.35	0.34	1.53	1.58	0.58	1.44	1.90	1.08	1.33
C80 [dB]	4.03	6.89	5.37	5.10	4.16	5.13	6.11	5.02	5.18
D50 [%]	47.98	51.93	58.70	59.02	53.35	58.20	60.78	56.16	57.60
Ts [ms]	77.86	62.13	58.87	57.86	62.27	55.32	51.79	57.50	55.68
EDT [s]	0.78	0.60	0.69	0.80	0.78	0.70	0.60	0.70	0.69
T20 [s]	0.76	0.82	0.67	0.75	0.74	0.68	0.64	0.72	0.69
r T20	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T30 [s]	0.90	0.80	0.70	0.72	0.72	0.69	0.66	0.75	0.71
r T30	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Tuser [s]	0.84	0.82	0.70	0.74	0.73	0.68	0.64	0.72	0.69
r Tuser	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

RTU = RT User (-5. dB, -30. dB)

4. ZAKLJUČAK

Savremene tehnike koje su primenjene u ovom radu, MLS i Sine Sweep tehnika, pokazuju pouzdanost u merenju, pružaju značajne pogodnosti u radu, omogućavaju dobijanje velikog odnosa signal-šum (pik/šum) i primenu merenja sa multikanalnim konfiguracijama.

Generalno gledajući, ove dve metode su dale dobre rezultate u obavljenim merenjima. Za optimalnu primenu Sine Sweep tehnike potrebno je uvesti postepeno

uspostavljanje i postepeno opadanje pobudnog signala. Po pitanju odnosa pik-šum, Sine Sweep tehnika dala je nešto bolje rezultate od MLS tehnike pri istim mernim uslovima. Pri tome, treba imati na umu da je MLS tehnika osetljivija na vremenske promene u merenom sistemu kao i na nelinearnost. Sine Sweep tehnika dopušta veći nivo pobude što omogućava još veću dinamiku dobijenog odziva.

LITERATURA

- [1] S. Müller and P. Massarani, "Transfer-function measurement with sweeps," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, pp. 443-471, 2001.
- [2] G. B. Stan, J. J. Embrechts and D. Archambeau, "Comparison of different impulse response measurement techniques," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, pp. 249-262, 2002.
- [3] J. Borish and J. B. Angell, "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 31, pp. 478-487, 1983.
- [4] J. Vanderkooy, "Aspects of MLS measuring systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, pp. 219-231, 1994.
- [5] D. D. Rife and J. Vanderkooy, "Transfer-function measurement with maximum-length sequences," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37, pp. 419-444, 1989.
- [6] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," pre-print of the *108th Convention of the Audio Eng. Soc.*, 2000.
- [7] ISO 3382: *Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, International Standards Organization. Geneve, 1997.

Abstract – Impulse response and transfer function of linear time-invariant systems can be measured by implementation of different techniques and methods. Modern techniques offering greatest possibilities are MLS (Maximum Length Sequence) and Sine Sweep technique. MLS method is based on pseudorandom white noise while the later is based on exponential Sine Sweep signal. Both techniques can be applied on simple PC based measurement system. The comparison of the mentioned techniques is done through measurements of impulse responses of particular room and determination of its acoustic characteristics. In addition, the optimization of sudden onset of excitation signal in Sine Sweep technique is accomplished. The results show greater dynamic range of responses obtained by Sine Sweep technique and less sensitivity of this technique to non-linearity.

ANALYSIS OF IMPLEMENTATION OF MLS AND SINE SWEEP TECHNIQUES FOR MEASUREMENT OF ROOM IMPULSE RESPONSE

Dejan Ćirić, Miroslava Milošević and Vladimir Dragičević