ORGONASÍPOK HANGJÁNAK JELMODELL ALAPÚ SZINTÉZISE

Márkus János
egyetemi hallgató
BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamosmérnöki Szak

A munka a BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszékén készült, konzulense: dr. Sujbert László posztdoktor.

Összefoglalás

A jó minőségű hangszerek gazdaságosabb előállítása, hangjuk élethű szintézise már régóta foglalkoztatja a zenészeket és az akusztikával foglalkozó tudományágak képviselőit. A hangszerek közül — építési és fenntartási költségeit tekintve — jelentősen kiemelkedik a templomi orgona. A cikk orgonasípok hangjának vizsgálatával és előállításával foglalkozik. A bevezetés és problémafeltárás után definiálja a digitális technika segítségével a periodikus jel modelljét, és ennek alapján bemutat egy — részleteiben már eddig is ismert — új hangszintézist. A továbbiakban a hangszintézis leglényegesebb részével, a hallás szempontjából fontos hangparaméterek és a jelmodell lehetséges változói közti transzformációk megtalálásával foglalkozik. A cikk befejezésül a MatLab-környezetben illetve Motorola DSP-n megvalósult szintézis eddigi eredményeit ismerteti.

Kulcsszavak

digitális jelfeldolgozás, hangszintézis, orgonasíp, periodikus jelmodell, valós-idejű számításigény

1. Bevezetés

Zenei hangok elektronikus szintézisével intenzíven — az aktív elektronika fejlődésével párhuzamosan — a ‘20-as, ‘30-as évektől kezdve foglalkoznak. A különféle szintéziseknek kétféle célja van. Az egyik az új zenei hangok, hangzások kifejlesztése, a másik pedig az akusztikus hangszerek hangjának mesterséges előállítása. Ezen szintézisek általános irányelveiről a magyar irodalomban is található néhány jó összefoglalás [1], [2].

Számos kísérlet történt a klasszikus orgona hangjának szintézisére is (tekintettel az igazi orgona előállítási költségére). A modellezendő hangszer hanggenerátorai a sípok, amelyek hangját sok tényező együttes hatása alakítja ki. Ilyen jellemző például a hanggenerálás módja, amely ékhang-gerjesztés (ajaksípok), vagy rezgő nyelv (nyelvsípok) lehet, a sípok felépítése (kónikus, cilindrikus, nyitott, zárt), illetve az anyagjellemzők (fa, orgonafém). A különféle — egy-egy paraméterrendszerrel megadható — karakteres hangú sípcsoportok a regiszterek, amelyekről részletesebb leírás a szakirodalomban olvasható [3], [4]. Vannak ugyan olyan szintézisek, amelyek a teljes orgonahangot próbálják reprodukálni, a tapasztalat szerint azonban a regiszterenkénti szintézis jobb eredményt ad.

Az első kísérlet a hangszer kiváltására elektromechanikus (szinuszos) oszcillátorokkal és elektroncsöves erősítőkkel állított elő orgonaszerű hangzást (Hammond orgona). Később analóg elektronikával kísérleteztek (oszcillátorok, szűrők, erősítők). A ‘70-es évektől kezdve létrejöttek olyan új, digitális eljárások, amelyek közül néhány az analóg szintézisekhez képest meggyőzőbben állítja elő az akusztikus hangszerek hangját. Az egyik ilyen eljárás a

mintavételezés (Sampling, PCM), amely során a modellezendő hangszer hangját — egy adott frekvencián — felveszik, tömörítve tárolják, majd a szükséges frekvenciákon (különböző hangmagasságokon) visszajátsszák. Ez a szintézis jelenleg szinte egyeduralkodó a modellpiacon, bár több hátránya is van. Az egyik probléma a tárolási megoldásból ered, miszerint a kitartott szakasznak csak egyetlen periódusát tárolják, és lejátszáskor azt ismételgetik. Ezáltal a hang gépiesnek, unalmasnak tűnik. A másik probléma az alapfrekvencia-változtatás, amelynek során a hangszer frekvenciafüggetlen formánsai is megváltoznak, szélsőséges esetben a modellezendő hangszer nem ismerhető fel. Harmadik hátrányaként említhető a determináltság.

Van tehát létjogosultsága olyan szintézisnek, amely jó minőségű hangokat generál, paraméter-állítási lehetőségei nagyobb szabadságot biztosítanak, ugyanakkor gazdaságosan megvalósítható. A következőkben bevezetésre kerülő, jelmodellre épülő hangszintézis alapötlete nem új, azonban paraméterezése — amely figyelembe veszi a hallás tulajdonságait — , valamint valós-idejű (digitális) implementációja érdekes problémákat és megoldásokat rejt magában.

A feladat megoldásához, az összehasonlíthatóság érdekében, illetve az egyes regiszterek hangkarakterének feltárásához több orgonán is készültek mérések, elsősorban *Bourdon* regiszteren, amely fából készült, fedett ajaksípsor. A felvételek mikrofon, analóg erősítő és PC-be illesztett digitalizáló hangkártya segítségével történtek. Az akusztikus jel $f_s = 44.1\ kHz$ mintavételi frekvenciával, 16 bites pontossággal került mintavételezésre, és tárolásra a további feldolgozás érdekében.

Már a mérés során is felmerültek olyan korlátok, amelyek az analízis — és ezáltal közvetve a ráépülő szintézis — pontosságát befolyásolják. Mivel a felvételek nem süketszobában készültek, hanem eredeti helyszíneken (templomokban), ezért a mikrofonjelbe a síp hangján kívül a terem által okozott visszaverődések, illetve a környezeti zaj is belekerült. Ezek a hatások irányított mikrofonnal, szelektív méréssel minimalizálhatók, de figyelembe kell őket venni.

Az orgonasípokról, a szintézisükre létrejött eddigi eljárásokról és minősítésükről, valamint az imént említett mérésekről a cikkhez hasonló témájú TDK-dolgozatban több részlet is megtalálható [5].

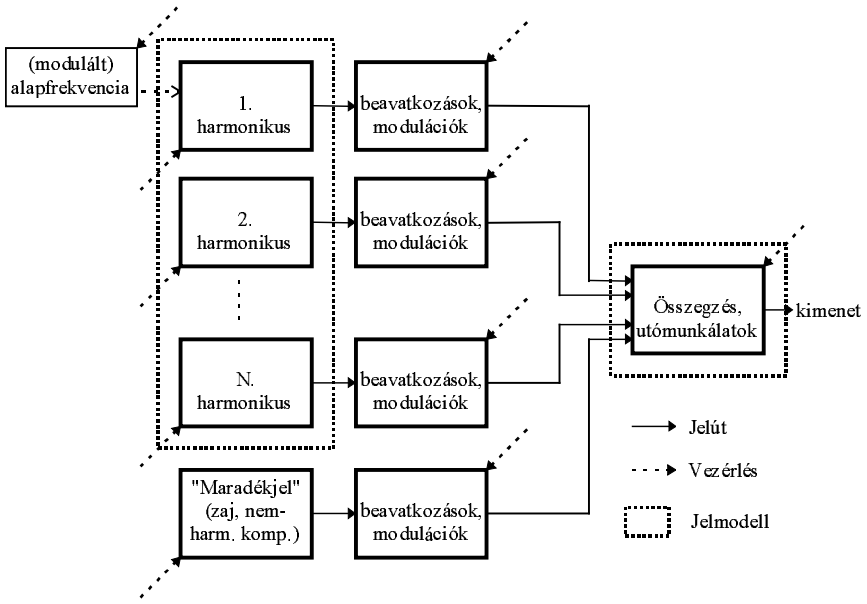
A következőkben először bevezetésre kerül a jelmodell, majd annak hangszintézisre alkalmas változata. Ezután kerülnek ismertetésre az élethű hangszintézis pszicho-akusztikai paraméterei, ezek analízise, valamint jelmodell-alapú szintézise. A cikk végén az eddig elért eredmények, a megvalósítás és továbbfejlesztés lehetőségei kerülnek ismertetésre.

2. A periodikus jel modellje

Jól ismert, hogy minden periodikus jel egyértelműen megadható komplex Fourier-sorával. A periodikus jel modellje tehát — mintavételes rendszerben gondolkozva — nem más, mint egy olyan jelgenerátor, amely (a mintavételi tételt betartva) sávkorlátozott jelet állít elő, N darab komplex (forgó) vektor összegeként. Ez időinvariánsan N diszkrét idejű rezonátor kimenetének összegeként valósítható meg, ahol a bemeneti komplex egységimpulzus gerjesztés határozza meg az egyes harmonikusok amplitúdó- és fázisviszonyát. Ez a leírás bizonyos műszaki alkalmazásoknál már bizonyította hatékonyságát [6]. A periodikus jelek ilyen leírásának legnagyobb előnye, hogy ily módon tetszőleges jelgenerátor beilleszthető a jelfeldolgozó rendszerek által használt diszkrét idejű rendszertechnikába.

A jelmodell alapkoncepciója akkor eredményez jó minőségű hangszintézist, ha a — későbbiekben részletesen ismertetésre kerülő — pszicho-akusztikai szempontból fontos hangparaméterek, valamint a jelmodell vezérléséhez felhasználható paraméterek között

közvetlen transzformációt található. Ehhez a jelmodellt megfelelő mennyiségű vezérelhető jellemzővel kell kiegészíteni (1. ábra).



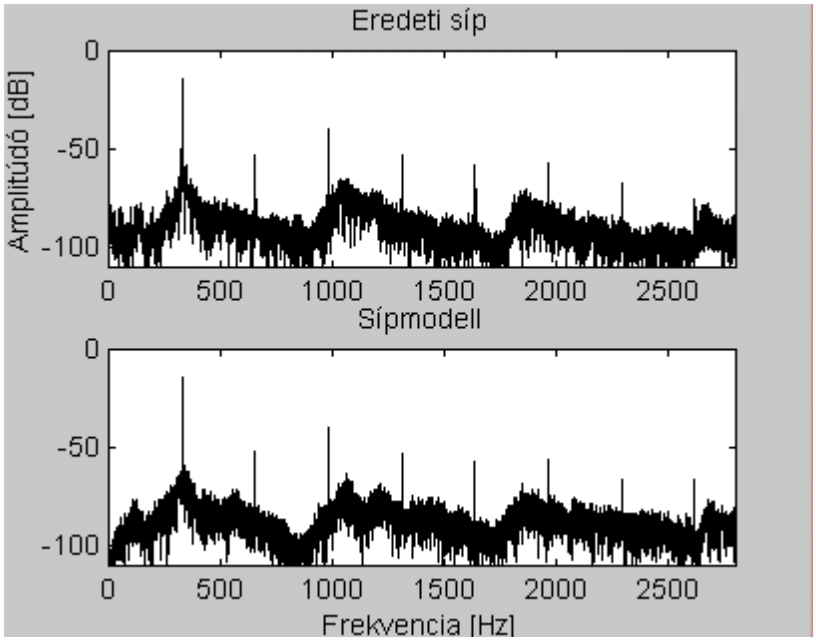
1. ábra A jelmodell felhasználása hangszermodellezésre

3. A hangszer-jellemzők és a jelmodell-paraméterek kapcsolata

A modellezési koncepció felállítása után a hangszintézis következő lépése a vezérlési paraméterek számszerűsítése. Ehhez meg kell határozni azokat a hangjellemzőket, amelyek döntőek egy hangszer felismerhetősége szempontjából. Az irodalomban már régóta foglalkoznak ilyen irányú (érzeti) vizsgálatokkal [7], [8], ezek alapján a legfontosabb megvalósítandó jellemzők az állandósult spektrum, a tranziens (berezgési, lecsengési) folyamatok, a különféle véletlenjelenségek (kvázi-stacionárius állapot), és a külső hatások (pl. terem utózengése).

3.1. Állandósult spektrum

A pszicho-akusztikai jellemzők közül az állandósult spektrum megvalósítása nem okoz problémát, hiszen a periodikus jelmodell bemeneti paraméterei között szerepel az amplitúdó, relatív fázis és a frekvencia, amely jellemzőkkel egyértelműen leírható egy-egy vonalas komponens. Az is igaz, hogy az ajaksípok felharmonikusainak száma véges (általában 15-18 alatt marad), amely megint csak a jelmodell hatékonyságának egyik alapvető követelménye. Nagyobb problémát jelent az, hogy nagy pontszámú *FFT* algoritmussal vizsgálva az orgonasíp-minták állandósult állapotát, látható, hogy a vonalas szerkezet mellett megjelenik egy szélessávú, nemharmonikus, határozott jellegzetességeket mutató zajszerű komponens, amely a megszólaló hang sípszerűségéért felelős [9], tehát megvalósítandó. Ehhez a jelmodellt ki kell egészíteni egy „maradékjel” generátorral (1. ábra), amely paraméterei többek között a sávszélesség, és a teljesítménysűrűség-spektrum. Orgonánál ezen zajcsúcsok megvalósítása például párhuzamosan kapcsolt II. fokú rezonáns IIR szűrőkön áteresztett fehér zajból alakítható ki. Egy eredeti síp spektruma, valamint a megvalósított jelmodell kimeneti spektruma látható a 2. ábrán.

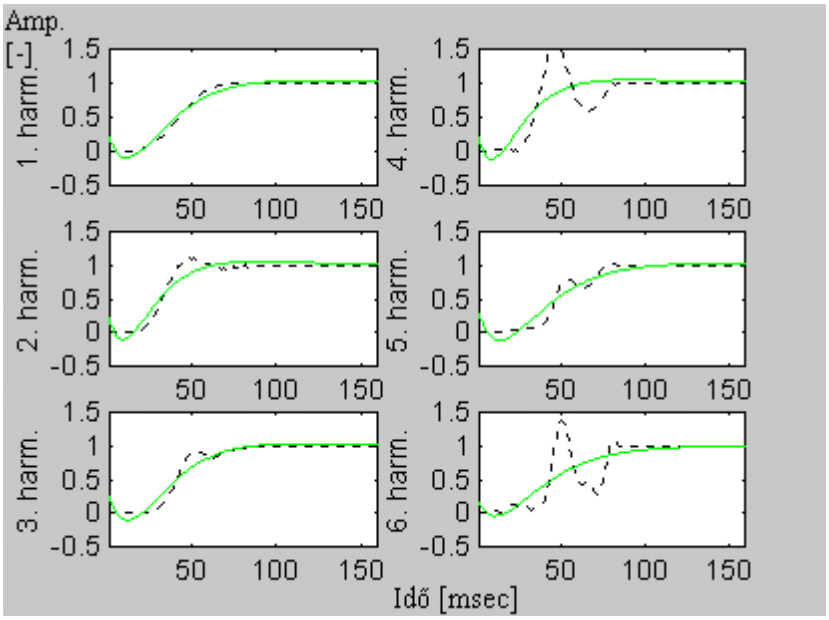


2. ábra Egy Bourdon síp és modelljének spektruma

3.2. Tranziens jelenségek

A tranziens jelenségek igen lényegesek a hangszerek felismerhetősége szempontjából [8]. Egy orgonasípnál első közelítésben tranziensnek a hang megszólalása és lecsengése számít. Ezek vizsgálata azonban lényegesen bonyolultabb, mint az állandósult spektrumé, mivel a megszólalás során mind az idő-, mind pedig a frekvenciatartományban erősen változnak a hangjel tulajdonságai. Így az analízis egyelőre csak az egyes felharmonikusok — és az imént bevezetett maradékjel — amplitúdójának változását vizsgálja, az adott komponensekre tervezett, — a jelalak megőrzése érdekében — lineáris fázisú sávátereszt ő FIR szűrők segítségével. Az így kapott amplitúdógörbék láthatóak a 3. számú ábrán (szaggatott vonal).

Ezen tranziens jelenségek modellje az egyes felharmonikusok (és a maradékjel) burkolójának kialakítását jelenti. Az egyes harmonikusok burkolóját IIR szűrők egységugrásra adott válaszaként modellezve, kis számítási igénnyel megvalósíthatók. A probléma a fokszám meghatározása, illetve a paraméterek optimalizálása. A 3. ábrán olyan III. fokú IIR szűrők ugrásválasza látható (folytonos vonal), amelyek paraméterei a különbségi hiba integrálját minimalizálják. Jól látható, hogy az így optimalizált függvények nem nulláról indulnak, valamint a magasabb felharmonikusoknál az eredeti és a modell ugrásválasza eléggé eltérő. Ez utóbbi megállapításhoz azonban hozzá kell tenni, hogy az eredeti sípmintában ezen komponensek amplitúdója kicsi, és így erősen zajjal terhelt, végleges kialakításukba a maradékjel is beleszól.



3. ábra A síp (szaggatott vonal) és modelljének (folytonos vonal) tranziens berezgései

3.3. Kvázistacionaritás

A sípok — és minden akusztikus hangszer — hangja állandósult állapotban sem lesz teljesen stabil. Ennek oka bizonyos hangszereknél a zenész befolyása (pl. hegedű), orgonánál pedig az áramló levegő (a gerjesztés) egyenetlensége. A szakirodalom szerint ezek a jelenségek is jellemzőek egy-egy hangszerre [7], vizsgálatuk tehát szükséges. A probléma méréstechnikailag eléggé megfoghatatlan, mivel egy nemdeterminisztikus jel jellemzőit kell meghatározni. A lehetséges megoldások egyrészt a sípzaj jellemzőinek meghatározása (szórása, spektruma), valamint a harmonikus komponenseken található frekvencia- illetve amplitúdó-moduláció paramétereinek rögzítése (amennyiben van ilyen). A kísérlet jelenlegi szakaszában csak a zaj jellemzőinek leírására került sor (1. ábra), amelynek megvalósítása a 3.1. pontban ismertetett szűrt fehérzaj segítségével történhet. A fehérzaj előállítására pedig digitális (ál)véletlenszám-generátorokat alkalmazva a modell számításigénye sem nő meg jelentősen.

3.4. Külső körülmények

Klasszikus orgonánál több olyan körülmény is van, amely egy síp hangját utólag befolyásolja. Ezen körülmények vizsgálata, minősítése is fontos élethű hang generálásához [7]. Ilyen hatás többek között a teremérzet (hosszú utózengés), az egyes sípok eltérő pozíciójából eredő hangforrás-kiterjedés érzése, illetve a több, egyszerre szóló síp egymásra hatása. Ezek a jelenségek méréstechnikailag azonban nehezen választhatók szét, mivel az összes említett jelenség egyszerre jelentkezik az orgona eredeti helyszínén.

A síphangra ható egyéb tényezők közül a jelenlegi modell az egyes sípok eltérő pozícióját veszi figyelembe (időkésleltetéses sztereofóniával). A teremérzet hatásának figyelembevétele pedig úgy történhet, hogy a modell az eredeti környezethez hasonló feltételek mellett szólal meg.

4. A megvalósítás lehetőségei

Az orgonahang szintézisének eddigi megvalósítása MatLab programcsomag segítségével történt, illetve elkészült egy valós idejű implementáció is, Motorola digitális jelfeldolgozó processzort tartalmazó fejlesztői környezetben.

A MatLab-program jelenleg *MIDI format 0* típusú file-ból szabványos *Wave* file-t képes előállítani, megadott sípparaméter-adatbázis segítségével. Jelenleg a program egyszerre csak azonos típusú sípokat képes kezelni, valamint némi elő- és utófeldolgozást igényel. A program a szintézist nem valós időben végzi, struktúrája az 1. ábrán látható blokkvázlat alapján épül fel.

A Motorola 56001-es processzorra kifejlesztett valós-idejű program csak részben készült el, mivel a fejlesztés során a program elérte a processzor teljesítőképességének felső határát. Jelenleg a program 9 felharmonikust képes számolni, és ezekre harmadfokú IIR szűrők ugrásválaszát képes illeszteni, $f_s=20$ *kHz* mintavételi frekvenciával. Ennek a minősége sokkal kevésbé meggyőző, mint a MatLab alatt futó, több szólamot is előállító programé. A közeljövőben a jelmodell egy nagyobb teljesítményű processzoron is megvalósításra kerül.

5. Összegzés, kitekintés

A cikk az orgonahang szintézisének lehetőségei közül egy jelmodell alapú szintézis bevezetését, hatékonyságát vizsgálta, valamint a hozzá tartozó kutatómunka és szintézis-kísérlet jelenlegi állapotát foglalta össze.

Az eddigi tapasztalatok eredményeként elmondható, hogy a bevezetett modell megfelelő hardverrel gazdaságosan megvalósítható, ugyanakkor hanghűsége jó. További előnye a paraméterek rugalmas állítási lehetősége, illetve a véletlenszerű jelenségek figyelembevétele.

Az alapkoncepció — a periodikus jelmodell — lényege pedig az, hogy elméletileg minden vonalas spektrummal rendelkező hangszer modellezhető vele. A különbség elsősorban a paraméterek jellegében, illetve súlyozásában jelentkezne. Ily módon azonos hardverrel, csak a bemeneti paraméterek változtatásával és némi algoritmus-módosítással hatékony szintetizátort lehetne készíteni, amellyel az akusztikus hangszerek modellezésén kívül új zenei hangzásokat is elő lehetne állítani.

Irodalom

[1] Kruza R. - Banay G., *„A szintetizátor a zenei gyakorlatban”* Zeneműkiadó, Budapest 1985.

[2] Fürjes A., *„Nyílt struktúrájú zenei hangszintézis digitális jelfeldolgozó processzorral”* diplomaterv feladat, BME VIK Elméleti Villamosságtan Tanszék, Budapest 1996.

[3] Klotz H., *„Az orgonáról”* Zeneműkiadó, Budapest 1972.

[4] Pécsi S., *„Az orgona”* Zeneműkiadó, Budapest 1965.

[5] Márkus J., *„Orgonasípok hangjának digitális szintézise jelmodell segítségével”* kari TDK dolgozat, BME VIK Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék, 1998.

[6] Péceli G., „A common structure for recursive discrete transforms” *IEEE Transactions on Circuits and Systems* CAS-33., 1035-36. o., 1986.

[7] Tarnóczy T., *„Zenei akusztika”* (49-55, 323-356 o.) Zeneműkiadó, Budapest 1982.

[8] Jánosy Z. - Välimäki V., „Fizikai modell alapú digitális hangszintézis” *Híradástechnika*, 1992. február, 21-24. o.

[9] Angster J. - Miklós A., „Documentation of the sound of a historical pipe organ” *Applied Acoustics* 46 (1995) 61-82. o.