

Utózungési idő mérése

Mérési segédlet a Stúdiótechnika Laboratórium tárgy hallgatói számára

A mérési segédletet kidolgozta: Nagy Attila Balázs, Jenei-Kulcsár Dóra

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Alapfogalmak	1
3. Az utózungési idő becslése	3
3.1. A Sabine-féle megközelítés	3
3.2. A modern teremakusztikai megközelítés	4
3.2.1. A modern teremakusztikai megközelítés	5
4. Az utózungési idő mérése	5
4.1. A megszakított zaj módszere	5
4.2. Az impulzusválasz-alapú módszer	6
4.2.1. A módszer lényege	6
4.2.2. Az impulzusválasz mérése	7
5. Ellenőrző kérdések	8
6. Mérési feladatok	8
6.1. Utózungési idő becslése	8
6.2. Utózungési idő mérése	9

1. Bevezetés

A jelen mérés célja, hogy megismertesse a hallgatókat a teremakusztikai alapfogalmakkal és azok gyakorlati alkalmazásával az utózungési idő mérésén keresztül.

A mérési útmutatóban először áttekintjük a mérés elvégzéséhez szükséges fogalmakat, majd ismertetjük az utózungési idő mérésének módszereit. Az útmutató végén megtalálhatóak a felkészülést segítő ellenőrző kérdések és a mérési feladatok.

2. Alapfogalmak

Szabad térbe helyezett **pontforrás** esetén a hang a forrásból sugárirányban, gömbszimmetrikusan terjed, azaz egy adott időpillanatban az azonos rezgési fázisban lévő részecskéket összekötő felület gömbfelületet alkot. Ez a rezgésállapot terjed sugárirányban kifelé az idő (t) múlásával.

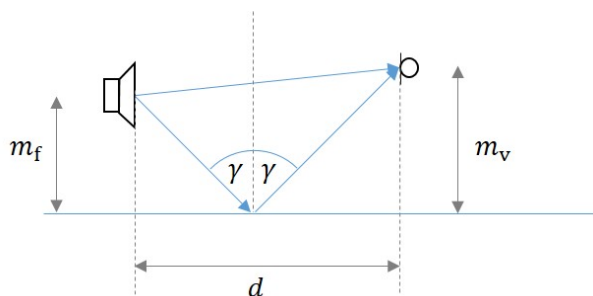
Szabad térnek nevezük azt a hangteret, ahol a hang minden irányban akadálytalanul terjedhet, így nem lép fel semmilyen reflexió. Ebben az esetben könnyen belátható, hogy a felületegységen átáramló teljesítmény (**hangintenzitást** $I [\frac{W}{m^2}]$), az (1) alakot ölti, azaz a pontforrás által kisugárzott teljesítmény ($P [W]$) és a gömb felületének ($A [m^2]$) hányadosa.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

ahol r [m] a forrástól való távolság.

Pontforrás esetén tehát a hangintenzitás egyenesen arányos a teljesítménnyel és fordítottan arányos a távolság négyzetével. Szabad hangtér a gyakorlatban nem létezik, de bizonyos esetekben jó közelítésként alkalmazható. Ilyen modellezési szituáció például az Alföld fölött nagy magasságban haladó repülőgép megfelelő távolságban kialakuló hangtere. Laboratóriumi körülmények között előállítható szabad hangterű akusztikai mérőhelyiség, melyben a visszaverődés minden határoló felületről (padló, mennyezet és falak) közel nullának tekinthető (süketzsoba).

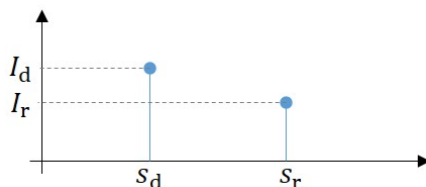
Félszabad hangtérről beszélünk abban az esetben, ha a térrészünket az egyik oldalról egy végtelen reflektáló sík határolja, míg a többi irányban akadálytalanul terjedhet a hanghullám. A visszaverő sík következtében két hangút alakulhat ki, azaz az m_f magasságban elhelyezett pontforrástól d távolságban m_v magasságban lévő megfigyelési pontban megfigyelt hangintenzitást nem csak a **direkt hang**, hanem a felületről **visszavert hang** is befolyásolja (ld. 1. ábra).



1. ábra. Reflexió végtelenül merev síkról félszabad hangtérben.

Teremakusztikában elterjedten alkalmazott közelítés, hogy a hanghullám terjedése hasonló a fény viselkedéséhez. Ezek alapján feltételezzük, hogy a hang egyenes vonalban terjed, és egy végtelenül merev síkról való reflexió esetén a beesési és visszaverődési szögek azonosak (γ). Így a visszavert úthossz hossza a megadott adatokból közvetlenül meghatározható.

Abban az esetben, ha feltételezzük, hogy a teljes hangenergia visszaverődik, akkor a visszavert hang úgy viselkedik, mintha a hangforrás távolabb helyezkedett volna el, azaz a hangintenzitás a visszavert úthossznak megfelelő mértékben csökken (ld. 2. ábra)

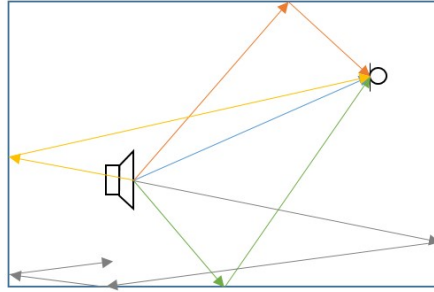


2. ábra. A hangintenzitás a direkt (r) és a visszavert (r) hangúton.

A valóságban ez az ideális eset tisztán nem valósul meg, hiszen a visszaverődés során a felületen hangnyelődés történik. Gyakorlati alkalmazására egy példa a félszabad hangterű akusztikai mérőhelyiség (félsüketzsoba), amelyben a padló közel tökéletesen reflektáló, míg a falak és a mennyezet – kialakításukból adódóan – közel tökéletesen elnyelők. Mivel nincs más reflexió, a padlóról való visszaverődés utófeldolgozás során figyelembe vehető.

A visszaverődéseknek nem csak nem kívánt hatása lehet. **Haas-hatásnak** nevezzük azt a jelenséget, amikor a fülünkbe két esemény nagyon rövid időn belül érkezik, így azt nem tudja megkülönböztetni, hanem a hangenergiájuk összeadódik. Ha nagyobb különbséggel érkeznek, akkor külön hangeseményként érzékeljük őket, mely zavarhatja a beszédérthetőséget. Ez a határ kb. 50 ms.

Dirac-gerjesztés feltételezése mellett definiálhatjuk a **beszéd célú hangtisztaságot** (D_{50} , Deutlichkeit,



3. ábra. Hang terjedésének szemléltetése zárt térben.

definition)

$$D_{50} = \frac{E_{0-50}}{E_{tot}}, \quad (2)$$

mely az első 50 ms-ra eső energia és a teljes energia arányát adja meg a terem impulzusválaszában. A hangtisztaság paramétert %-ban adjuk meg. Minél magasabb értéket vesz fel, annál jobb a beszédérthetőség.

Hasonlóképpen definiálható a **zene célú hangtisztaság** (clarity)

$$C_{80} = 10 \lg \frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}}, \quad (3)$$

mely az első 80 ms-ban érkezett energiát hasonlítja össze a később érkezett energiamennyiséggel dB-ben.

Abban az esetben, ha egy térrészt minden irányból egy visszaverő síkkal határoljuk zárt térbeli hangterjedésről beszélünk. Ebben az esetben a térrész (terem, szoba) minden faláról tökéletes visszaverődés, a pontforrásból a vevőbe a direkt hangon kívül egyszeresen és többszörösen visszavert hanghullámok jutnak el, többutas hangterjedésről beszélünk (ld. 3. ábra). A reflektáló határoló felületek miatt a hangenergia teljesen ki fogja tölteni a rendelkezésre álló teret, a visszaverődések összemosódnak, a forrás "mindenhonnan" szól. *A hangenergia lokális, térbeli átlaga független a pozíciótól.* Az ilyen hangteret **diffúz hangtérnek** nevezzük.

3. Az utózungési idő becslése

3.1. A Sabine-féle megközelítés

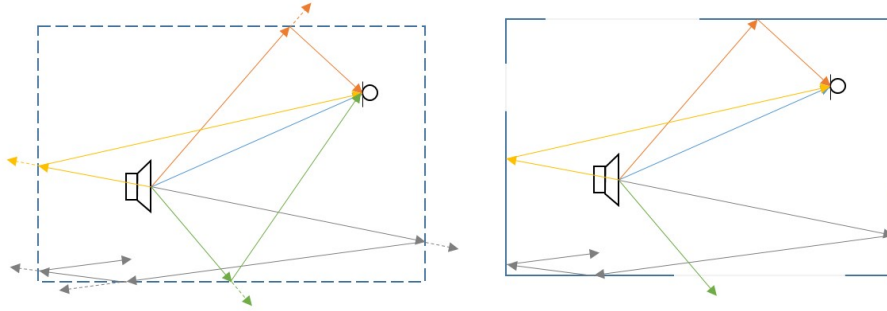
A **Sabine-féle megközelítés** a diffúz hangtér definíciójából indul ki. Feltételezi, hogy a hangenergia terem-beli eloszlása nem függ a tértől és időtől. Azokat a kis térrészeket ahol ez nem teljesül, például a térben lévő tárgyak vagy a falak közelsége miatt, az egyszerűség kedvéért kizárja a vizsgálatból.

A megközelítés alapvetően a térrészt mint egy "hangenergia-tartályt" képzelel el. Ebből következően az egyedüli akusztikai jellemzőnk, amivel dolgozni tudunk az a hangenergia (intenzitás), mely arányos a terem-ben lévő hangnyomás négyzetével (ld. (1) egyenlet). Ugyanakkor figyelembe veszi, hogy a visszaverődések során hangenergia nyelődik el. Az megközelítés szerint ez az elnyelődés kizárólag a falakon történő visszaverődések során történik, így például azt, hogy a rezgésállapot terjedése közben a levegőrészecskék súrlódása miatt hangenergia csökkenés következik be, kizárja a vizsgálatból.

A falak hangelnyelési képességét az **elnyelési tényezővel** (α) jellemezzük. Az elnyelési tényező egy dimenziótlan mennyiség, 0 és 1 között vehet fel értéket. A 0 érték jelenti, hogy a beeső hangenergia egyáltalán nem nyelődik el, azaz veszteség nélkül visszaverődik, míg az 1 érték fejezi ki, hogy a beeső hangenergia teljes mértékben elnyelődik az adott felületen, így visszaverődés nem történik. Az elnyelési tényezőt szokás százalékban megadni. (Megjegyezzük, hogy a gyakorlatban az elnyelési tényező függ a frekvenciától.)

A Sabine-féle megközelítésben nem teszünk különbséget a falak között. A teret az átlagos elnyelési tényezővel jellemezzük ($\bar{\alpha}$).

A forrás bekapcsolását követően egy idővel kialakul az adott térrészt jellemző egyensúlyi állapot: pontosan annyi energia nyelődik el a falakon, mint amennyit a hangforrás hozzáad a teremhez. Az egyensúlyi



4. ábra. A Sabine-féle megközelítés és az ekvivalens elnyelő felület szemléltetése.

állapotban a teremben lévő energiasűrűség egyetlen átlagos energiasűrűséggel (\bar{w}) adható meg. Ha a forrást kikapcsoljuk, a teremben lévő elnyelés miatt a teremben lévő energia csökkenni kezd, a csökkenés időben exponenciális. A csökkenés jellemző az adott térrészre. (Megjegyezzük, hogy abból, hogy az elnyelési tényező frekvenciafüggő mennyiség, következik, hogy a lecsengés is frekvenciafüggő lesz.) A kikapcsolástól eltelt időt, ami alatt az átlagos energia egymilliomod részére csökken, **utózungési időnek** (RT , reverberation time) nevezzük. Az utózungési idő a (4) egyszerűsített képlet alapján számítható, melyben V [m^3] jelöli a térrész térfogatát és A_s [m^2] az ekvivalens elnyelési felületet.

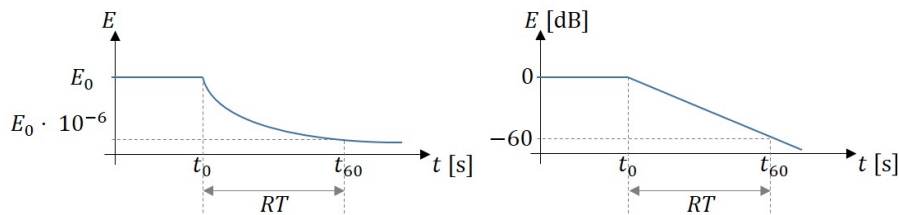
$$RT = 0,16 \cdot \frac{V}{A_s} \cdot [1 \frac{\text{s}}{\text{m}}] \quad (4)$$

Az **ekvivalens elnyelési felület** (absorption surface) azt fejezi ki, hogy a térrészt határoló felület mekkora része tökéletesen elnyelő ($\alpha = 1$), ha feltételezzük, hogy minden más felület tökéletesen visszaverő ($\alpha = 0$). Mivel az átlagos elnyelési tényező egy arányszámot fejezett ki, így a teljes felülettel vett szorzatával az ekvivalens elnyelési felület meghatározható:

$$A_s = S \cdot \bar{\alpha}. \quad (5)$$

Az ekvivalens elnyelési felület megnevezés helyett sok esetben használják az **ekvivalens nyitott ablak** vagy a **terem elnyelési képessége** elnevezést.

Az utózungési időre vonatkozó összefüggést Wallace Clement Sabine (1868-1919) fogalmazta meg 1900-ban. Kísérletei során orgonasípokot szólaltatott meg, és különböző termekben mérte a keltett hang lecsengési idejét. Munkássága megtalálható az 1922-ben megjelent 'Collected Papers on Acoustics' című könyvében. [1]



5. ábra. Az energia lecsengése a forrás kikapcsolása után (t_0) egyensúlyi állapotból indulva.

3.2. A modern teremakusztikai megközelítés

A Sabine-féle megközelítés korlátai

A Sabine-féle megközelítés egyetlen paraméterrel, az átlagos lecsengési tényezővel jellemezte a térrészt, melyet egy hangtartályként kezel. Ez a megközelítés igen absztrakt. A valóságban a terem nem csak a falakból,

hanem abban található különböző visszaverő geometriákból is áll, melyek elnyelési tényezői különbözőek lehetnek. Az ekvivalens elnyelési felület így a

$$A_s = \sum_{i=1}^{N_s} S_i \cdot \bar{\alpha}_i \quad (6)$$

összefüggéssel számolható, melyben N_s jelöli a különböző elnyelési tényezővel rendelkező felületek számát. A kapott érték behelyettesíthető a Sabine-képletbe (ld. (4) egyenlet).

Megjegyezzük, hogy a *Sabine-féle képlet nem használható* abban az esetben, ha $\bar{\alpha} > 0,3$, a terem túl szabálytalan vagy ha az elnyelő felületek túlságosan egyenetlenül helyezkednek el a teremben. Ezekben az esetekben sérül a diffuzivitás, így más összefüggéseket, vagy teremakusztikai modellezést kell alkalmazni.

3.2.1. A modern teremakusztikai megközelítés

A modern teremakusztikai megközelítés lényege, hogy figyelembe veszi, hogy a hangerjedési utak minden adó és vevő elrendezésre különbözőek. A probléma tehát jobban modellezhető egy több bemenetű, több kimenetű, lineáris, időinvariáns és kauzális rendszerként, hiszen bármely pontja kivezethető adónak, illetve vevőnek. Minden bemenet és kimenet között felírható impulzusválasz.

A gyakorlatban egy terem akusztikai tulajdonságait nem csak az elnyelési tényezők változtatásával lehet befolyásolni, alkalmaznak egyéb eszközöket (pl. fali hangvetőket) a hangutak módosítására. A legelterjedtebb teremakusztikai elemek a diffúzorok és a hangvetők: előbbi a geometriai visszaverődés helyett a beeső hangenergiát a tér minden irányába szórja, utóbbi pedig a hangutat módosítja, eltéríti a hangenergiát.

4. Az utózengési idő mérése

4.1. A megszakított zaj módszere

A **megszakított zaj módszere** (Inerrupted Noise Method, INM) egy szabványos mérési módszer, mely az MSZ EN ISO 3382 szabványcsoportban megtalálható. A módszer az utózengési idő definíciójából van közvetlenül levezetve. A hangforrás bekapcsolását követően megfelelő időn belül kialakul a térben az egyensúlyi állapot. Ezt követően a hangforrást határozottam kikapcsoljuk, és rögzítjük egy pontban a hangnyomásszint változását.

A mérést szélessávú mérőjellel, **rózsazajjal** végezzük, amelynek teljesítménysűrűsége a frekvenciával fordítottan, $1/f$ szabály szerint változik, így oktávsvonként azonos energiát tartalmaz. Az utózengési idő frekvenciafüggő mennyiség, ezért a számítás során különböző frekvenciákra szükséges meghatározni, pl. oktávsvonként.

Az egyensúlyi állapot kialakulásához szükséges idő (t_{pre}) becsülhető az egyensúlyi állapot kialakulásáig megtörtént visszaverődések számának (N) és a azok között eltelt átlagos időnek (\bar{t}) az ismeretében (ld. (7) egyenlet). A gyakorlatban az átlagos idő helyett becsülhető az **átlagos szabad úthossz** (\bar{l} , main free path), mely két visszaverődés közötti átlagos távolságot mondja meg.

$$t_{pre} = N \cdot \bar{t} = N \cdot \frac{\bar{l}}{c} \quad (7)$$

A mérések mindig zajjal terheltek, amelyek befolyásolják a mérési eredményt, mivel az alapzaj szintje minden esetben meghaladja a -60 dB-es szintet. Így a RT közvetlenül nem mérhető. A gyakorlatban a t_0 időpontot is nehéz meghatározni, így az utózengési idő mérése esetén a 5 dB-es csökkenéshez tartozó pontot (t_5) szokás referenciának választani. Ehhez az időponthoz képest szükséges meghatározni a 20 illetve a 30 dB-es csökkenéshez tartozó időpontokat (t_{25} , t_{35}). Ezeknek az értékeknek az ismeretében számítható (extrapolálható) az utózengési idő 60 dB-es csökkenéséhez tartozó értéke

$$\begin{aligned} T_{20} &= 3(t_{25} - t_5) \\ T_{30} &= 2(t_{35} - t_5). \end{aligned} \quad (8)$$

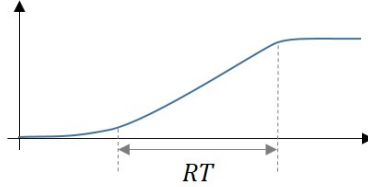
A (8) egyenletben használt jelölések mellett elterjedtek még a T_{20} , T_{5-25} típusú jelölések is.

4.2. Az impulzusválasz-alapú módszer

4.2.1. A módszer lényege

Az **impulzusválasz-alapú módszer** abból a feltételezésből indul ki, hogy egyetlen időpillanat alatt, egyetlen pontban képesek vagyunk véges sok energiát bejuttatni a térrészbe (Dirac-impulzus). Ha feltételezzük, hogy ebben a pontban diffúz volt a tér (azaz az ott kialakuló hangnyomás-idő függvény minden pontot ugyanúgy jellemez), akkor az abban a pontban felvett impulzusválasz jellegű függvény alapján meghatározható a térrészt jellemző utózenngési idő.

A módszer egyik megközelítésben a **Schroeder-integrálnak** nevezett módszer segítségével határozza meg az utózenngési időt. A Schroeder-integrál egyfajta visszafele integrálása a mért impulzusválasz ($h(t)$) négyzetének. A kapott görbe jellemzi a hangenergia csökkenését a diffúz térben.[2]



6. ábra. A Schroeder-integrál szemléltetése.

Az integrálást végre hajthatjuk a megszokott módon is:

$$E_0 = E_{\text{tot}} = \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Hasonlóképpen meg tudjuk mondani, hogy t időpillanatig mennyi energia került a szobába

$$E_t = \int_0^t h^2(\tau) d\tau, \quad (10)$$

illetve a t időpillanatban mennyi a fennmaradó energia

$$E_{\text{tot}} - E_t = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau. \quad (11)$$

A korábban ismertetett és az 5. ábrán szemléltetett lecsengési görbe pontosan a (12) összefüggés alapján számítható, mivel azt ábrázolja, hogy egy adott időpontban az összenergiához képest mennyi energia maradt a teremben. A görbe az úgynevezett **energia lecsengési görbe** (energy decay curve, EDC) az

$$\text{EDC}(t) = 10 \lg \frac{E_{\text{tot}} - E_t}{E_{\text{tot}}} = 10 \lg \frac{\int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (12)$$

összefüggéssel számolható.

A Schroeder -féle megközelítéshez képest az EDC előnye, hogy mindig a 0 dB értékről indul a kapott görbe.

A gyakorlatban impulzus-gerjesztést nem, csak impulzus-jellegű gerjesztést tudunk létrehozni. Erre szabványos módszerek a pisztoly- vagy puskalövés, és zacskópukkasztás, amelyek viszonylag nagy energiájú és széles frekvenciatartalmú impulzus-jellegű gerjesztést jelentenek.

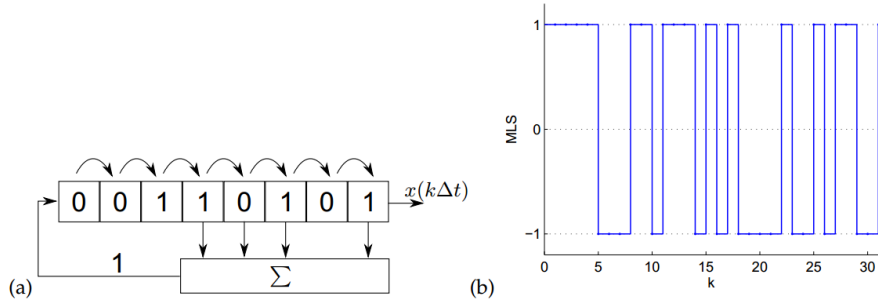
Megjegyezzük, hogy a gyakorlatban a klauzális, lineáris és időinvariáns modell feltételezés nem mindig valósul meg. Míg a kauzalitás feltétele nem sérül, nemlinearitást (torzítást) vihetnek a rendszerbe az alkalmazott eszközök. Ez a probléma kiküszöbölhető, ha megfelelő tartományban üzemeltetjük őket. Kritikusabb feltétel az időinvariánság. Abban az esetben például, ha a teremben tartózkodó személyek mozognak mérés közben, ez azt eredményezi, hogy a visszaverő-felületek mozognak, így nem tekinthető a rendszer időinvariánsnak. Az időinvariánság akkor is sérülhet, ha senki sem tartózkodik a teremben, de valamilyen okból adódóan (pl. fűtés, klíma, nyomáskülönbség) légmozgás van. Mozgó közeg nem tekinthető időinvariánsnak. Ebben az esetben az egész mérés megkérdőjelezhető.

Abban az esetben, ha az impulzusválasz függ a bemenetektől és kimenetektől, az utózenngési idő is helyfüggő lesz, ezért a szabvány megadja, hogy hány pontban kell mérni és mennyit kell átlagolni.

4.2.2. Az impulzusválasz mérése¹

Az impulzusválasz pontosabb mérésére speciális szélessávú mérőjelet, az úgynevezett maximális hosszúságú sorozatot (Maximum Length Sequence, MLS-jel) használunk.

Az MLS jel Az MLS jel úgynevezett álvéletlen jel, ami azt jelenti, hogy noha a jel determinisztikus algoritmussal generálható és ismételhető, mégis sok tulajdonsága a zajjelekre emlékeztet.



7. ábra. (a) $N = 8$ - bites MLS jel generálása. (b) $N = 5$ - bites MLS jel egy periódusa.

Az MLS jel bináris mérőjel, vagyis olyan jel, melynek értéke két állapot között váltakozik. A jel generálására alkalmas eszköz blokk-sémáját a 7(a). ábra mutatja. Az ábra egy $N = 8$ - bites léptető (shift) regisztert mutat, melynek bitjeit minden mintavételi ciklusban – vagyis Δt időközönként – eggyel jobbra léptetjük. A shift regiszter néhány bitje egy bináris összegzőbe van vezetve, melynek kimenete lesz a következő ciklusban a shift regiszter 1. bitje. A bináris mérőjel mintáit a shift regiszter utolsó, nyolcadik bitje adja. A rendszert adott kezdeti állapotba helyezve majd magára hagyva, automatikusan generálja a mérőjel mintáit.

A shift regiszter aktuális állapota egyértelműen meghatározza a következő állapotot. Ebből következik, hogy ha a shift regiszter az M -edik időlépésben visszatér a kezdeti állapotba, akkor az M -edik ütemtől kezdve a kimenő jelsorozat ismétlődik, és egy M -periodikus kimeneti jelet kapunk. A lehető legnagyobb M érték, ami előtt a shift regiszter csupa különböző állapotban megy át $M = 2^N - 1$, ahol a 2^N tag az N biten ábrázolható összes különböző érték száma, amiből ki kell vonnunk a csupa 0 bitet tartalmazó állapotot, amelyből a rendszer a konstrukcióból adódóan nem mozdul ki.

A maximális M érték a visszacsatolt bitek helyes megválasztásával érhető el, ekkor a jelet maximális hosszúságú sorozatnak (MLS - Maximal Length Sequence) hívjuk. A különböző bitszámú MLS-generátorok konfigurációja táblázatokban megtalálható, a gyakorlatban tipikusan $N = 10 - 20$ - bites MLS jeleket alkalmaznak. A 7. ábra $N = 5$ - bites MLS jel egy periódusát mutatja. A periódus hossza $M = 2^5 - 1 = 31$. Figyeljük meg, hogy praktikus okokból az MLS jel nem 0 és 1, hanem -1 és 1 értékeket vesz fel.

Az MLS jel alkalmazása az impulzusválasz mérésére Az MLS jel fontos tulajdonsága, hogy autokorrelációs függvénye² nagyon jól közelíti a diszkrét Dirac-delta függvényt. Az MLS mérőjellel elvégzett mérés után rendelkezésünkre állnak az x_k MLS-minták és a rendszer válaszában $y_k = \mathcal{H}x_k$ mintái. Határozzuk meg az $y_k \oplus x_k$ keresztkorrelációt:

$$y_k \oplus x_k = \mathcal{H}\{x_k\} \oplus x_k \quad (13)$$

A rendszer linearitása miatt a keresztkorreláció művelete bevihető a \mathcal{H} lineáris operátor argumentumába:

$$y_k \oplus x_k = \mathcal{H}\{x_k \oplus x_k\} \approx \mathcal{H}\{\delta_k\} = h_k \quad (14)$$

Vagyis az MLS jellel gerjesztett rendszer válaszában és gerjesztésének cirkuláris keresztkorrelációja megadja a rendszer $h(t)$ impulzusválaszában h_k mintáit.

¹Az alfejezet a „Elektroakusztikai eszközök mérés technikája” című mérési útmutatóból lett átvéve, melyet Hangmérnöki ismeretek tárgy hallgatói számára Fiala Péter és Rucz Péter dolgozott ki.

²pontosabban cirkuláris autokorrelációja

Az MLS-mérés lényeges előnye az impulzusszerű jellel való méréshez szemben, hogy sokkal pontosabb, és jel-zaj viszonya is lényegesen jobb, hiszen megfelelően hosszú MLS-jel választásával tetszőlegesen sok energia vihető a rendszerbe. A MLS-mérés hátránya, hogy nagyon érzékeny a torzításra. Abban az esetben, ha a torzítás jelentős, akkor seprert szinuszos mérőjelet alkalmazunk.

5. Ellenőrző kérdések

1. Mekkora a hangintenzitás különbsége két mérési pont között, ha szabad hangtérben r illetve $2r$ távolságban helyezük el őket a pontforrástól? A választ dB-ben adja meg!
2. Mennyi idővel később érkezik meg a visszavert úton a hang a forrásból a vevőbe az 1. ábra adatai alapján? Az eredményt a forrás és a vevő távolságának függvényében adja meg, feltételezve, hogy a forrás és a vevő azonosan 1 m magasságban helyezkedik el a sík fölött! (A hang levegőben való terjedési sebessége megközelítőleg $342 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$.)
3. Mit nevezünk diffúz hangtérnek?
4. Adja meg a beszéd célú hangtisztaság képletét, és értelmezze a paramétereket!
5. Adja meg a zenei célú hangtisztaság képletét, és értelmezze a paramétereket!
6. Ismertesse a Sabine-féle megközelítés lényegét!
7. Mit nevezünk utózungési időnek?
8. Adott egy $20 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ méretű terem. Mekkora a terem elnyelési képessége, ha az átlagos elnyelési tényező 10% ?
9. Becsülje meg egy $25 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ méretekkkel rendelkező üres, ideális terem utózungési idejét, ha az átlagos elnyelési tényező 10% !
10. Adja meg az egyensúlyi állapot kialakulásához szükséges időt, ha feltételezi, hogy 100 visszaverődés elegendő annak kialakulásához, és a vizsgált teremben az átlagos szabad úthossz 15 m !
11. Határozza meg az ideális Sabine-féle modellben a beszéd célú hangtisztaságot a zenei célú hangtisztaság ismeretében?
12. Hogyan változik a 9. feladatban megadott teremben a becsült utózungési idő, ha 100 ember tartózkodik benne? (Egy ember $0,5 \text{ m}^2$ ekvivalens elnyelési felülettel becsülhető.)
13. Határozza meg a beszéd célú hangtisztaságot a 9. feladatban szereplő teremhez!
14. Határozza meg a zenei célú hangtisztaságot a 9. feladatban szereplő teremhez!
15. Ismertesse a megszakított zaj módszer lényegét!
16. Ismertesse az impulzusválasz-alapú mérési módszer lényegét!
17. Mi az MLS jel?

6. Mérési feladatok

6.1. Utózungési idő becslése

1. Becsülje meg a labor utózungési idejét a Sabine-féle képlet alapján! Az átlagos elnyelési tényezőt válassza 10% -ra! Mi a becslés előnye és hátránya?
2. Becsülje meg a labor utózungési idejét a modern teremakusztikai megközelítés alapján! Milyen viszonyban van a kapott eredmény a korábban kiszámolttal? (Egy ember $0,5 \text{ m}^2$ ekvivalens elnyelési felülettel becsülhető.)

3. Mit vár, milyen viszonyban lesz a becsült és a mért eredmény? Válaszát indokolja!
4. Adjon becslést az egyensúlyi állapot kialakulásához szükséges időre!
5. Mekkora értéket vehet fel a zajszint a szobában a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa referenciaszinthez viszonyítva? Válaszát indokolja!

6.2. Utózungési idő mérése

1. Méréssel ellenőrizze a becslést! A méréshez alkalmazza a megszakított zaj módszerét!
2. Milyen viszonyban van a becsült és a mért eredmény? Ha eltérést tapasztal, mi lehet az eltérés oka?
3. Mutassa meg a mért adaton, hogy a lecsengési idő frekvenciafüggő!
4. Mérje meg a laborban az utózungési időt impulzusválasz alapú mérési módszert alkalmazva! A mérést végezze el MLS és separtszinuszos jellel is! Melyik mérésnek mi az előnye? Készítsen a célnak megfelelő szűrőt!
5. Mérje meg a lépcsőház utózungési idejét! Milyen mérési módszert alkalmazna? Miért?
6. Az előbbi módszerrel mérje meg a mélygarázs –2. szintjén az utózungési időt! Értékelje a kapott eredményeket!

Hivatkozások

- [1] SABINE, W. *Collected Papers on Acoustics*. Harvard University Press, 1922.
- [2] SCHROEDER, M. R. New method of measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America* 37, 6 (jun 1965), 1187–1188.