

# Primerjava postopkov MLS in sinusnega preleta v prostorsko akustičnih meritvah

**Franco Policardi**

*Università di Bologna, viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia  
franco.policardi@studio.unibo.it*

**Povzetek.** Sodobne prostorsko akustične meritve se še razvijajo, kar je razvidno tudi iz standarda ISO 3382. Najpogosteje sta v uporabi metoda MLS kot metoda sinusnega preleta (Sine Sweep), saj ima vsaka od metod svoje prednosti in slabosti. Medtem ko metoda MLS zagotavlja dobro in učinkovito grobo oceno rezultatov, je metoda sinusnega preleta natančnejša, vendar časovno in izračunsko zahtevnejša. Med zadnjimi akustičnimi meritvami v tržaški dvorani Politeama Rossetti smo obe metodi primerjali. Teoretski pregled merilnih postopkov bomo tako v članku podkrepili tudi s praktičnimi rezultati. (70)

**Ključne besede:** prostorska akustika, ISO 3382,  $RT_{60}$ , impulzni odziv, MLS, sinusni prelet

## 1 UVOD

Vsak fizični prostor ima svoje značilne akustične lastnosti in tudi v sodobni navidezni resničnosti ima akustika poglobljeno vlogo pri ustvarjanju vtisa resničnosti. Zanesljive meritve prostorske akustike so se razvile med koncem 19. in začetkom 20. stoletja in so skozi uporabo značilnih algoritmov vpeljale številne akustične parametre, najprej reverberacijsko časovno upadanje za prvih 60dB (Reverberation Time -  $RT_{60}$ ). V realnosti opazamo razlike med izračunanimi in izmerjenimi parametri, standard ISO 3382 [1] pa določa nekaj glavnih napotkov za izvedbo meritev prostorske akustike. Isti standard ISO dopušča uporabo različnih merilnih postopkov, različnih signalov vzbujanja in dovoljuje veliko svobode pri izbiri različnih operativnih izvedb, kar lahko vpliva na končne rezultate meritev.

Temeljna predpostavka analize obnašanja akustičnega ali elektroakustičnega sistema je njegov linearni časovno neodvisen (Linear Time Invariant - LTI) odziv med merilnim postopkom. Ta pogoj je potreben za določitev impulznega odziva sistema (Impulse Response - IR), za posredni izračun frekvenčnega odziva in določitev drugih parametrov. Prostorski impulzni odgovor  $g(t)$  je časovni potek tlačnega odziva na določenem položaju sprejemnika (senzorja) kot posledica vzbujanja z impulznim virom. To omogoči študij specifičnega algoritma za določanje enolične zveze med zvočnim izvorom in sprejemnikom zvoka prek nepoznane prenosne funkcije akustičnega prostora. Časovno-energijska funkcija je torej določena z izrazom  $E(t) = [g(t)]^2$ .

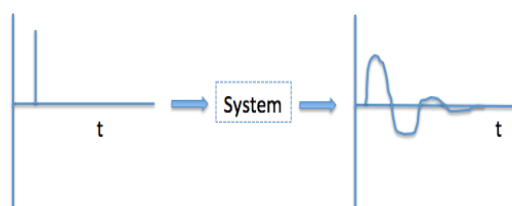
Po definiciji je IR sistemski izhodni signal, ki ga povzroči vhodni signal v obliki Diracovega impulza  $\delta$ . Slednji je v digitalni obliki PCM definiran kot zaporedje 0-1, ki vključuje le eno vrednost 1, kar predstavlja polno moč signala. Ta način merjenja IR (pogosto tudi vzbujen z analognim približkom strele iz pištole ali poka balona) kaže raznovrstne probleme, kot so npr. nizko razmerje signal/šum (Signal/Noise - S/N), mogoči nelinearni fenomeni zaradi prehitrega vzpona signala (slew rate) ter prisotnost zelo nizkih in visokih frekvenc, ki lahko poškodujejo elektroakustične pretvornike.

Zgodnji akustiki so uporabljali ocenjevanje s ploskanjem, da bi ovrednotili akustično obnašanje prostora; to se je dogajalo v manj tehnološki dobi in je predstavljalo netehnološki pristop ob veliko manjšem izmerjenem prostorskem šumu ozadja. Razvile so se torej različne posredne merilne tehnike IR, najprej orgelske cevi (W. C. Sabine v letu 1895) [2], sledil je umetno generiran beli šum in v današnjem času uporaba psevdonaključnega zaporedja maksimalne dolžine (Maximum Length Sequence - MLS), kot tudi postopka s sinusnim preletom (Sine Sweep).

## 2 MERILNE METODE

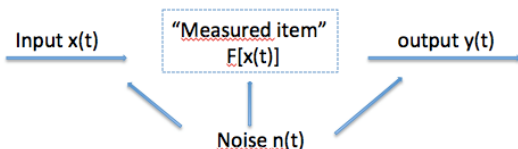
### 2.1 Teorija

Preprosta metoda za merjenje impulznega odziva kateregakoli sistema je, da v sistem pošljemo dejanski impulz enote ter opazujemo njegov izhod. Bolj ko je vhodni impulz podoben idealnemu, natančnejši bo izmerjeni IR sistema, kot kaže slika 1.



Slika 1: Diracov  $\delta$  impulz, merjeni sistem in sistemski IR

Čeprav je ta metoda natančna, mora biti za dobre rezultate vhodni signal čim bolj podoben idealnemu impulzu. Žal je v realnih razmerah Dirac  $\delta$  prekratek, da bi vseboval dovolj energije. Preprost izračun pokaže, da je pri običajnem signalu PCM pri vzorčni frekvenci 44,1kHz dolžina enotnega impulza v velikostnem razredu  $10^{-6}$ s (približno 22,68 $\mu$ s), kar je odločno premalo, da bi takšen signal katerikoli zvočnik korektno reproduciral za vsaj 60 dB nad šumom ozadja. Tudi če bi bilo to mogoče, bi vsaka majhna nelinearnost lahko ogrozila dobre merilne rezultate. Realni potek meritve prikazuje slika 2 [3], kjer upoštevamo obstoj popačenj predvajanja.



Slika 2: Realno merjenje linearnega sistema s šumom

## 2.2 Metoda MLS

Signal MLS je uporaben kot vhodni signal za merjenje poljubnih vhodno-izhodnih sistemov, kakršnih je večina opreme oz. sistemov prostorske akustike. Na začetku (1965) je bil signal MLS sestavljen iz osnovnih polinomov ter pozneje na podlagi digitalnih premikalnih registrov. Signal MLS je podoben belemu šumu, ki je neperiodičen in naključen; zato meritev zahteva povprečevanje znotraj razmeroma dolgega merilnega časa (velikostni razred minute), da bi zanesljivo pravilno ocenili njegov spekter. Takšen signal je sestavljen iz naključno razporejenega zaporedja impulzov iste amplitude, s pozitivnimi in negativnimi vrednostmi, tako da je zaporedje simetrično okrog vrednosti 0. Ta vrsta signala vsebuje vsaj  $x \cdot 10^4$  impulzov na zaporedje, ima torej večjo energijsko vsebino kot teoretični signal Dirac  $\delta$ , ki vsebuje le en impulz na merilno zaporedje [4]. Dolžina numeričnega zaporedja MLS je  $2^n - 1$ , pri čemer je  $n$  število stopenj v premikalnem registru; v akustiki po navadi uporabljamo 16-stopenjske premikalne registre, kar predstavlja po 65.535 vzorcev za značilen prostorsko akustični merilni signal MLS.

Zelo pomembna lastnost uporabe signala MLS je, da je njegova avtokorelacijska funkcija enaka idealnemu Diracovemu impulzu  $\delta$ , kot prikazuje slika 3.

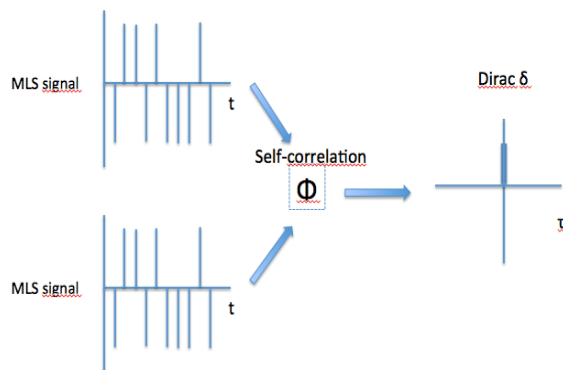


Figure 3: Avtokorelacijska funkcija signala MLS je enaka Diracovemu impulzu  $\delta$

Prednosti psevdonaključnega signala MLS so 1) njegov popoln frekvenčni spekter, 2) ob podanem zaporedju je matematično lahko določiti njegovo časovno obratno zaporedje  $MLS^{-1}$ , 3) ker je MLS binarno zaporedje, je njegov konvolucijski produkt poenostavljen, saj množenja postanejo vsote, 4) zaradi lastnosti signala in preprostosti izračuna konvolucije v časovnem prostoru je potreben le izračun hitre Hadamardove transformacije (Fast Hadamard Transform - FHT), ter navsezadnje 5) zaradi ravnega zvočnega spektra je izračun signalnega frekvenčnega impulznega odziva preprost.

Odziv, ki se od Diracovega impulza  $\delta$  razlikuje, se odraža v akustično nelinearnem obnašanju. Iz te razlike s pomočjo FFT določimo frekvenčni odziv in druge značilne parametre merjenega predmeta. Zato je bila ta merilna metoda tako razširjena med letoma 1975 in 2000 (poznana kot TEF ali MLSSA), ko je bila izračunska moč še omejena. Opozoriti je treba, da mora biti v posebnih primerih merjenja prostorske akustike trajanje signala MLS daljše od prostorskega odmeva  $RT_{60}$ , tako da zvočno polje doseže statično stanje v prostoru, s čimer zagotovimo korektno merilne rezultate.

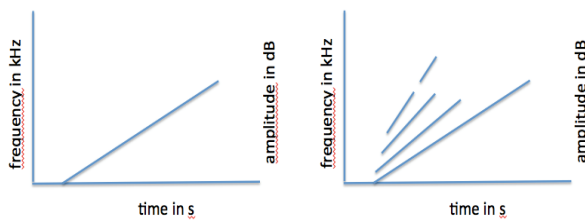
Poglobljene raziskave, posvečene analizi omenjene merilne metode, so pokazale njene bistvene omejitve, ki lahko povzročijo določena popačenja v meritvi IR, predvsem zaradi odstopanja sistema od LTI in s tem povezane negotovosti različnih rezultatov. Namesto homogenega upadanja Schroederjeve funkcije se pri meritvi pojavljajo različni vrhovi, katerih vzrok je odstopanje značilnosti elektroakustičnega sistema od obnašanja LTI.

## 2.3 Linearna metoda s sinusnim preletom

Postopoma so se pri akustičnih meritvah uveljavile druge metode: najprej linearni sinusni prelet (Linear Sine Sweep - LSS). Postopek poznamo tudi pod imenom spektrometrija s časovno zakasnitvijo (Time Delay Spectrometry - TDS) z uporabo analizatorja TEF in naknadno uvedenega eksponencialnega sinusnega

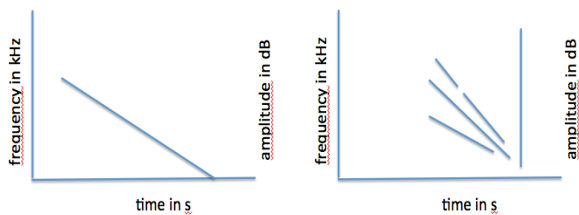
preleta (exponential Sine Sweeps - ESSs). LSS je prvič vpeljal R. C. Heyser v letu 1967 [6] z uporabo linearno časovno naraščajoče frekvence s preletom celotnega merjenega objekta, kar spominja na prve raziskave prostorske akustike W. C. Sabineja [2] s 5-frekvenčno različnimi orgelskimi cevmi. TDS je značilen širokospektralni postopek z vzbujanjem s signalom  $\exp[i\theta(t)]$ ; zakasnilni sledilni filtri obdelajo odziv merjenega objekta in določijo pomembne informacije.

Pomembna izračunska lastnost postopkov s sinusnim preletom je, da je inverzno filtriran testni signal  $x(t)^{-1}$  le časovno obrnjen testni signal  $x(t)$ . Prednosti računske preprostosti MLS FHT so pri postopkih s sinusnim preletom sicer izgubljene, vendar sodobna izračunska zmogljivost zagotavlja enakovredno hitro računanje hitre konvolucije prek t. i. postopkov »izberi in shrani« na osnovi FFT (select save FFT). Največja prednost postopkov s sinusnim preletom tehnik je, da omogoča identifikacijo popačenj tudi tedaj, ko celotna merilna veriga ne ustreza lastnostim LTI ali je na kakršenkoli način nelinearna, kot to npr. velja za elektroakustične predvajalnike, kar je prikazano na sliki 4.



Slika 4: LSS in meritve z distorzijskimi zmnožki (zgornji nevporedni)

S konvolucijo izhodnega signala  $y(t)$  s testnim signalom inverznega filtra  $x(t)^{-1}$  lahko izločimo popačenja produktov višjega reda ter določimo vzporedno desno zaželeni IR, povezan z obnašanjem  $F[x(t)]$  merjenega objekta, kot kaže slika 5.

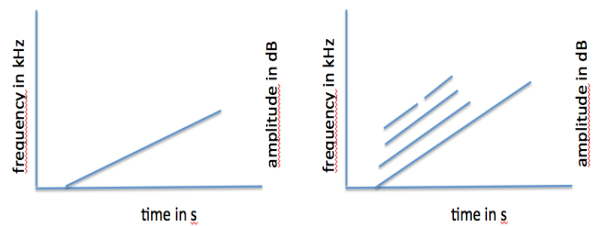


Slika 5: LSS  $x(t)^{-1}$  inverzni filter in IR v časovno-frekvenčnem področju

Bistveni prispevek metode LSS je njena zmožnost razločevanja med sistemskim IR in elektroakustičnimi nelinearnostmi. Tehnika LSS težko dovoljuje dobro razločevanje različnih popačenj harmonskih zmnožkov in je žal še vedno občutljiva na časovno prekrivanje v primerih, ko izhodni signal ni bistveno daljši od  $RT_{60}$ , v čemer spominja na metodo MLS. Zato metodo LSS v prostorski akustiki redko uporabljamo, predvsem zaradi rastoče popularnosti metode ESS.

## 2.4 Eksponentna metoda s sinusnim preletom

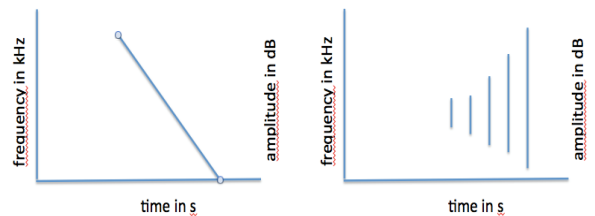
Zanimiv napredek iz metode LSS je družina postopkov ESS, kjer je zakonitost frekvenčnega naraščanja mogoče poljubno izbirati. Merilna metoda ESS uporablja frekvenčno določen sinusni prelet s časovno eksponentnim naraščanjem, ki je v specifičnem primeru uporabe logaritmičnega zakona veliko bolj podoben človeškemu ušesu in glasbenemu logaritmičnemu obnašanju. V tem primeru  $y(t)$  predstavlja vzporedne funkcije  $x(t)$  v časovno-frekvenčno logaritmični ravnini, kot kaže slika 6.



Slika 6: Meritev ESS in meritev s produkti popačenja (zgornji vzporedni)

V posebnem primeru uporabe ESS moramo inverzni filter dekonvolucijskega testnega signala  $x(t)^{-1}$  delno spremeniti, da se izognemo nepravilnemu frekvenčnemu filtriranju, pri čemer moramo kompenzirati testni signal ESS, ki v energijskem pogledu nima ravnega frekvenčnega spektra, ampak pada s 3dB na oktavo, v čemer je podoben rožnatemu šumu. Rešitev je preprosta in obsega pozitivno filtriranje za 6dB na oktavo neposredno med računskim določanjem testnega signala dekonvolucijskega inverznega filtra  $x(t)^{-1}$  [8].

Kot v primeru LSS, ESS izhod  $y(t) \otimes x(t)^{-1}$  inverzni filter = IR in različni harmonski nelinearni prispevki IR prehitevajo. IR je prikazan na desni strani in nadaljnji redi harmoničnih popačenj so jasno razločljivi na levi, v čemer je postopek boljši kot LSS, kot kaže slika 7. Nekateri elektroakustični poskusi so segali do 50. harmoničnega produkta in s tem dovolili zelo poglobljeno razumevanje merjenega objekta.



Slika 7: ESS  $x(t)^{-1}$  inverzni filter in IR v časovno-frekvenčnem prostoru

### 3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

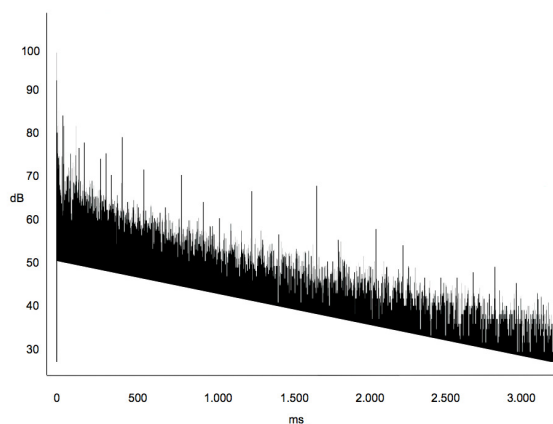
Med meritvami v tržaškem gledališču Politeama Rossetti leta 2009 smo razpolagali z različnimi merilnimi sistemi, da bi analizirali primerljivost njihovih rezultatov.

Računalniško oblikovane signale Diracov impulz  $\delta$  (podpoglavje 2.1), MLS (podpoglavje 2.2) in ESS (podpoglavje 2.4) smo vodili v akustični merilni močnostni ojačevalnik izdelovalca 01dB, povezan Dodecaedron akustično merilnim zvočniškim sistemom istega izdelovalca. Za sprejemnika smo uporabili dva mikrofonska sistema v umetnih glavah Neumann KU100. Kljub načrtovanju merilna oprema TEF LSS-TDS (podpoglavje 2.3) žal za izvedbo meritev ni bila na voljo.

Meritev smo začeli s postopkom, opisanim v podpoglavju 2.1: progresivno močnejši Diracov impulz  $\delta$  smo vodili v ojačevalnik in zvočniški sistem, vendar razen malenkostnega zvišanja temperature močnostnega ojačevalnika zaradi Joulovega efekta iz zvočniškega sistema praktično nismo zaznali merljivega impulza. Skladno s pričakovanji, z izjemo nekaj klikov iz visokotonskih zvočnikov, nismo oblikovali primerne Diracovega impulza  $\delta$ , saj je bila inertnost srednjetonkih in nizkotonskih gibljivih zvočniških komponent prevelika. Spomnimo, da je navadni gibljivi del zvočniškega sistema sestavljen iz membrane, prašne zapore, zvočniške tuljave, sistema vzmetenja (pajek in okolica) in sistema električnih priključkov, skupaj s srednjo in zadnjo zračno maso zvočniške tuljave [9].

V nadaljevanju smo primerjali metodi MLS in ESS z uporabo iste elektroakustične merilne verige v isti dvorani tržaškega gledališča Politeama Rossetti ob istem času. Poskuse smo izvedli v različnih položajih sprejemnika, reprezentativni rezultati v primerjalni analizi pa upoštevajo meritve z istim mikrofonom na istem položaju.

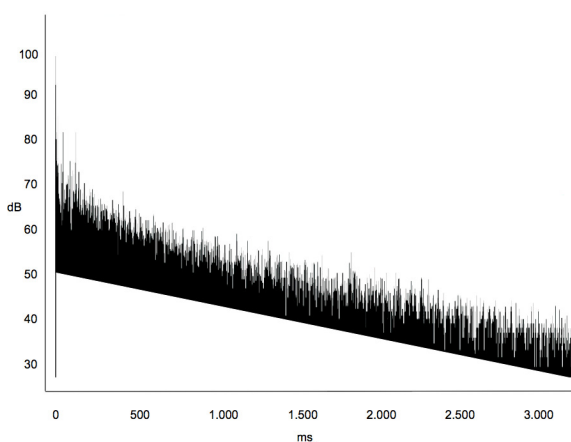
Pričakovano metoda MLS izkazuje občutljivost na akustični šum med meritvami, na nekorektno reprodukcijo nizkih frekvenc iz vsesmerne merilnega zvočniškega sistema, na infrazvok, prepočasno sledenje prehitrega vzpona signala (slew rate) ojačevalnika, na Joulov efekt v elektroakustični verigi, na harmonične in/ali intermodulacijske produkte in na druge dejavnike, kar se odraža v vrhovih na sliki 8.  $RT_{60}$  graf upadanja lahko korektno izračunamo le za 20dB, tj. tako rekoč le za  $RT_{20}$ , in ne moremo z gotovostjo trditi, da smemo v smeri nizkih energetskih nivojev oziroma za preostali del RT (ki je funkcija časa) prostorsko obnašanje preprosto podaljšati.



Slika 8: Meritev MLS s produkti popačenja

Čeprav so še v uporabi, meritve na podlagi signala MLS dajejo nekorektne ali najmanj tvegane rezultate. V teh primerih moramo po navadi povprečiti rezultate večjega števila meritev (z izgubo merilne natančnosti): to je torej eden najpomembnejših razlogov, ki preprečuje nadaljnjo korektno računanje akustičnih parametrov prostora za potrebe merjenja ali restavriranja.

Kot je bilo pričakovati, postopki ESS omogočajo izločitev linearnega systemskega IR brez elektroakustičnih popačenj, kar omogoča kvantifikacijo nelinearnega odziva celotnega sistema in utežitev vsake harmonične stopnje IR. Linearna meritev IR je imela boljše razmerje signal/šum in je bila popolnoma izvzeta iz ne-LTI lastnosti sistema, kot je prikazano na sliki 9 in tudi, ker povprečevanje ni bilo potrebno. Primerjava med slikama 8 in 9 jasno prikaže veliko boljše razmerje signal/šum, rezultat pa je korektno izračunljiv tudi za 60 dB (zdaj tudi pri nizkih energetskih nivojih) in  $RT_{60}$  je zdaj zanesljivo odkrit tudi pri poznem prostorsko akustičnem padcu. Njegov naklon je zdaj očiten in merilne rezultate lahko v primerjavi z metodo MLS štejejo za veliko bolj korektne.



Slika 9: Meritev ESS brez produktov popačenja

## 4 SKLEP IN DISKUSIJA

Ker je percepcija zvoka pri človeku nehomogena [10], je bilo treba razviti nekaj objektivnih akustičnih ocenjevalnih parametrov za opis prostorske akustike, kakršen je npr.  $RT_{60}$ . Za počasen razvoj merilnih postopkov v prostorski akustiki niso krivi le šele nedavno rešeni problemi prevelike računske zahtevnosti, ampak nepopolnosti komponent elektroakustične verige in merilnih postopkov. Pomanjkljivosti komponent elektroakustične verige so povezani z visokimi stroški izdelave in predvsem s fizikalnimi omejitvami. Povsem linearnih močnostnih ojačevalcev ni, kakor tudi ni linearnih zvočnikov na 3D površini propagacije [9]. Operaterji združujejo dve največji težavi, pomanjkanje ustrezne kvalifikacije, meritve pa posledično niso izvedene primerljivo kot posledica ISO 3382 nedoločenosti. Na tem področju uporabne fizike bo potrebnega še veliko dela. Tu predvsem uporaba metode ESS rešuje prej nerešljiv problem razlikovanja med popačenji merilne verige in obnašanjem akustike prostora tudi v ne-LTI situaciji.

Kot kažejo najprej teorija in pozneje eksperimentalni dosežki, je uporaba metode ESS pri meritvah prostorske akustike velik korak proti razumevanju prostorske IR pri specifični poziciji poslušalca in v tem je največja razlika med metodama MLS in ESS. ESS daje specifični algoritem, ki definira enolično razmerje med zvočni virom in zvočni sprejemnikom in s tem korak za korakom razjasnjuje obnašanje akustičnih prostorov.

## ZAHVALE

Avtor se zahvaljuje ing. Gianniju Amadasiju iz 01dB Padova za izposojno 01dB akustičnega merilnega močnostnega ojačevalnika in 01dB Dodecaedron zvočnega sistema, in ing. Stephan-u Peus-u iz Neumann GmbH Berlin za izposojno mikrofonska sistema v umetnih glavah Neumann KU100, s katerimi so bile meritve izvedene.

## LITERATURA

- [1] ISO 3382 standard.
- [2] Sabine Wallace Clement "Collected papers on acoustics", Harvard University Press 1922 (post).
- [3] Cuomo Mario "Analisi qualitativo-comparativa di sistemi di riverbero artificiali", magistrska naloga, Adria 2009.
- [4] Karjalainen Matti "Transfer-function measurements in audio", (Eds.) *Äänenkäsittelyn seminaari 1996: Digitaalidion signaalinkäsittelymenetelmiä* (Seminar on audio signal processing: "Signal processing methods in digital audio"), Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Report 41, Espoo, Finland 1996, str. 181–204.
- [5] Schroeder Manfred Robert "Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation", IEEE Trans. Information Theory, January 1970, str. 85–89.

- [6] Heyser Richard Charles "Acoustical measurements by time delay spectrometry", J. Audio Eng. Soc. 1967, 15 str. 370-82.
- [7] AA. VV. "Acustica musicale ed architettonica", pogl. 19., ed. UTET, Torino 2009.
- [8] Farina Angelo, Capra Andrea, Campanini Simone "La misura della risposta all'impulso per la caratterizzazione di sistemi acustici e vibrazionali", Seminario di Acustica "Strumenti e metodi di misura per l'acustica e le vibrazioni", Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Energetica, Ancona 2008, str. 75–90.
- [9] Policardi Franz "Linearity and reliability in measurements", European Acoustical Association - EAA Euroregion, Ljubljana 2010, Acta Acustica vol 96 str. 96.
- [10] Burnik Urban, Tasič Jurij Franc "Človeško zaznavanje in objektivno vrednotenje zakasnitev multimedijskih storitev", Elektrotehniški vestnik, 2006, 73 (1), str. 7–12.

**Franco Policardi:** Rojen v Trstu leta 1963, kjer je leta 1983 diplomiral. Magistriral je s področja glasbene tehnologije leta 2005 in doktoriral na smeri umetne fizike (industrijsko strojništvo) na Bolonjski univerzi leta 2010. Od leta 1985 do 2002. je bil izvajalec snemanja in ozvočevanja na koncertih vrhunske kakovosti v živo (Wiener Philharmoniker Orkester, Pavarotti and friends ...). Pozneje se je posvetil poglobljenemu študiju svojih sicer zgodnjih interesov v prostorski akustiki. Dr. Franco Policardi je trenutno vpisan na drugi doktorat smer mehansko strojništvo na univerzi v L'Aquili.