

ADAPTÍV AKUSZTIKAI FORRÁSMODELL MIKROFONTÖMB JELFELDOLGOZÁSHOZ

ADAPTIVE ACOUSTIC SOURCEMODEL FOR MICROPHONE ARRAY SIGNAL PROCESSING

Tóth Péter*

ABSTRACT

The phased array microphone measurement is an acoustic source localization technique commonly used in various acoustics laboratories. The Department of Fluid Mechanics of BME is utilizing this technique for fan noise research and development, by implementing a rotating source beamforming methodology. The efficiency of this underlying processing algorithm is an important factor in the everyday application of this acoustics measurement technique. The present paper shortly describes the used processing algorithm, and then introduces an adaptive source model which is a computationally more efficient way of choosing model source points than the techniques, which can be found in the literature. A demonstration is presented with the measurement of acoustic sources of an axial fan.

1. BEVEZETÉS

A mikrofontömbös mérés technika, egy az akusztikai források helyének feltérképezését szolgáló módszer [1]. A gépészeti berendezések akusztikai szempontból való tervezése, fejlesztése céljából fontos a legerősebb zajforrások azonosítása, amely alapján a gép, gépcsoport zaja célirányos áttervezéssel, akusztikai zajcsökkentő elemek beiktatásával csökkenthető. Ez a forrás lokalizációs módszer, bár akusztikai laboratóriumi mérések gyakori eszköze (például [2] mérés), az általános gépészeti diagnosztikában jelenleg még nem terjedt el. A módszerhez nagyszámú, költséges mikrofonra és ezekhez tartozó szinkronizált adatgyűjtő rendszerre van szükség. A sokcsatornás digitális adatgyűjtő rendszerek elterjedése és olcsóbb elektret mikrofonok alkalmazása jelentősen csökkenti a rendszer költségeit [3], így várható, hogy a módszer a mindennapos gépészeti diagnosztikában is elérhetővé válik a közeljövőben.

A mikrofontömbös akusztikai mérés talán legfontosabb eleme a nagymennyiségű adatfeldolgozására használt szoftver, mely sok esetben célszoftver, tehát egy adott speciális mérési esetre, például mozgó források detektálására használható. [4].

A feldolgozó algoritmusok egyéb tulajdonságaik mellett jelentősen különböznek számítási erőforrás igény szempontjából is. [5].

A BME Áramlástan Tanszéke axiális ventilátor zajának kutatásában használja a mikrofontömbös mérési módszert. A mérés során felvett akusztikai jelet egy előre definiált akusztikai forrásmodell alapján dolgozzuk fel, így mind az álló mind pedig a ventilátor járókerékkel együtt forgó elemek zaját vizsgálhatjuk. A feladathoz az Áramlástan Tanszéken jelfeldolgozó programkód került implementálásra irodalmi források alapján [6]. Ennek lényege, hogy a mikrofonokhoz képest egy adott tengely körül forgó modellforrásokat veszünk fel és a mért mikrofonjelek alapján a modellforrás amplitúdókat megállapítjuk. A modellforrások amplitúdója mutatja a valós akusztikai források amplitúdóját. A módszer számítási kapacitásigénye jelentős, függ az elemezni kívánt jel hosszától és a modellforrások számától. Gyakran több napos számítási idő is előfordulhat egy átlagos asztali számítógépen.

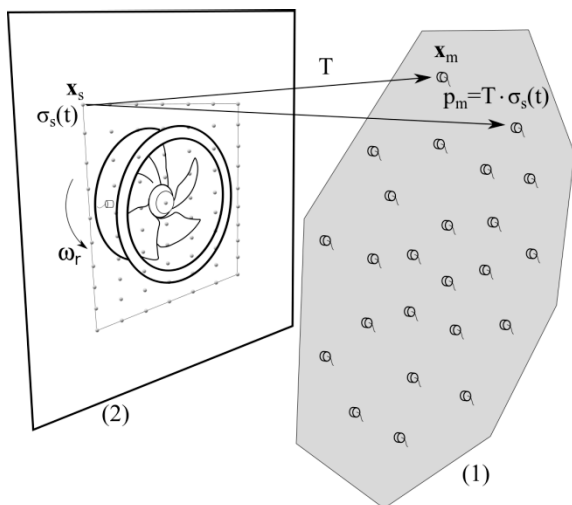
A modellforrások száma jelentősen befolyásolja a számítási időt és ezzel együtt a módszer alkalmazhatóságát. A jelenleg használatos általános módszerek gyakran egyenletes osztású rácson felvett modellpontokat használnak [1]. Ilyen esetben felhasználói közbeavatkozás nem szükséges, csak a keresési zóna méretét kell előre kijelölni. Egyes szerzők azonban javasolják, hogy a pontokat a várható akusztikai forrásképnek megfelelően a felhasználó sűrítse rá a fontosnak ítélt tartományokra [7]. Mások a hálópontok harmonikus függvény szerinti osztását használják, így szögtartományban konstans forrás felbontást kaphatunk [8].

A jelenlegi cikk egy adaptív módszert mutat be a forrásmodell felvételéhez, amely segítségével az algoritmus a keresési tartomány megadása mellett automatikusan, az eredmények függvényében meghatározza egy optimális modellpont elosztást. Ezzel a kiértékelés számítási igénye jelentősen csökkenthető felhasználói közbeavatkozás nélkül. A módszer alkalmazását egy ventilátor mérés eredményeit felhasználva mutatom be.

*tanszéki mérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék
e-mail cím: toth@ara.bme.hu

2. MIKROFONTÖMBÖS MÉRÉSTECHNIKA

Az akusztikai mérési elrendezés vázlatát az 1. ábra mutatja be. Az ábrán látható a mikrofontömb (1), amely egy merevnek tekinthető síklapból és a lapba épített mikrofonokból áll.



1. ábra Ventilátor mikrofontömbös mérési elrendezése

Az ábrán látható a mérési kívánt berendezés, esetünkben ventilátor vázlata (2), illetve a forgórész síkjában felvett forrásmodell, amely egyenletesen elosztott modellforrásokból áll. A mikrofonok pozícióját \mathbf{x}_m , $m=1 \dots M$ a modellforrások pozícióját \mathbf{x}_s , $s=1 \dots N$ vektorokkal definiáljuk. A mikrofonok száma M a modellforrások száma N . A modellforrások erőssége a $\sigma_s(t)$ forrás időjel négyzetes középértéke, amelyet a mikrofonjelek alapján szeretnénk meghatározni. A ventilátor járókerék pozícióját egy index jeladó segítségével követjük, így a modellpontokat a járókerékkel együtt forgatjuk. A modellforrások és a mikrofonok között szabadtéri hangterjedési modellt felhasználva egy adott modellforrás és minden mikrofonjel közötti kapcsolat felírató. Az irodalomban [6] leírt módon a modellforrások pozíciójának időbeni változását figyelembe véve, a források időjele $\sigma_s(t)$ felírható:

$$\sigma_s(t) = \frac{p_m(t_m)}{T_m(t_m, t)} \quad (1)$$

ahol,

$$T_m(t_m, t) = \frac{1}{4\pi c \left(t_m - t - \frac{1}{c^2} Q \right)} \quad (2)$$

$$Q = \mathbf{x}'_s(t) \cdot [\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_s(t)] \quad (3)$$

ahol, c a hangsebesség, $\mathbf{x}'_s(t)$ a modellforrások sebességvektora, a skaláris szorzást pedig pont jelöli. Továbbá t_m az m mikrofon jeléhez tartozó idő:

$$t_m = t + \frac{|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_s(t)|}{c} \quad (4)$$

A gép és a mikrofontömb közötti terjedés számítása során a közeg áramlását nem vesszük figyelembe. A mikrofonok jelét azonos időpillanatokban mintavételezzük, de a térbeli pozíció különbsége miatt ahhoz, hogy $\sigma_s(t)$ értékét minden mikrofonjelből kiszámolva ezek azonos t időpillanatokhoz tartozzanak, a mikrofonjeleket interpolálni szükséges [6]. Ezt lineáris interpoláció segítségével végezzük el, amely a vizsgált frekvenciánál jóval nagyobb mintavételezési frekvenciát alkalmazva nem jelentős torzulást a frekvenciaspektrumban.

Egy adott modell forrás jelének $\sigma_s(t)$ minden mikrofonjelből történő visszaszámítása után a jelek feldolgozását a nyalábformálás módszerével folytatjuk. A módszert frekvenciatartományban végezzük el a mikrofonjelekből számolt forrás időjelek kereszt spektrum mátrixát $C(\omega)$ felhasználva, amelynek elemi:

$$C_{m,n}(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{\sigma}_{s,m}^k \hat{\sigma}_{s,n}^k \quad (5)$$

ahol $m, n = 1 \dots M$, $\hat{\sigma}_{s,m}^k$ az m mikrofonjelből számolt időjel k -adik blokkjának Fourier-transzformáltja az s forrás esetén, K az egymástól független átlagolandó idő blokkok száma. A kereszt spektrumok átlagolása a csatornák közötti nemkoherens zajok csökkentésében segít. Ezt követően a nyalábformálás összefüggése az alábbi formában írható (auto spektrum nélkül).

$$\hat{\sigma}_s(\omega, \mathbf{x}_s) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{n=1}^M \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^M C_{m,n} \quad (6)$$

Eredményül kapjuk a modellforrás komplex amplitúdóját, amelynek modulusa abban az esetben, ha a modell forrás helyén valós akusztikai forrás is található megegyezik a valós forrás amplitúdójával, ha a mérési zajoktól eltekintünk. Az összes modellforrás amplitúdót egy szintvonalas, vagy színárnyalatú térképen ábrázolva kapjuk a forrástérképet.

3. FORRÁSMODELL

3.1. Alapvető követelmények

A modellforrások felvételénél alapvető szempont, hogy elég közel legyenek egymáshoz ahhoz, hogy minden lehetséges, a módszer által megkülönböztethető valós forrást megkapjunk a vizsgált frekvenciákon. A nyalábformálás módszerének elméleti felbontása [7]

$$d \cong 1.25 \frac{\lambda L}{D} \quad (7)$$

ahol d azt a minimális forrástávolságot jelöli, amely még éppen megkülönböztethető a forrástérképen. Az összefüggésben λ a vizsgált hullámhossz, L a modellforrás sík és mikrofontömb távolsága, D a mikrofontömb átmérője. A gyakorlatban, a forrástérkép kellő részletességgel történő kiszámításához maximálisan mindkét irányban $d/6$, $d/7$ távolságra elhelyezett modellforrásokat célszerű használnunk.

A modellforrások felvétele az elemzést végző személy illetve szoftver feladata. Cél, hogy a lehető legkevesebb modellforrást alkalmazzuk, a számítás költségének csökkentése miatt. A gyakorlati alkalmazások esetén a modellforrások összeséhez viszonyítva csak néhány valós forrást tartalmazó mérési eseteket tapasztalunk. Ezért az egyenletes hálópont elosztás számítási kapacitásigény szempontjából nem optimális. Célszerűbb egy, az adott forrásgeometriához illeszkedő modellpont elosztást választani. Ezen elv vezet az adaptív forrásmodell ötletéhez, amely előzetes eredmények figyelembevételével határozza meg a végleges modellforrás elosztást.

3.2. Adaptív forrásmodell

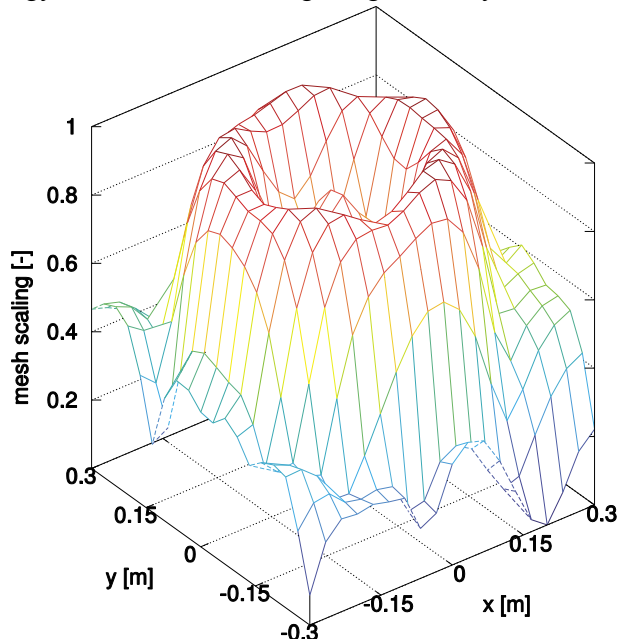
Jelen cikkben egy olyan adaptív forrásmodell alkalmazást mutatok be, amely egy előzetes, minimális pontból álló egyenletes elosztású forrásmodell eredményeit felhasználva a valószínűsíthető valós források közelében automatikusan megnöveli a modellforrások számát, figyelembe véve a szükséges elméleti felbontóképességet. Eredményképpen az egyenletes elosztású rácshoz képest jóval kevesebb modellpont felhasználásával kiszámolható a végleges forrástérkép.

4. ALKALMAZÁS

Az 1. ábra szerint kialakított ventilátormérés példáján mutatom be az adaptív forrásmodell generáló eljárást. A mért ventilátor egy 5 lapátos gép. A hajtó villamos motor a ventilátor agyrészébe van integrálva. A ventilátor egy rövid ($0.4D$) csőből szív, a nyomó

oldalon pedig a szabadba fúj. A mérés során a BME Áramlástan Tanszékének Optinav Array 24 típusú mikrofontömbös mérőrendszerét használtam [9]. A rendszer a 23 db mikrofon illetve az optikai elven működő indexjeladó jelét szinkronizáltan mintavételezi. A mérés során 5 s (116 járókerék fordulat) hosszú időjelt dolgoztam fel, amelyet 44100 Hz mintavételezési frekvenciával rögzítettem. Az eredményeket a 6300 Hz középfrekvenciájú terc sávban mutatom be.

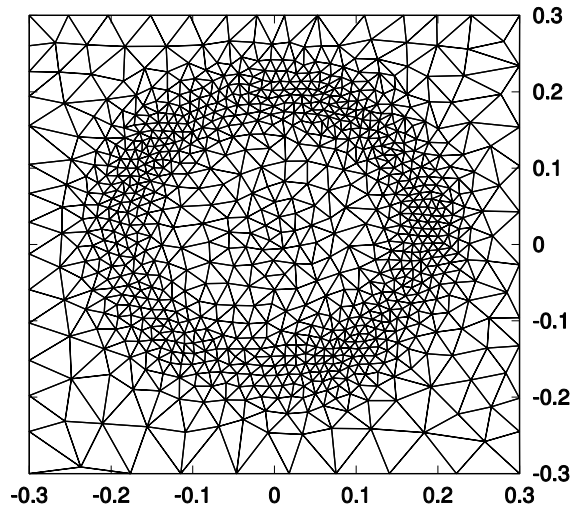
Az adaptív forrásmodell létrehozása egy kezdeti egyenletesen elosztott modellforrásokból álló forrástérkép kiszámításával kezdődik, az elméleti felbontás alapján. Jelen esetben ez $N = 19 \times 19$ kezdeti modellforrást jelent. A forrástérképet mozgóátlag módszerrel simítjuk, majd a felület gradienseinek logaritmusára alapítjuk, a 2. ábrán látható simított felületet használjuk a modellforrások relatív távolságfüggvényeként. A távolságfüggvény nagy értéke azt jelenti, hogy ott a modellforrások sűrűbben, egymástól kisebb távolságra fognak elhelyezkedni.



2. ábra: Az előzetes számítás alapján meghatározott távolságfüggvény az adaptált ponteloszlás készítéséhez.

A felület alapján az 1-hez közeli értékek mutatják, hogy a forrástartomány közepén egy gyűrű alakú forráscsoportot különböztet meg a módszer. Ezen gyűrű közelében a hálófelbontást az elméletileg szükséges érték közelébe fogja beállítani a hálózó algoritmus. Ez a távolságfüggvény a végleges modellforrások számával együtt a bemenő paramétere a triangularizáción alapuló hálózó algoritmusnak, amely leírását a [10] publikációban találhatjuk. Ahhoz, hogy a megkövetelt pontsűrűséget elérjük a forrás helyeken, illetve, hogy az összpontszám az előírt közelében maradjon, iteratív módon többszöri újrahálózással jutunk el a végleges

hálého, amelyet a 3. ábrán láthatunk. A módszer a [10] hálého algoritmusban maximum 28 iterációt használ, illetve a bemenő paraméterek 10 %-on belüli megközelítéséig végzi az újrahálózást



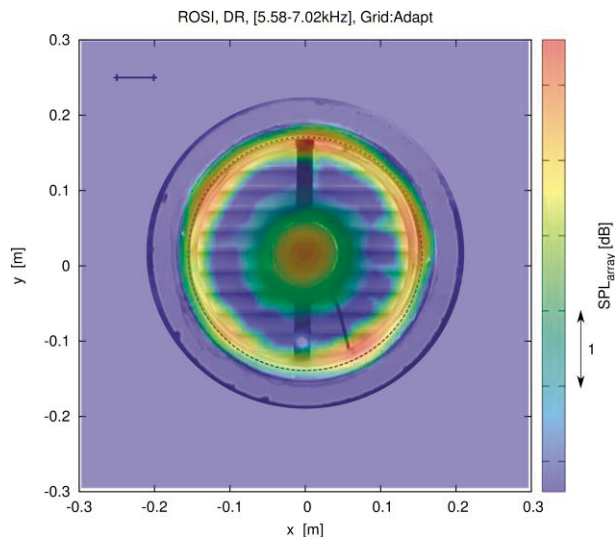
3. ábra: Az adaptív módszerrel készült modellpontok triangularizációja.

A 3. ábrán a triangularizált hálót láthatjuk, melynek csomópontjaiban helyezzük el a végleges nyalábformálás során használt modellforrásokat. Megfigyelhető, a távolságfüggvény szerint kialakított gyűrű alakú jól felbontott tartomány.

Az adaptált modellpontokkal kapott forrástérképet a 4. ábrán láthatjuk. A háttérkép a forgó ventilátorról készült, amelyen a lapátok kontúrja a hosszú expozíciós idő miatt nem látható. Az ábrán 5 dB dinamika tartományt ábrázoltam. Megfigyelhető a gyűrű alakú erős forrás a lapátok külső kerülete mentén. Ezek a gép 5 db lapátja által a lapát résben létrehozott akusztikai források. A forrástérkép közepén található egy gyengébb forrás is, amely felehetően a villamosmotor illetve csapágyazás zaját mutatja. Ez a forráskép megegyezik azzal, amit egyenletes eloszlású modellpontok használata mellett kaphatunk, a forrás amplitúdók minimális különbségétől eltekintve (maximális amplitúdó esetében az eltérés <math><0.1\text{ dB}</math>).

Az 1. táblázatban látható az egyenletes modellpont elosztást használó algoritmus és az adaptív algoritmus összehasonlítása számítási erőforrásigény szempontjából egy Intel i7-2600K@4200MHz számítógépen. Látható, hogy az adaptív módszerrel körülbelül 5.6-szer gyorsabban tudjuk kiszámítani a forrástérképet. Az adaptív módszer 6.5-ször kevesebb modellpontot használ a végleges háló esetén, azonban az adaptív algoritmus esetén figyelembe kell venni az előzetes forrástérkép kiszámításának költségét (361 modellpont), illetve az újrahálózás költségét. Ezért a számítás sebességnövekedése nem lineáris módon

skalázódik a modellpontok számával. Sok modellpont esetén az újrahálózás költsége jelentős is lehet, amely a hálého algoritmus nem optimális implementációjára is utal [10]. Megjegyzem, hogy hasonlóan jó eredményt lehet elérni az adaptív módszerrel kevesebb összpontszámhasználatával is, így a számítás költségei tovább csökkenthetőek.



4. ábra: Nyalábformálás eredménye 5 lapátos ventilátor mérési adatsorán az adaptív módszerrel készült modellpontok alapján. A háttérkép nagy expozíciós ideje miatt a forgó lapátok kontúrja nem látható a képen. A bal felső sarokban illusztrált távolság a módszer elméleti felbontását jelenti.

1. táblázat: Számítási idők

	N	gépidő sebesség	
	[db]	[perc]	növekedés
			[-]
egyenletes	5929	163	1
adaptív	906	29	~5.6

A felhasználó számára irányelv, hogy a modellforrás pontok ne csoportosuljanak kizárólag a feltételezett források köré, tehát a legkisebb és legnagyobb ponttávolság aránya ne legyen nagyobb, mint 30. (Ettől esetenként el lehet térni, például jóval lokalizáltabb forráspontok használhatóak, ha a felhasználó tudja, hogy hány forrásra számíthat a forrástérképen.) Megjegyzem, hogy az adaptív módszer sebesség növekedése magasabb frekvenciákon jelentősebb, mivel az egyenletes forráselosztás a tartomány egészére vonatkozó sűrítést eredményez, amely az irányonkénti pontszám négyzetével növeli a költségeket, míg az adaptív módszer esetén az összpontszámot csak jóval kisebb mértékben szükséges növelni. Növekvő frekvenciával a nyalábformálás felbontása növekszik, így egy adott forráshoz szükséges modellpontszám jó

közéltéssel nem változik. Ezért ha a források száma nem nő jelentősen a frekvenciával a pontszámot sem szükséges növelni. Azonban meg kell jegyezni, hogy nagyobb frekvenciák felé haladva általában egyre több forrást detektálunk, ezért a modellforrások számának kismértékű növelése szükséges lehet.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a munkában áttekintettem a BME Áramlástan Tanszékén implementált forgógépekhez használható akusztikai nyalábformáló algoritmust [6], amelyet a tanszék ventilátor zaj vizsgálatok során használt. Az algoritmus továbbfejlesztéseként bemutattam egy az általános mikrofontömbös akusztikai mérés technikához is használható, automatikus modellforrás eloszlást készítő algoritmust. A módszer egy előzetes, kevés számú modellforrást tartalmazó forrástérképet és a nyalábformálás kritériumait felhasználva adaptív módon létrehoz egy modellforrás eloszlást, amely az egyenes eloszlású modellforrásokhoz képest jóval kevesebb pontot tartalmaz. Így a nyalábformálás számítási igénye jelentősen csökkenthető, az eredmények romlása nélkül. A bemutatott esettanulmányon a módszer 5.6 szoros gyorsulást eredményezett az eredeti egyenes modellpont eloszláshoz képest. A módszer használata során nemszükséges felhasználói közbeavatkozás, csak a végleges forráspont számot szükséges megadni, amely egyben a számítási kapacitásigényt is meghatározza.

6. SUMMARY

In this paper the rotating source beamforming method [6] is overviewed, which is implemented for investigating fan noise at the Department of Fluid Mechanics of BME. An extension of the method, which can be used for general purpose beamforming is presented, where the model sources are chosen by an automatic adaptive methodology. The applied method chooses the final model points by considering the results of a preliminary calculation on a coarse source model and the theoretical criteria of the beamforming method. In this way the required number of model sources is significantly reduced, as compared to the uniformly distributed source model, without the degradation of the results. In the presented fan noise case study, the speedup for the adaptive method is 5.6. The method requires only the specification of the number of the final model points, which also indicates the required computational resources.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk elkészítését az OTKA K83807 projektje támogatta.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatja.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.1/B-09/11/KMR-2010-0002 programja támogatja.

8. IRODALOM

- [1] THOMAS J. MUELLER, CHRISTOPHER S. ALLEN, WILLIAM K. BLAKE, ROBERT P. DOUGHERTY, DENIS LYNCH, PAUL T. SODERMAN, JAMES R. UNDERBRINK.: *Aeroacoustic Measurements*. Springer, 1 edition, 2002
- [2] PODBOY G., HORVÁTH CS.: Phased array noise source localization measurements made on a Williams International FJ44 engine, *15th Aeroacoustics Conference*; 2009
- [3] TÓTH P.: *Beamforming development for open jet wind tunnel configuration*, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2010
- [4] SIJTSMA P.: Circular harmonics beamforming with multiple rings of microphones, *18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2012
- [5] DOUGHERTY ROBERT P.: Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming, *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2005
- [6] SIJTSMA P., OERLEMANS S., HOLTHUSEN H.: Location of rotating sources by phased array measurements, *7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2001
- [7] KOOP L.: *Experimental Aeroacoustic* von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2006
- [8] DOUGHERTY ROBERT P.: Improved generalized inverse beamforming for jet noise. *International Journal of Aeroacoustics*, Vol. 11, No. 3-4, (2012), doi:10.1260/1475-472X.11.3-4.259
- [9] BENEDEK T.: Mikrofontömbös akusztikai mérési módszerek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén, *XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó OGÉT*, 2012
- [10] PERSSON P.-O., STRANG G.: A Simple Mesh Generator in MATLAB. *SIAM Review*, Vol. 46, No. 2, (2004), pp. 329-345