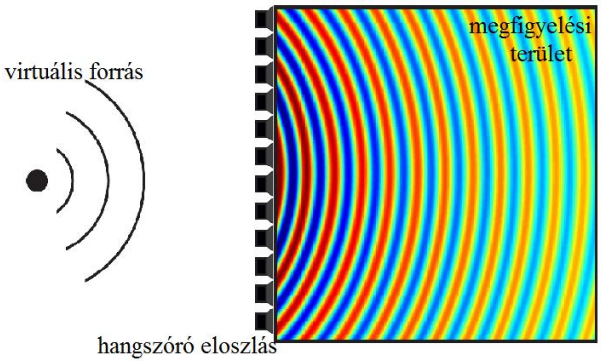
Firtha Gergely

Kutatási eredmények a hangtér-reprodukció általános elméletében és alkalmazásuk mozgó forrásokra[1]

Huszty Dénes Emlékdíj 2016. évi pályázati pályamű

A hangtér-reprodukció célja egy virtuális hangforrás által keltett tér fizikai jellemzőinek visszaállítása kiterjedt megfigyelési területen, egy a hallgató fejmagasságában elhelyezett hangszórósokaság alkalmazásával. Az így előállított „akusztikus hologram" megfigyelési pozíciótól függetlenül biztosít tökéletes térérzetet, túlmutatva a sokcsatornás Dolby hangrendszereken, amelyek egyetlen megfigyelési pontban, az ún. „*sweet spot*ban" képesek a térhatás biztosítására. A különböző hangtér-reprodukciós technikák jelenleg is folyamatos kutatás-fejlesztés alatt állnak. Elméleti alapjairól és a megvalósítási lehetőségekről számtalan publikáció jelent meg az elmúlt 20 év során. Jelenleg a legaktívabb kutatócsoport a rostocki egyetemen működik, amely csoporttal magam is közvetlen munkakapcsolatot ápolok, több közös publikációnk van elbírálás alatt, illetve folyóiratba való beküldés előtt.



1. ábra Virtuális forrás terének szintézise egyenes vonal mentén elhelyezkedő hangszóró-sokaság segítségével

Az „akusztikus hologram" létrehozására számos megközelítés létezik. A technikák közös célja egy inverz integrálprobléma megoldása, melynek eredményeként előállítható az alkalmazott hangszórósokaság vezérlő jele úgy, hogy az eredő kialakuló hullámtér egy kiterjedt megfigyelési területen egyezik a „hologram" vagy virtuális forrás által keltett hullámfronttal.

A legismertebb, legkorábbi technika az ún. ***Wave Field Synthesis (WFS)***, amely mára több kereskedelmi forgalomban is kapható sokcsatornás hangrendszer alapját képezi. A módszer ún. ***implicit*** megoldást ad a problémára a Huygens-elv alapján. A WFS mellett lehetőség van az alapvető hangtér-reprodukciós probléma direkt, ***explicit*** megoldására, amely azonban az eredményt a spektrális (hullámszám) tartományban szolgáltatja, így közvetlen gyakorlatba ültetése nehézkes. Ennek ellenére az explicit módszer referenciamegoldásként szolgál a több nagyfrekvenciás közelítést is alkalmazó implicit megközelítéshez. Az implicit és explicit módszerek közötti kapcsolatot számos speciális

[1] A jelen dokumentum, illetve a mellékelt publikációk, szakmai tevékenységet elismerő dokumentumok elektronikus, színes formában a http://last.hit.bme.hu/download/firtha/Huszty_emlekdij_2016/ webcímen érhetőek el.

esetre vizsgálták korábban (pl. pontszerű forrás holográfiája), azonban eddig az általános kapcsolat közöttük ismeretlen volt.

Az implicit és explicit megoldások statikus hangképekre – a hologram/virtuális forrás nem mozdul el, egy helyben áll – jól kidolgozott. Alkalmazás szempontjából azonban a mozgó virtuális hangforrások által keltett hullámok megfelelő visszaállítása nagy gyakorlati jelentőséggel bír. A probléma megoldása nem egyértelmű, a Doppler-hatás elhanyagolása a reprodukált hangtér minőségének jelentős romlásához vezet.

Ezek alapján a munkám és jelentősebb publikációim a következő témakörökre terjedtek ki (a bemutatott eredmények nem időrendi, hanem logikai sorrendben kerülnek ismertetésre, így a már megjelent publikációimat a második témakörben mutatom be):

Az egységesített hangtér-reprodukciós elmélet kidolgozása:

Ugyan a Wave Field Synthesis technikák közösen a Huygens-elv gyakorlatba ültetésén alapulnak, azonban ennek a megvalósítására is több hozzáállás létezik. Ezek főként a reprodukálható hangterek jellegében (pontszerű forrás, síkhullámok, stb.) valamint az optimális megfigyelési terület alakjában különböznek. A különböző WFS technikák közötti pontos kapcsolat azonban – csakúgy, mint az implicit és explicit technikák közti kapcsolat – korábban ismeretlen volt.

Munkám során néhány a megértéshez szükséges koncepció bevezetésével egy egységesített Wave Field Synthesis frameworköt hoztam létre, amely speciális esetként tartalmazza a korábban már ismert WFS technikákat, de lehetővé teszi általános esetként tetszőleges hangtér analitikusan helyes reprodukcióját tetszőlegesen választott megfigyelési területen.

Az ebből készült folyóiratcikk jelenleg elbírálás alatt áll az IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing folyóiratnál:

[1] G. Firtha, P. Fiala, F. Schultz and S. Spors, "*Improved Referencing Schemes for 2.5D Wave Field Synthsis Driving Functions*," under peer-review, IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process.

A cikk pozitív bírálata alapján megfelelő átdolgozás után várhatóan 2017-ben fog megjelenni.

A már bevezetett koncepciók lehetővé tették az explicit hangtér-reprodukciós technikák idő-tértartománybeli közelítését a spektrális tartomány helyett. Ennek segítségével egyrészt eddig nem ismert, új hangszóró vezérlőfüggvényeket származtattam: a korábbi módszerek esetében a megfelelő hangszóró vezérlőfüggvények számításához a visszaállítandó teret a hangszórók pozíciójában kellett ismerni Ezzel ellentétben az új, általam kifejlesztett módszer alkalmazásához a visszaállítandó teret, azaz a hologramot elegendő a meghallgatási pozíciókban ismerni, a hangszóró vezérlőfüggvények ez alapján már számíthatóak.

Másrészt bemutattam, hogy az így kapott explicit vezérlőfüggvények a korábban bemutatott egységesített WFS vezérlőfüggvényekkel ekvivalensek, így rámutattam az általános kapcsolatra az implicit és explicit megoldások között.

A kutatási eredményeket bemutató cikk beadás előtt áll, hiszen a jelenleg elbírálás alatt álló munka közvetlen folytatásának tekinthető. A cikk, csak úgy, mint a korábban beadott IEEE cikk a rostocki kutatócsoport együttműködésével készült:

[2] G. Firtha, P. Fiala, F. Schultz and S. Spors, "*The General Relation of Wave Field Synthesis and the Spectral Division Method*," before submission, IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process.

Az új módszerek, valamint az egységesített elmélet – amellett, hogy az eddig használt technikák mellett új, az alkalmazás céljának megfelelően optimalizált hangszóró-vezérlőfüggvények egyszerű számítását teszi lehetővé – egyértelművé teszi a több mint 20 éve párhuzamosan fejlődő módszerek közötti összefüggéseket, egységes keretbe foglalva és kategorizálva a meglévő technikákat. A keretrendszer jelentőségét mutatja, hogy ugyan az elméleti eredmények kidolgozása egyéni munka eredménye, végül az ezek eredményeként született publikációk az eredeti WFS elméletet kidolgozó német kutatócsoporttal együttműködésben születtek.

Mozgó virtuális források reprodukciója:

Statikus hangterek szintézise mellett gyakori feladat – főként mozis alkalmazásokban – mozgó, dinamikus hangterek létrehozása. Ezekben az esetekben – mint korábbi kutatások kimutatták – a forrás dinamikus leírása, így a Doppler-hatás figyelembe vétele nélkülözhetetlen a megfelelő eredmény érdekében. Az elmúlt néhány évig azonban csak kezdeti kísérletek történtek mozgó források által keltett hangterek reprodukciójára.

Munkám során először explicit megoldást származtattam egyenletesen mozgó pontforrások terének szintézisére:

[3] G. Firtha and P. Fiala, "*Sound Field Synthesis of Uniformly Moving Virtual Sources*," J. Aud. Eng. Soc, vol. 63, no. 1/2, pp. 46-53, 2015.

Az így származtatott vezérlőfüggvények általános esetben csak a hullámszám-tartományban állnak rendelkezésre, azonban hasonlóan statikus hologramok esetén referenciamegoldásként szolgáltak a későbbiekben. Emellett a publikáció jelentősége, hogy az általános explicit megoldást kiterjesztettem mozgó hangterekre is.

Az explicit megoldás után a klasszikus WFS elméletet alkalmaztam a mozgó források dinamikus leírására, így implicit megoldás kapva egyenletesen mozgó pontforrások szintézisére

[4] G. Firtha and P. Fiala, "*Wave Field Synthesis of Moving Sources with Retarded Stationary Phase Approximation*," J. Aud. Eng. Soc, vol. 63, no. 12, pp. 958-965, 2015.

Az itt kapott eredmények az elméleti fejlesztéseken túl már közvetlenül gyakorlatba ültethetőek. Ezt jelzi, hogy az általam kifejlesztett módszer a tervek szerint a német fejlesztésű nyílt forráskódú real-time hangtér-reprodukciós renderer szoftverkörnyezetbe (http://spatialaudio.net/ssr/), valamint a nemzetközi fejlesztésű MATLAB és Python platformú fejlesztő környezetbe (http://spatialaudio.net/tag/sfs-toolbox/) is implementálásra fog kerülni.

Végül az egységes WFS keretrendszer kidolgozása után kiterjesztettem azt mozgó hangforrások reprodukciójára is. Így a lehető legáltalánosabb megoldást adtam a dinamikus hangterek szintézisére: az általam kidolgozott megoldás tetszőleges alakú hangszórósokaság segítségével képes tetszőleges megfigyelési területen visszaállítani (holografálni) egy tetszőleges alakú pályán tetszőleges sebességprofillal mozgó hangforrás terét.

[5] G. Firtha and P. Fiala, "*Wave Field Synthesis of Moving Sources with arbitrary trajectory and velocity profile*," J. Acoust. Soc of Am. before submission

Az eredményekből készült 2016 nyarán készült folyóiratcikk természetesen még beadás előtt áll, hiszen elméleti alapjait a korábbi megjelent cikkeim mellett a jelenleg elbírálás alapján álló [1] cikkem képzi.

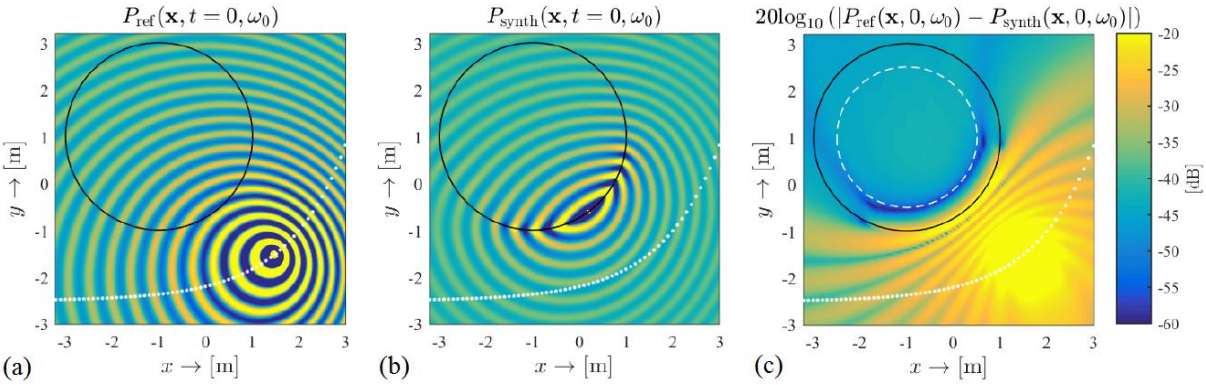
A folyóiratcikkek mellett a mozgó források reprodukciójával kapcsolatos munkám az alábbi konferenciaközleményekben kerültek bemutatásra:

[6] G. Firtha and P. Fiala, "*Synthesis of a moving virtual sound source applying the spectral division method*," DAGA2014, Oldenburg, Németország. pp. 1-2, 2014.

[7] G. Firtha and P. Fiala, "*Sound field synthesis of a moving virtual source applying the Spectral Division Method*," ISMA2014, Leuven, Belgium. pp. 4217-4231, 2014.

[8] G. Firtha and P. Fiala, "*Synthesis of moving virtual sources with Wave Field Synthesis*," DAGA2015, Nürnberg, Németország. pp. 1-2, 2015.

[9] G. Firtha and P. Fiala, "*Investigation of Spatial Aliasing Artifacts of Wave Field Synthesis for the Reproduction of Moving Virtual Point Sources*," DAGA2016, Aachen, Németország. pp. 1-2, 2016.



2. ábra Példa mozgó forrás szintézisére

Az eddig leírt eredmények alkalmazására a 2. ábrán látható egy jellegzetes, összefoglaló példa. Jelen esetben egy ferde vonalon mozgó folyamatosan gyorsuló virtuális forrás reprodukciója a célunk. A forrás gerjesztése állandó frekvenciájú 10 kHz-es harmonikus gerjesztés. A forrás útvonala fehér szaggatott vonallal van jelölve. Az eredeti, reprodukálandó tér a 2. (a) ábrán látható. A reprodukcióhoz egy körvonal mentén elhelyezett hangszóró sokaságot alkalmazunk, amelyet az ábrákon folytonos fekete vonallal jelöltünk. A reprodukció eredményéről egy pillanatkép a 2. (b) ábrán látható, jól mutatva, hogy a hangszórósokaság által határolt térrészben a mozgó forrás tere jellegre helyesen (fázishelyesen) visszaállítható. Ezen felül a ténylegesen pontos reprodukció egy görbe mentén biztosítható, amely görbét az általam létrehozott keretrendszer segítségével egyszerűen meghatározhatjuk, módosíthatjuk. Jelen példában ezt a referenciagörbét a hangszóró sokaságon belül található koncentrikus körnek választottuk, amelyet 2. (c) ábrán szaggatott fehér vonallal jelöltünk. Ugyanez az ábra az ideális és a reprodukált tér közti különbséget mutatja. Jól látható, hogy a hibaminimum valóban a referenciagörbére esik.

Összességében az elmúlt évek során egy általános keretrendszert alkottam a hangtér-reprodukciós technikákhoz, ami magában foglalja az összes eddigi implicit és explicit módszert, egyértelművé téve a köztük lévő kapcsolatot, de ezeken túlmutatva lehetővé teszi új vezérlőfüggvények egyszerű számítását alkalmazástól függően (hangszóróeloszlás geometria, megfigyelési terület geometria, stb.) optimalizálva. A keretrendszert kiterjesztettem statikus hologramokról mozgó hangforrások reprodukciójára is mind implicit, mind explicit módszerek alkalmazása mellett. Míg a keretrendszer létrehozása inkább jelentős elméleti eredmény – annak ellenére, hogy közvetlen alkalmazási lehetőségeket is rejt magában – a mozgó források pontos szintézisének lehetővé tétele javarészt gyakorlati jelentőségű.

Korábbi munkáim:

Az eddig bemutatott eredmények mellett korábbi kutatásom kiterjedt irányított virtuális források reprodukciójára, valamint sztochasztikus hangszóróeloszlások alkalmazásának hatásának vizsgálatára. Előbbi munkámban módszereket adtam a virtuális hangforrás iránykarakterisztikájának analitikus kezelésére mind az explicit, mind implicit hangtér-reprodukciós megoldások esetére. Utóbbi témakörben a hangtér-reprodukcióra alkalmazott hangszórók gyártási paramétereinek szórásának hatását vizsgáltam, amelyek zavaró hatással lehetnek a megfigyelési területen előállított hologramra, tekintve, hogy a klasszikus hangtér-reprodukció elmélet teljesen azonos hangszórókból álló hangszórósokaság alkalmazását feltételezi.

Ezek az eredmények a következő – több külső, külföldi hivatkozással bíró – konferencia-közleményekben jelentek meg:

[10] G. Firtha and P. Fiala, "*Prefiltering the wave field synthesis operators – anti-aliasing and source directivity*," ISMA2012, Leuven, Belgium. pp. 3121-3135, 2012.

[11] G. Firtha and P. Fiala, "*Sound Field Reproduction Applying Stochastic Secondary Sources*," AIA-DAGA2013, Merano, Olaszország. pp. 412-415, 2013.

[12] G. Firtha and P. Fiala, "*Sound field reproduction with stochastic secondary sources*," Internoise 2013, Innsbruck, Ausztria. pp. 1-10, 2013.

A hangtér-reprodukcióval kapcsolatos kutatásaimat 2011-ben MSc tanulmányaim megkezdésével kezdtem. Korábban BSc szakdolgozatomat egy automatikus hangmagasság-korrekciós rendszer létrehozásából írtam, amely szoftver egy bemeneti énekhangot képes analizálni, megtalálni a hanghoz legközelebb eső zenei hanghoz tartozó alapfrekvenciát, és frekvenciatartománybeli algoritmusok segítségével a hangot a tényleges zenei hanghoz igazítani. A témából két magyar nyelvű folyóiratcikkem született:

[13] G. Firtha, "*Automatikus hangmagasság-korrekciós rendszer létrehozása frekvenciatartományban*," Akusztikai Szemle, X: (3-4). pp. 56-61 (2010),

[14] G. Firtha,"*Automatikus hangmagasság-korrekciós rendszer létrehozása*," Híradástechnika, 66: (2). pp. 33-38 (2011)

Díjaim, elismeréseim:

- HTE 2009/2010. évi Szakdolgozat Pályázat I. helyezett
  (Hangmagasság korrekciós rendszer létrehozása MATLAB környezetben c. dolgozat)
- MATE 2009. évi Diplomaterv Pályázat III. helyezett (szakdolgozat kategória)
  (Hangmagasság korrekciós rendszer létrehozása MATLAB környezetben c. dolgozat)
- HTE 2011/2012. évi Diplomaterv Pályázat I. helyezett
  (Wavefield szintézis c. dolgozat)
- BME VIK 2011. évi Tudományos Diákköri Konferencia I. helyezett
  (Hangtér Szintézis Zárt Térben Aktív Reflexió Kompenzációval c. dolgozat)
- XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia III. helyezett
  (Hangtér Szintézis Zárt Térben Aktív Reflexió Kompenzációval c. dolgozat)