Mérések BK-2133 azonosidejű elemzővel zengőszobában

A mérésnek két célja van,

- egyrészt megismerkedni a BK2133 elemző műszerrel és a benne alkalmazott jelfeldolgozási metódusokkal,
- másrészt megismerkedni a zengőszobával, annak jellemző tulajdonságaival, benne utózengési időt és hangteljesítményt mérni.

A 2133 főbb részei ill. a jelfeldolgozás egyes mozzanatai

1. bemeneti változtatható erősítő (A bemenő jelszint változhat, míg az AD konverterek általában fix bemenő jelszinten dolgoznak.)
2. antialiasing szűrő
3. AD konverter
4. digitális szűrősor (IIR szűrők)
5. RMS képzés (szűrőcsatornánként)
6. átlagolás (szűrőcsatornánként)
7. tárolás-kijelzés (szűrőcsatornánként)

Feladat: Próbáljuk meghatározni, hogy mit takarnak az 5. és 6. pontok! Feltételezzük, hogy az előző pont végén a digitális szűrő kimenetén órajelenként megjelenik egy adat. (Másként: miféle programmal-algoritmussal lehet egy folyamatosan ömlő mintavételezett jelsor effektív értékét kiszámítani?) Gondoljunk arra is, hogyan oldják meg ezt a feladatot a régi analóg műszereknél.

A zengőszobáról általában

A zengőszoba egy nagyméretű helyiség beton falakkal, a falakon kemény pórusmentes bevonattal. Az egész szerkezet külön alapokon, rugókon áll, hogy a környezetből ne vegyen fel rezgéseket. Falai kissé szabálytalanok és belül van néhány gömb alakú test is elhelyezve, növelendő a belső tér szabálytalanságát.
A zengőszoba két legfontosabb paramétere a térfogata és az utózengési ideje.
Egy ideális zengőszobában a hang sokszoros visszaverődéssel egyenletesen bejárja a szobát, mielőtt elhal. A szobának minden pontjába minden irányból eljut.
A zengőszobában (ideálisan) kialakult hangtérre szokták mondani, hogy homogén, illetve hogy diffúz. A homogenitás alatt azt értjük, hogy a hangnyomás független a helytől. De a homogenitásnak az is a következménye, hogy hangforrás elhelyezésétől is függetlenek lesznek a mérési eredményeink. A diffúzitás pedig ugyanezt jelenti az irány vonatkozásában: a mérési eredmények függetlenek a mikrofon illetve a hangforrás elhelyezésének irányától. előbbi persze csak akkor érdekes, ha irányított mikrofont használunk.

A zengőszobának két alapvetően különböző felhasználása van. Alkalmas egyrészt hangteljesítmény mérésre, másrészt anyagok (pl. táblában kapható burkolóanyagok) ill. tárgyak (pl. nézőtéri székek) hangelnyelésének mérésre. (lásd még függelék 1.)

Az utózengési idő megadja, hogy a gerjesztett majd magára hagyott zengőszobában mennyi idő alatt csökkent a hang energiája a milliomod részére. Miért éppen milliomod? Miért nem „e”-ad részére? Mert valaki így találta ki régen, és mára már rögzült a köztudatban.
Később látni fogjuk, hogy az e-ad részre csökkenés idejének több értelme lenne, de az is nyilvánvaló, hogy nincs szó tragédiáról, hiszen egy exponenciális folyamat bármelyikkel jellemezhető. **(Kérdés: Ha az utózengési idő 6 sec, mennyi idő alatt csökken az energia az e-ad részére?)**
Az utózengési idő függ a frekvenciától. 10kHz-hez közelítve az utózengési idő erősen lecsökken. Ennek oka a hang elnyelődése a levegőben. (ld. függelék 2.)

Utózengési idő mérésénél a zengőszobát hangszóró(k) segítségével mintegy „felpumpáljuk”, feltöltjük hangenergiával, majd a gerjesztés kikapcsolása után megfigyeljük (mintavételezzük) a lecsengési folyamatot. A gerjesztés többnyire szélessávú zajjal történik.

Az alkalmazott műszer képes arra, hogy a tercekre bontsa a lecsengő jelet és az egyes szűrők kimenetét ábrázolja az idő függvényében. Logaritmikus amplitúdóskála esetén a képernyőn egy ferde egyenes jelenik meg. Az utózengési idő az egyenes meredekségének reciprokával arányos képernyőn megjelenő ferde egyenes meredekségével függ össze. A lecsengés egy szakasza kijelölhető, a kijelölt szakaszból a készülék (egyenes-illesztéssel) utózengési időt számol.
Tűéles lecsengési egyenes helyett a valóságban inkább egy „zajos-szőrös” görbével találkozunk. Zajos azért, mert az egy tercbe tartozó rengeteg különböző frekvenciájú módus csúnya összelebegés eredményez. Görbülete pedig egyrészt azért van, mert elkerülhetetlenül bele kell simuljon az időben állandó alapzaj vízszintesébe, de görbe azért is mert a sok különböző módusnak a lecsengési ideje is némiképp különböző. A folyamat elején még minden módus jelen van (akkor a lecsengési idejük átlagát produkálják). Később viszont a gyorsabb lecsengésűek már kipusztultak, így a lecsengés csak az „életképesebbekre” jellemző.
Mivel az akusztikai alkalmazásokban inkább az összes módus lecsengési idejének átlaga kap szerepet, célszerű a lecsengési görbének az elejét használni a meredekség számításánál.

A BK-2133 célszerű beállítása a méréshez:
Terc elemzés: 100Hz…10kHz
Átlagolás: Lineáris, 30ms
300db spektrum tárolása (összesen cca. 10s)

A hangteljesítmény mérése

A BK4204 etalon forrás a levegő keverésével kelt turbulens zajokat. Lényegében egy nagyon rossz ventilátor, ami alig fúj, viszont igen zajos.
Vajon miért ilyen elven készült a zajforrás etalon?
Lássuk, milyen szempontok vannak egy zajforrás etalon készítésénél!

1. a legfontosabb a stabilitás (mint minden etalonnál),
2. egyenletes szélessávú spektrum
3. irányfüggetlenség

A stabilitáshoz: Mitől is függ a hang?

1. A fordulatszámtól. (Attól erősen, de frekvenciát az olcsó kvarcórák korában nagyon tudunk mérni.)

2. A járókerék és a környezet geometriájától. (Ki kell önteni alumíniumból, esetleg öregíteni emelt hőmérsékleten. Sokkal méretstabilabb alkatrészek készíthetők, mint amire itt valaha is szükség lehet.)
3. A levegő rugalmas tulajdonságaitól. (nyomás, hőmérséklet, esetleg páratartalom) Ezek egyrészt mérhetők, másrészt hozzá vagyunk edződve, hogy —csináljunk bármit—az összes levegőbeni hangjelenség mindezektől függeni fog.

Szélessáv ügyében elég jól állunk. A leadott spektrum felső vége elég magasan van, elég fehér is, és alacsony frekvencián van mérhető jel.
Az iránykarakterisztika is elég jó a körkörös kialakítás miatt

Mindezekkel hasonlítsuk össze egy hangszóró öregedő+hőfokfüggő+páratartalomfüggő membránját, annak rugalmas rögzítését és a mágnes erejének bizonytalanságát, mindjárt érthetővé válik a választás. [1]

A hangteljesítmény mérését a zengőszobában szabvány segíti. A segítség a mérés végrehajtására vonatkozik, nem a lényeg elmagyarázására. Egy szabványnak nem feladata az oktatás, nekünk viszont igen, azért megpróbáljuk a témát kissé körüljárni.
Hangteljesítmény mérése során elhelyezzük a hangforrást a zengőszobában, megvárjuk, míg beáll az állandósult hangtér, megmérjük a kialakult hangnyomást, és (ismerve a zengőszoba bizonyos paramétereit) számolunk.
Kérdés merül fel, hogy miféle gondolatok vezetnek egy pascal-ban megadott hangnyomástól egy watt-ban kifejezett teljesítmény adatig, és a zengőszoba mely paraméterei kaphatnak itt szerepet.
A zengőszobának ebből a szempontból is fontos tulajdonsága az utózengési ideje. Sejthető, (talán tapasztaltuk is), hogy egy csupasz falakkal kongó helyiségben kisebb erőfeszítéssel lehet ugyanakkora lármát csinálni, mint egy szokásos lakószobában, bútorok, szőnyegek között.
Fontos még a térfogat is, ami szintén nem meglepő. Pl. hangszóróból is több kell egy nagy terem hangosításához, mint egy kis szobáéhoz.

Teljesítmény mérés, ahogyan egy fizikus közelíti a kérdést

1. a mért p hangnyomásból — a levegő rugalmas tulajdonságainak ismeretében (c, ρ) — kiszámítjuk az energiasűrűséget a zengőszoba levegőjében. $E= p^2/(\rho*c^2)$
2. Az energiasűrűséget megszorozzuk a zengőszoba térfogatával, hogy összenergiát kapjunk.
3. Az összenergiát elosztjuk az energia e-ad részre csökkenésének idejével[2], ezzel és megkapjuk a szobában disszipált teljesítményt. Ami persze éppen megfelel a betáplált teljesítménynek (beállt egyensúly esetén).

Teljesítmény mérés, a szabvány szerint, ill. ahogyan egy akusztikus gondolja.

---

[1] Bár működhetne az etalon hangszóró alapon is, csak akkor a stabilitást nem a hangszóróra kell bízni, hanem egy (több) kondenzátormikrofonra (mert azok viszonylag stabilabbak) és egy visszacsatolásra.
[2] Ha nem lenne világos, képzeljük el, hogy egy adott pillanatban a betápot megszüntetjük. Ekkor a magára hagyott zengőszobában az energia exponenciálisan csökkenni kezd. Az energia változása az időben a disszipált teljesítmény miatt van: az $E_{összes}(t)$ függvény idő szerinti deriváltja éppen a $P_{disszipált}(t)$. Az exponenciális függvények pedig kényelmes tulajdonsága, hogy a meredekségüket bármelyik pontban úgy számíthatjuk, hogy elosztjuk a függvényértéket az e-adolódási idővel. (>>>> ezért szeretjük az „e”-t, többek között)

1. Megpróbáljuk a zengőszobában tapasztalt csillapítást úgy modellezni, törlünk minden meglévőt, viszont vágunk egy adott méretű ablakot a zengőszobára, amely keresztül távozhat az energia. A tapasztalt utózengési időt éppen beállító ablakfelületet nevezzük ekvivalens elnyelési felületnek. (ami nyilván frekvenciafüggő, amiként a csillapítás is az)

   $$A=0.16 * V/T$$

   ahol
   A az ekvivalens elnyelési felület [m^2]
   V a zengőszoba térfogata [m^3]
   T a zengőszoba utózengési ideje [s]
   (0.16-os faktor eredete kissé rejtélyes)
2. Azt mondjuk, hogy a szobában tapasztalt hangnyomás lesz érvényes az „ablak síkjában" és az ablakon túli közegnek (levegő van ott is) adott fajlagos akusztikai impedanciája van, tehát adott teljesítmény képes átvenni.

   $$P= A * p^2 / z$$

   ahol
   z : a levegő fajlagos akusztikai impedanciája ($z=\rho*c$)
   p: a hangnyomás effektív értéke.

További kérdések is vannak, amelyeknek a szabvány meg kell feleljen. Például, hogy mi a teendő nemideális zengőszoba esetén?
Mikor ideális egy zengőszoba? Akkor, hogyha elég nagy az utózengési idő, hogy legyen ideje a hangnak egyenletesen bejárni minden zegzugát. Az is segít, ha a visszaverő felületek többé-kevésbé rendetlenül állnak. Pl. párhuzamos falak kerülendők, mert a közöttük pattogó hang nemigen akar más irányba fordulni. (csörgővisszhang)

Nemideális viselkedés magas frekvencián
Magas frekvencián erősen csillapít a levegő, így a zengőszoba csak akkor lehet ideális, ha kicsiny. (Mire egy nagy hodályban a 20 kHz-es hang eléri a falat, a fele elpusztult. Hogyan is juthatna el egyenletesen mindenhová?!)

A probléma kezelése
A magas frekvencián, amikor túl kicsi az utózengési idő a zengőszoba méreteihez képest, az történik, hogy a hangforrásnak lesz egy bizonyos közeltere, ahol még érzékelhetően magasabb a hangnyomás mint a távoltérben, ill. ahol becsukott szemmel forgatva a fejünket meg tudjuk mondani, hogy merre van a hangforrás. A mikrofont ekkor lehetőleg távol kell elhelyezni a hangforrástól.
Mivel a falakat sem illik nagyon megközelíteni velük, a szoba átlója mentén a szélső ötödölő pontokban való elhelyezés célravezető.
Ezen esetekben nem az átlagolás jelenti a megoldást, (bár az sem árt), hanem egy korrekciós képlet, amelyet a szabvány tartalmaz.

Nemideális viselkedés alacsony frekvencián
A zengőszoba hangterének fontos paramétere még az ún. módussűrűség. Arról van szó, hogy egy adott frekvenciasávba hány darab rezgési módus esik. (Az a jó, ha minél több.) Alacsony frekvencián (100Hz alatt) csak kevés módusa van a zengőszobának. Pl. 70Hz-en nem mindegy, hová tesszük a mérőmikrofont, mert ha az egyetlen „ügyeletes" (=közeli frekvenciájú) módusnak a duzzadóhelyére sikerült tegyük, akkor nagy hangnyomást mérünk, ha meg éppen egy csomófelületet találtunk el, akkor ugyanabban a hangtérben nem mérünk

semmit.[3] Ha viszont sűrűn vannak a módusok, akárhová is tesszük a mikrofont, bízhatunk abban, hogy lesznek bőven olyanok is amelyeket jobban, olyanok is amelyeket kevésbé sikerült „eltalálnunk" így a mérési eredményünk nem lesz annyira esetleges. Sok módus általában akkor tud kialakulni, ha a szoba nagy a hullámhosszhoz képest.[4]

A probléma kezelése
Alacsony frekvencián, ahol az elégtelen módussűrűség a baj, azaz a tér nem egyenletes, hanem „hepehupás", az átlagolás segíthet. Ekkor sajnos le kell mondjunk arról, hogy elvileg egyetlen hangforrás ill. mikrofon elhelyezéssel minden megmérhető. Az átlagolás tehát a nyers erő módszere: sok mikrofon- ill. hangforrás-elhelyezéssel kell mérnünk, és a kapott adatokat átlagolnunk.[5] A szabvány úgy rendelkezik, hogy mérni kell 6 adatot,[6] szórást számítani, amiből megtudjuk , hogy mennyit kellett volna mérni. (azaz elegendő-e az eddigi 6, vagy további adatokat kell még gyűjteni)

egyéb szempontok:
A mikrofon elhelyezésnél kerülni kell a falak közelségét. 1 hullámhossznyi távolság biztonsággal elegendő, de ½ hullámhossz is megteszi.
Feladat: próbáljuk ki, mennyivel mérünk nagyobb hangnyomást, ha a mikrofont a falhoz érintjük, ha két ill. három fal találkozásához tesszük. (a „sarok" szó kissé pongyola ebben az esetben)

Mérési feladatok:
Meghatározni a zengőszoba utózengési idejét a 200Hz 10kHz frekvencia tartományban terc lépésekben.
Követve a szabvány utasításait és felhasználva az imént mért utózengési adatokat meghatározni a BK-4204 hangforrás etalon teljesítményét egy frekvencián (pl. az 1kHz-es tercsávban).
Válaszoljunk (elegendő szóban) a szövegben vastagon szedett kérdésekre.

Szükséges paraméterek:
Zengőszoba térfogata: 130m^3, felülete: 150m^2

Jó munkát!

Bp. 2005. szeptember

Dániel István
fizikus

[3] Ekkor a szoba nemcsak mérési szempontból inhomogén, hanem gerjesztési szempontból is: a mérési eredmények a hangforrás elhelyezéstől is függeni fognak.
[4] Összevetve az iménti ellentmondó szempontokat, látszik, hogy nincs olyan zengőszoba amely lefedné a teljes 20Hz … 20kHz frekvenciatartomány. Az itt található zengőszoba a 300Hz ---3kHz tartományban mondható ideálisnak
[5] (És miközben átlagolunk napestig, nem lehetünk biztosak abban, hogy a nemideális környezetnek nincs valami szisztematikus hatása, amely átlagolással nem kompenzálható.)
[6] Pl. 2 hangforrás pozíció × 3 mikrofon pozíció. Ami lényeges, hogy *szignifikánsan* különbözzenek az egyes mérési pontok. Ha például a mikrofon 1mm-re odébb toljuk, az nyilván nem elegendő. (**Kérdés: mi határozza meg az elmozdítás minimálisan szükséges mértékét?**)

Függelék 1.

Hangelnyelő anyagok mérése zengőszobában.

A mérés praktikusan két utózengési idő mérést jelent, egyszer üres szobával egyszer pedig az elnyelőkkel együtt. A számítás során pedig a mért két ekvivalens elnyelési felület (lásd a fő szöveget) különbségét lehet az elnyelő anyaghoz rendelni.
Egy burkolat fajta akár meglehetősen bonyolultan is viselkedhet a beeső hangokra. A teljes jellemzéséhez (adott frekvencián) meg kellene adni az összes beeső (hang)irányra, hogy mennyi az elnyelés mértéke. A bonyolult adattömeget nem csak megszerezni, de a felhasználói oldalon kezelni is nehéz volna. Általában nincs is szükség egy burkolóanyag ennyire részletes jellemzésére. Ha rendelkezésre is állnának a részletes adatok, akkor is inkább azok átlagával dolgoznánk egy akusztikai tervezés során. Egyszerűbb tehát rögtön az átlagot mérni egyetlen lépésben, amire a zengőszoba alkalmas is. A benne kialakuló homogén és diffúz hangtér az elhelyezett csillapító-hangelnyelő anyag minden pontját minden irányból egyenletesen ostromolja. Ilyen módon tehát egyenletesen súlyozva átlagolja össze a részadatokat.

Függelék 2.

A hang elnyelődésének okai a zengőszobában.

A hang elnyelődhet a falakon ill. fal sem kell hozzá, elnyelődik, miközben utazik a levegőben.

- A falon elnyelődés oka lehet pl. a viszkozitás. Ha a hanghullámok a fallal párhuzamosan haladnak, akkor részecskék mozgása is párhuzamos a fallal. A levegő ekkor mintegy „hozzádörgölőzik”, súrlódik a fal mentén. Közvetlenül a falnál a levegő nyugalomban van, pár cm-e attól már erősen rezeg. A kettő közötti átmeneti tartományban nyírások alakulnak ki, és szerephez jut a viszkozitás.
- Falra merőleges részecskemozgások esetén is képes a fal elnyelésre. Ennek oka a levegő adiabatikus viselkedése. Amikor a fal mentén összepréselődik a levegő, akkor egyidejűleg felmelegszik. Mire azonban a kitágulásra kerülne a sor, addigra a fal (jó hővezető, és nagy a hőkapacitása) átveszi a hő egy részét. Márpedig egy adiabatikus rugó, ha kilopják belőle a meleget, akkor kevesebb energiát ad vissza, mint amennyit az összenyomásnál befektettünk. (ugyanez mondható el kitágított levegőre fordított előjellel)
- Természetesen az is veszteséget jelenthet, ha a fal nem ideálisan kemény, és mechanikai rezgés formájában veszi át az energia egy részét.

Ha fal nincs a közelben, akkor is van elnyelődés.
A bonyolultabb alakú hullámok esetén vannak a levegőben nyírások, nyíró deformációk, amelyekbe a viszkozitás „bele tud kapaszkodni”
A hullámterjedés közben vannak a levegőben hullámhegyek és hullámvölgyek, nyomott és kitágult részek, amelyeknek eltérő a hőmérséklete. A levegő, noha rossz hővezető, mégiscsak elkezdi vezetni a hőt a meleg helyről a hideg felé. Az is rögtön megsejthető, hogy az efféle disszipáció rövid hullámhosszakon hatványozottan erősebb.

Végére maradt egy érdekes effektus amely szintén magas frekvencián érezteti hatását.
A levegőmolekulák kétatomosak. Termodinamikában hallottunk az ekvipartícióról, nevezetesen, hogy termikus egyensúlyban ez egyes szabadságfokok között egyenlően oszlik el az energia. Így van ez tehát a molekulák transzlációs és rotációs szabadságfokainak esetében is. Viszont a hangterjedés szapora folyamat, amely termodinamikai szempontból nem feltétlenül egyensúlyi. Hogy mikor egyensúlyi, és mikor nem, az a hang frekvenciájától függ, illetve attól, hogy a termodinamika „mennyire fürge". Azaz mennyire gyorsan áll be az egyensúlyi állapot annak megbontása után.
Mi is történik? Gondolatban nyomjunk össze dugattyúval levegőt, és figyeljük a folyamatot! A gázhoz közeledő dugattyúról nagyobb sebességgel pattannak vissza a nekiütődő molekulák, azaz a dugattyú a molekulákat *felgyorsítja*. A gyors molekulák erősen pofozzák a falat ill. a dugattyút, azaz nagy nyomás érzékelünk (= nehéz volt a dugattyút benyomni). Ekkor várunk egy kicsit, kialakul az egyensúly, amelynek során a molekulák felpörögnek, viszont lecsökken a sebességük. Mivel nyomás nem a forgásból származik, hanem a transzlációból, a gáz nyomása lecsökken. Amennyiben ekkor akarjuk visszaszerezni a korábban befektetett energiát a dugattyú kiengedésével, az tapasztaljuk, hogy „ráfizettünk".
Hasonlít a folyamat a fal mentén történő adiabatikus veszteséghez, csak itt a „bűnös" hőkapacitás nem a határfelületeket jelentkezik, hanem a levegő teljes térfogatában.
Alacsony frekvencián ez az effektus sem jelentős, viszont 10kHz felett már ez viszi pálmát.