Elektroakusztikai eszközök méréstechnikája

Mérési útmutató a Hangtechnika tárgy hallgatói számára

A mérési útmutatót kidolgozta: Fiala Péter és Rucz Péter

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés

Jelen mérés célja, hogy megismertesse a hallgatót a stúdiótechnikában széles körben alkalmazott elektroakusztikai eszközök (hangfalak, mikrofonok) méréstechnikájával. A mérésnek nem célja az elméleti háttérismeretek mélyreható tárgyalása, viszont a feladatok megértéséhez és elvégzéséhez szükséges ezen ismeretek birtoklása.

A mérés során a mérendő rendszert lineáris, időinvariáns (LTI – Linear, Time Invariant) rendszernek tekintjük, mely feltételezés a vizsgált eszközökre igen jó közelítéssel igaz. Ezért a mérési eljárásokat illetve azok kiértékelését az LTI rendszerek mérésére alapozzuk. Emellett látni fogjuk azt is, hogy milyen mérőszámokkal jellemezhető a rendszer linearitása (pl. hangfal torzításának mérése).

A rendszer linearitása azt jelenti, hogy a rendszer bemenetének és kimenetének kapcsolata összegtartó, vagyis gerjesztések bemeneti lineáris kombinációjához a kimeneten a megfelelő válaszok lineáris kombinációja tartozik, tehát ha a rendszerünket a $\mathcal{H}$ matematikai operátorral jellemezzük és

$$\mathcal{H}\left\{x_n(t)\right\} = y_n(t), \quad n = 1, 2 \ldots N, \tag{1}$$

akkor teljesül, hogy

$$\mathcal{H}\left\{\sum_{n=1}^{N} c_n x_n(t)\right\} = \sum_{n=1}^{N} c_n \mathcal{H}\left\{x_n(t)\right\} = \sum_{n=1}^{N} c_n y_n(t). \tag{2}$$

Megjegyzés: a linearitás alatt mindig a (2) tulajdonságot értjük, és a fenti tulajdonság nem keverendő össze a frekvenciamenet egyenességével, amit tévesen szokás linearitásnak nevezni.

Az időinvariancia azt jelenti, hogy a rendszerünket jellemző $\mathcal{H}$ operátor időfüggetlen. Ebből következik, ha (1) teljesül, akkor:

$$\mathcal{H}\left\{x_n(t-\tau_n)\right\} = y_n(t-\tau_n) \quad n = 1, 2 \ldots N \tag{3}$$

vagyis a gerjesztés késleltetése esetén a hozzá tartozó válasz késleltetett választ kapjuk a kimeneten. A (2) és (3) tulajdonságok együttes teljesülése esetén LTI rendszerről beszélünk.

2. Akusztikai mérés digitális mérőrendszerrel

A jelen mérés során eszközeinket digitális mérőrendszer segítségével fogjuk vizsgálni. Ezért, a teljesség igénye nélkül, röviden áttekintjük a digitalizálással (mintavételezés az időtartományban és a jelszintek kvantálása) kapcsolatos tudnivalókat azok gyakorlati jelentősége tükrében.

A mintavételezést az időtartományban egyenközűnek tekintjük, a két mintavétel közt eltelt idő a mintavételi idő (sampling time, T_s), ennek reciproka pedig a mintavételi frekvencia (sampling frequency $f_s = 1/T_s$). A gyakorlatban a mérési időnk mindig véges, ezért az analízis során figyelembe kell vennünk, hogy a véges mérési időhöz (T) véges számú (N) minta tartozik. Az N mintából álló eltárolt sorozatot a továbbiakban regisztrátumnak nevezzük.

2.1. A mintavételezés hatása a spektrumra

Ismert, hogy az f_s frekvencián történő mintavételezés után a mintavett jel spektruma az eredeti spektrum kf_s-sel, $k \in \mathbb{Z}$ eltolt összege. Ebből kifolyólag, hogy az átlapolást elkerüljük, a mintavételi frekvenciára teljesülnie kell a mintavételi tételnek, vagyis az $f_s > 2B$ összefüggésnek, ahol B a mért jel sávszélessége. Ezt segíti elő a mintavételezés előtt beiktatott átlapolásgátló (anti-aliasing) aluláteresztő szűrő, amely $f_s/2$ frekvenciánál meredeken vág. A szűrő frekvenciamenete jó közelítéssel konstans a vágási frekvencia alatt, viszont annak közelében egyenetlenségek jelenhetnek meg, melyet a szűrő megmérése után kompenzálhatunk.

2.2. A kvantálási zaj hatása

Digitalizálás során a jel értékkészletét is diszkertizáljuk, ezt nevezzük kvantálásnak. A kvantált jelet matematikailag úgy írhatjuk le, mint az eredeti jel és a kvantálás során keletkező eltérések összegét, utóbbit kvantálási hibának nevezzük. A számunkra releváns esetek többségében a kvantálási hibát fehérzajnak tekinthetjük, melynek amplitúdója (a jó felbontású A/D konverter használatának következményeképpen) jóval kisebb a mérést terhelő egyéb elektromos zajok amplitúdójánál. A kvantálási hiba azonban jelentőssé válhat jó felbontású A/D átalakító használata esetén is, ha a csatorna kivezérlése nagyon gyenge. Ezért a kellő kivezérlésre mindig ügyelni kell, a megfelelő viszonyok biztosítására kiszajú analóg mérőerősítőt használhatunk például.

2.3. A Fourier-analízis gyakorlati kivitelezése

A Fourier-analízis során feltételezzük, hogy a gerjesztés és a válasz a mért regisztrátumok periodikus kiterjesztetése, és a periodikus függvények Fourier-sorát keressük. A Fourier-sor alapharmonikusának frekvenciája $f_1 = 1/T$, a többi frekvenciakomponens pedig ennek egész számú többszöröse, azaz

$$f_n = nf_1 = n\frac{1}{T}, \qquad n = 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{4}$$

Ezzel megkaptuk azt is, hogy adott mérési időtartam és vett regisztrátumhossz mellett milyen lesz a mérésünk frekvenciafelbontása. Mivel a legnagyobb vizsgált frekvencia értéke legfeljebb $f_s/2$ lehet, az első $N/2$ Fourier-együtthatót számítjuk ki, vagyis a $N/2$ pontban határozzuk meg az átviteli karakterisztikát az $0 \le f < f_s/2$ tartományon.

Megjegyzés: A gyors Fourier-transzformáció (FFT – Fast Fourier Transform) algoritmus alkalmazásával az együtthatók hosszú regisztrátum esetén is kellő gyorsasággal számíthatóak (az elvégzendő matematikai műveletek száma $N \cdot \log N$-nel arányos).

3. Az átviteli karakterisztika mérése

Az átviteli karakterisztika mérése során a rendszert megfelelő mérőjellel gerjesztjük, megmérjük a választ, majd a két jel alapján próbáljuk meghatározni a rendszer átviteli karakterisztikáját.

3.1. Harmonikus (keskenysávú) gerjesztés

Az amplitúdó- és fáziskarakterisztika definíciója szerint kézenfekvő, hogy gerjesztésnek adott f frekvenciájú harmonikus $x(t) = X\cos(2\pi ft + \xi)$ időfüggvényt használunk. Ekkor a rendszer válasza az $y(t) = Y\cos(2\pi ft + \eta)$ időfüggvény lesz, a rendszer átvitelét pedig az $H = Y/X$ erősítés és $\phi = \eta - \xi$ fázistolás jellemzi. Ha a mérést megfelelő számú diszkrét f_n frekvencián megismételjük, felvehetjük az átviteli karakterisztika pontjait.

A harmonikus gerjesztéssel történő mérés előnye, hogy egy frekvencián relatíve nagy energiát tudunk közölni a rendszerrel, így sok pontban elvégezve a mérést jó jel/zaj viszonyt tudunk elérni. További előny, hogy a kimenetet analizálva meg tudjuk állípatani, hogy milyen mértékű nemlineáris torzítás terheli a mérésünket. A módszer hátránya, hogy a finom felbontáshoz hosszú mérési idő szükséges, ezért a gyakorlatban csak speciális mérési feladatokra használjuk a keskenysávú mérést, a legtöbbször pedig szélessávú gerjesztést alkalmazunk.

3.2. Szélessávú gerjesztés

A rendszer linearitását kihasználva a fenti mérési módszer jelentősen gyorsítható. Megtehetjük ugyanis, hogy a különböző frekvenciájú harmonikus gerjesztéseket nem egymást követően, hanem egyszerre, összegezve (szuperponálva) adjuk a rendszer bemenetére:

$$\begin{aligned} x(t) = X_1 \cos(2\pi f_1 t + \xi_1) + X_2 \cos(2\pi f_2 t + \xi_2) \\ + X_3 \cos(2\pi f_3 t + \xi_3) + \dots \end{aligned} \tag{5}$$

Ekkor a (2) linearitási tulajdonság miatt a rendszer kimenetén a harmonikus gerjesztésekre adott válaszok összege jelenik meg.

$$\begin{aligned} y(t) = Y_1 \cos(2\pi f_1 t + \eta_1) + Y_2 \cos(2\pi f_2 t + \eta_2) \\ + Y_3 \cos(2\pi f_3 t + \eta_3) + \dots \end{aligned} \tag{6}$$

Ha a mért $y(t)$ válaszfüggvénynek meg tudjuk határozni a harmonikus összetevőit, vagyis a mérést követően ki tudjuk számítani az Y_n és η_n paramétereket (dekompozíció), akkor a $H_n = Y_n/X_n$ hányadosok és $\phi_n = \eta_n - \xi_n$ különbségek számításával egyetlen méréssel határozhatjuk meg az átviteli karakterisztika elvileg tetszőlegesen sok pontját.

A dekompozíciót a Fourier-sorfejtés segítségével oldjuk meg, amely technika pontosan a harmonikus összetevőkre bontás módszere. Eredményként megkapjuk a gerjesztés és a válasz Fourier-sorának együtthatóit, majd az azonos indexű együtthatókat elosztva a H_n én ϕ_n értékeket.

A szélessávú mérés előnye, hogy rövid idő alatt sok pontban megkapjuk az átviteli karakterisztika értékét, alkalmas mérőjel választásával több tízezer pontban kiszámítható az átviteli karakterisztika értéke akár egy néhány másodperces méréssel is. A módszer hátránya, hogy a kimeneten nem tudjuk elkülöníteni az adott frekvencián megjelenő hasznos jelet az esetlegesen megjelenő nemlineáris torzításoktól. Amennyiben a nemlineáris hatások elhanyagolhatóan kicsinyek, szélessávú méréssel is jó jel-zaj viszony érhető el. A következőekben áttekintjük a szélessávú mérésnél alkalmazott mérőjeleket és azok fontosabb tulajdonságait.

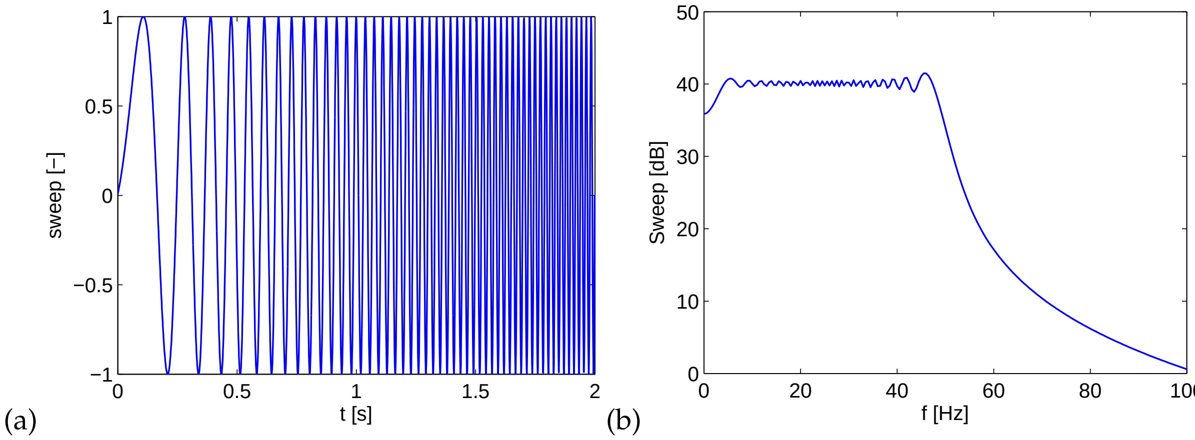
3.3. Szélessávú mérőjelek

A szélessávú méréshez alkalmas mérőjellel szemben kézenfekvő elvárás, hogy a teljes számunkra érdekes frekvenciatartományban tartalmazzon harmonikus összetevőket. Ha ez a kitétel nem teljesül, akkor a Fourier-dekompozíciót követő osztás művelete nem hajtható végre. Tipikus szélessávú mérőjelek a következők:

3.3.1. Impulzus

A Dirac-impulzus[1] Fourier-sorának minden együtthatója egységnyi, vagyis az impulzus minden frekvencia-összetevőt azonos, egységnyi súllyal tartalmaz. Az ideális Dirac-impulzus értéke $t = 0$-ban végtelen, minden más $0 < t < T$ időpontban nulla. Ilyen gerjesztőjelet a valóságban természetesen csak erős közelítéssel tudunk előállítani. Akusztikai rendszer esetén tapsjel, zacskódurrantás, ajtóbecsapás, pisztolylövés vagy robbantás hangja közelíti az Dirac-impulzust.

[1] pontosabban a periodikusan kiterjesztett Dirac-impulzussorozat



1. ábra. Sepert szinuszjel az idő- és a frekvenciatartományban. A jel frekvenciája 1 Hz és 50 Hz között változik, a pilanatnyi frekvencia lineárisan növekszik. Az (a) ábra a jel időtartománybeli lefutását, a (b) ábra az amplitúdókarakterisztikát mutatja.

Az impulzusszerű mérőjelek gyakorlati alkalmazásának hátránya az, hogy amennyiben elegendő energiát akarunk bevinni a rendszerbe egy rövid impulzussal, az impulzus amplitúdóját olyan nagyra kell választanunk, ami mellett a rendszer linearitása már sérül. Így – a linearitás megtartása mellett – a mérőjel energiája rendszerint kicsi, a mérés jel-zaj viszonya pedig alacsony lesz.

3.3.2. Léptetett és sepert szinusz

A léptetett szinuszos (stepped sine) vagy sepert szinuszos (swept sine, sweep) mérőjellel történő mérés tulajdonképpen a sok lépésben elvégzett, harmonikus mérés továbbgondolt, automatizált változatának is tekinthető.

Léptetett szinuszos mérés esetén az $x(t)$ mérőjel különböző, diszkrét frekvenciájú harmonikus függvények sorozata.

A gyakrabban alkalmazott sepert szinuszos mérőjel frekvenciája a mérés időtartama alatt folyamatosan változik, „végigsepri” a mérési frekvenciasávot. A sepert szinuszos mérőjel fontos jellemzője a sepert szinusz frekvenciakarakteriszikája, mely általában lineáris vagy exponenciális. Lineáris karakterisztika esetén a jel pillanatnyi frekvenciája az idővel lineárisan, exponenciális karakterisztika esetén pedig exponenciálisan növekszik. Utóbbival azt érjük el, hogy a jel felfutása minden oktávsávban azonos időt tölt el, vagyis oktávsávonként azonos energiát viszünk a rendszerbe. Az 1. ábra egy lineáris sepert szinuszt ábrázol.

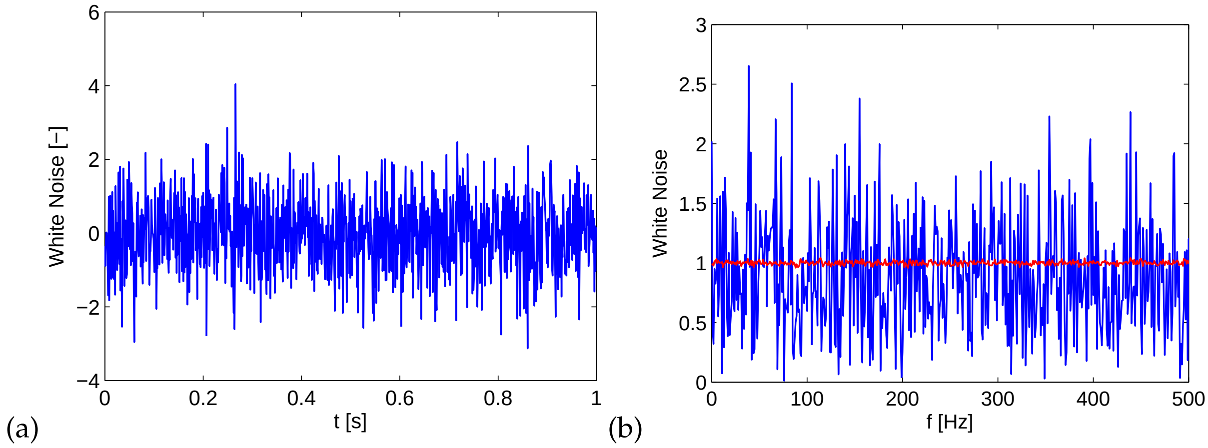
A sepert szinuszos mérés előnye az impulzusos méréssel szemben, hogy a mérőjel hossza tetszés szerint növelhető, így – megfelelően lassan változó frekvenciájú sepert szinuszt választva – elegendő energia vihető a rendszerbe minden frekvencián.

3.3.3. Zaj gerjesztés

A szélessávú mérőjelek fontos csoportját alkotják a zajjelek. Lényeges eltérés a korábbiakhoz képest, hogy míg az impulzus és a sepert szinusz determinisztikus, vagyis ismételhető gerjesztések, a zajjelek véletlenszerűek, sztochasztikusak.

A fehér zaj a Dirac-impulzus sztochasztikus megfelelőjének is tekinthető.[2] A fehér zajra ugyanis az jellemző, hogy teljesítménye egyenletesen oszlik meg a teljes frekvenciatartományon (konstans spektrális teljesítménysűrűség), vagyis tetszőlegesen megválasztott, de adott

[2] A digitális rendszerünkre jellemző $f_s/2$ sávkorlát miatt sávkorlátozott fehér zajjal dolgozunk a gyakorlatban.



2. ábra. Gaussi fehér zaj az (a) időtartományban és (b) a frekvenciatartományban.

szélességű frekvenciaintervallumba azonos zajteljesítmény esik. Pontosan ezen tulajdonsága miatt hívjuk – optikai mintára – fehér zajnak.

A mintavételezett fehér zajt általában véletlenszámgenerátorral generálják. A zajjel tökéletes fehér zaj lesz akkor, ha az egymást követő mintákat függetlenül sorsoljuk. A különböző fehér zajokat a sorsolt zajminták eloszlása szerint különböztetjük meg, tipikusan egyenletes vagy normális eloszlású (gaussi) fehér zajokat használunk.[3]

A 2. ábra egységnyi szórású gaussi fehér zajt ábrázol az idő- és a frekvenciatartományban. A frekvenciatartományi ábrán a kék görbe egyetlen zajregisztrátum Fourier-sorának X_n együtthatóit ábrázolja. Látszik, hogy a fehér zaj nemcsak az idő-, hanem a frekvenciatartományban is véletlenszerű jelleget ölt. A piros görbét úgy kaptuk, hogy egymást követő száz zajregisztrátum Fourier-sorát négyzetesen átlagoltuk. Az eredmény a zajjel teljesítménysűrűség-spektrumának közelítése, amely jól mutatja a frekvenciatartományban egyenletesen megoszló jelenergiát.

A fehér zaj mellett színes zajokat is gyakran alkalmaznak a méréstechnikában. Akusztikai alkalmazásokban igen gyakori a rózsazaj, amelynek teljesítménysűrűsége a frekvenciával fordítottan, $1/f$ szabály szerint változik, illetve a vörös zaj, melynek teljesítménysűrűsége az $1/f^2$ szabálynak engedelmeskedik. A rózsazaj – az exponenciális sweep jelhez hasonlóan – oktávsávonként tartalmaz azonos energiát.

4. A rendszer időtartománybeli jellemzése

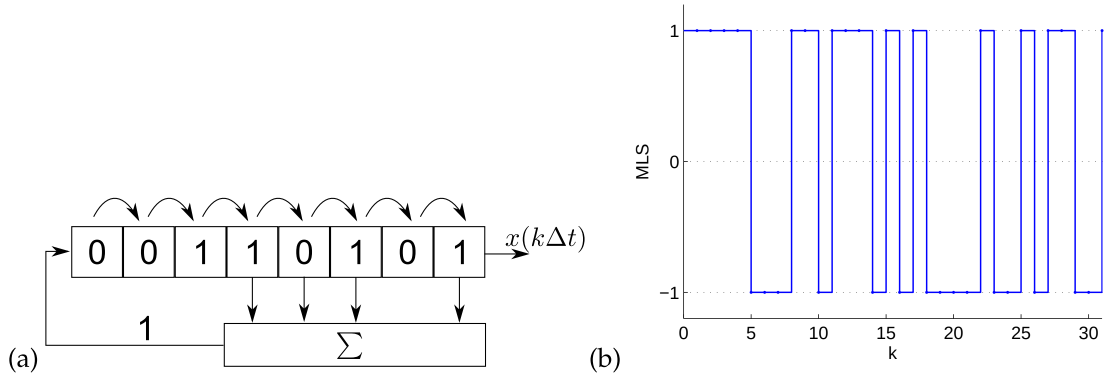
Mindeddig a lineáris rendszer frekvenciatartománybeli átvitelének mérésével foglalkoztunk. A továbbiakban olyan technikával ismerkedünk meg, ami a rendszer időtartománybeli leíró jellemzőjének mérésére szolgál.

A lineáris időinvariáns rendszer legfontosabb időtartománybeli jellemzője a $w(t)$ impulzusválasz, ami nem más, mint az $x(t) = \delta(t)$ Dirac-impulzus gerjesztésre adott $y(t)$ válasz. Az impulzusválaszt gyakran súlyfüggvénynek (weight function) is hívják, innen a w jelölés.

Amint azt láttuk, a Dirac-impulzussorozat Fourier-sora az azonosan egy függvény, ezt továbbgondolva könnyen belátható, hogy az impulzusválasz Fourier-sora a rendszer átviteli karakterisztikája lesz:

$$\mathcal{F}\{w(t)\} = H_n. \tag{7}$$

[3]A megvalósíthatóság szempontjából érdemes figyelembe venni, hogy az egyeneletes eloszlás sűrűségfüggvénye véges tartójú, míg a normális eloszlásé végtelen. Így, az utóbbinál ügyelnünk kell arra, hogy ne vezéreljük túl a rendszerünket egy, a várható értéktől távol eső sorsolt minta esetén.



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

Az impulzusválasz és az átviteli karakterisztika egyenértékű, ekvivalens rendszerleíró függvények; az egyik mérése után a másik könnyen számítható.

5. Az impulzusválasz mérése

Az impulzusválasz közelítő mérésére alkalmas a 3.3.1. fejezetben említett, impulzusszerű gerjesztéssel dolgozó mérési módszer. Az impulzusválasz pontosabb mérésére speciális szélessávú mérőjelet, az úgynevezett maximális hosszúságú sorozatot (Maximum Length Sequence, MLS-jel) használunk.

5.1. Az MLS jel

Az MLS jel ún. álvéletlen jel, ami azt jelenti, hogy noha a jel determinisztikus algoritmussal generálható és ismételhető, mégis sok tulajdonsága a zajjelekre emlékeztet. Az MLS jel bináris mérőjel, vagyis olyan jel, melynek értéke két állapot között váltakozik. A jel generálására alkalmas eszköz blokksémáját a 3(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 állapoton 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 3. 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.

5.2. Az MLS jel alkalmazása az impulzusválasz mérésére

Az MLS jel fontos tulajdonsága, hogy autokorrelációs függvénye[4] nagyon jól közelíti a diszkrét Dirac-delta függvényt. Az MLS mérőjellel elvégzett mérés után rendelkezésünkre állnak az x_k MLS-minták és a rendszer válaszának $y_k = \mathcal{H}\{x_k\}$ mintái. Határozzuk meg az $y_k \oplus x_k$ keresztkorrelációt:

$$y_k \oplus x_k = \mathcal{H}\{x_k\} \oplus x_k \tag{8}$$

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

$$y_k \oplus x_k = \mathcal{H}\{x_k \oplus x_k\} \approx \mathcal{H}\{\delta_k\} = w_k \tag{9}$$

Vagyis az MLS jellel gerjesztett rendszer válaszának és gerjesztésének cirkuláris keresztkorrelációja megadja a rendszer $w(t)$ impulzusválaszának w_k mintáit.

Az MLS-mérés lényeges előnye az impulzusszerű jellel való méréssel szemben, hogy sokkal pontosabb, és jel-zaj viszonya is lényegesen jobb, hiszen megfelelően hosszú MLS-jel választásával tetszőlegesen sok energia vihető a rendszerbe.

A gyakorlati alkalmazások során természetesen az MLS-mérést is átlagolással végezzük. Mivel determinisztikus mérőjellel dolgozunk, az átlagolásnál egyszerűen a rendszer $y_k^{(m)}$ kimeneteit átlagoljuk, és az átlagolt kimeneten végezzük el a keresztkorreláció műveletét.

6. A mérési zaj és kiküszöbölése

6.1. Átlagolás alkalmazása

A mérések mindig zajjal terheltek. A zajok származhatnak a mérőműszerekből (elektronikus alkatrészek termikus zaja) és a mérendő objektumtól független környezeti tényezőktől (zajos környezetben végzett akusztikai mérés). A mérendő rendszertől független zajok kiküszöbölésének egyszerű és hatásos módja az átlagolás, mely során a mérést K-szor megismételjük, és a mért mennyiségeket átlagoljuk. A mért rendszertől független véletlen zajforrás zajteljesítménye K-szori átlagolás után $1/K$-ad részre csökken.

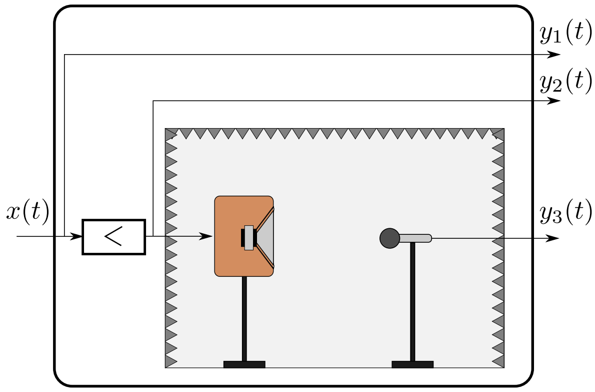
Az átlagolás során különböző módon kell kezelni a determinisztikus és a sztochasztikus mérőjelek eseteit. Determinisztikus mérőjel esetén elegendő ha a mérendő rendszer $y^{(k)}(t)$ kimeneteit átlagoljuk, és előállítjuk az

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} y^{(k)}(t) \tag{10}$$

átlagos kimenetet. Itt az $y^{(k)}(t)$ jelölés az k-edik mérés során kapott kimenő jelet jelöli. Ezután a Fourier-analízist az $\bar{y}(t)$ jelen hajtjuk végre, és minden ugyanúgy történik, mint az átlagolásmentes esetben.

Sztochasztikus mérőjel esetén a gerjesztő jel is változik mérésről mérésre. Ezért az $x^{(k)}(t)$ és $y^{(k)}(t)$ időfüggvények átlagolása itt nem megengedhető. Az időtartománybeli jelek átlagolása helyett minden egyes mérésnél elvégezzük a Fourier-analízist, előállítjuk a $\tilde{H}_n^{(k)}$ átviteli karakterisztika mintákat, és az átlagolást az átviteli karakterisztikán hajtjuk végre. A mérés számításigénye nagyobb, mint determinisztikus mérőjel alkalmazása esetében, hiszen a Fouriersorfejtést minden egyes mérés után el kell végezni.

[4]pontosabban cirkuláris autokorrelációja



4. ábra. A mérendő rendszer

6.2. A koherencia

A (spektrális) koherencia egy olyan statisztikai jellemző, amelyet két időfüggvény kapcsolatának jellemzésére alkalmazunk. Az $x(t)$ és $y(t)$ jel közötti spektrális koherenciát a következő összefüggéssel definiáljuk:

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}, \tag{11}$$

ahol S_{xy} az $x(t)$ és $y(t)$ keresztspektruma (keresztkorrelációs függvényük Fourier-transzformáltja), S_{xx} és S_{yy} pedig az előbbi jelek teljesítménysűrűség spektrumai (autokorrelációs függvényeik Fourier-transzformáltja). Lineáris rendszert feltételezve a koherencia megadja, hogy $y(t)$ milyen mértékben (milyen jósággal) határozható meg $x(t)$ függvényében a legkisebb négyzetek (LS – least squares) módszerrel történő lineáris regresszióval. Másképp fogalmazva a koherencia értéke az LS lineáris regresszió determinációs együtthatója.

A koherencia értéke $0 \leq C_{xy} \leq 1$ között változhat. Maximális koherenciaérték esetén a rendszerünk tökéletes lineáris rendszerként viselkedik az adott frekvencián, a mérési zajunk pedig elhanyagolhatóan kicsiny. Ha a koherencia értéke zérushoz közeli, abból arra következtethetünk, hogy az adott frekvencián a rendszerünk nem tekinthető lineárisnak, vagy a jel-zaj viszonyunk nagyon rossz. Utóbbi esetben meg kell gondolnunk, hogy mely körülmények befolyásolják a mérésünket, illetve hogyan lehetne ezek megváltozásával javulást elérni.

7. A mérendő rendszer

A laboratóriumi gyakrorlat során több eszköz mérését is el fogjuk végezni. A mérések alapvető elrendezését (azaz a mérendő lineáris rendszert) a 4. ábra mutatja. A rendszer egy hangfrekvenciás teljesítményerősítőből (HiFi erősítő), valamint egy (fél)szabad hangterű mérőszobában elhelyezett hangsugárzóból és mikrofonból áll. A rendszer $x(t)$ bemenete az erősítő bemenő feszültsége. A rendszer kimenetét három különböző ponton vizsgáljuk. Az $y_1(t)$ kimenet az ún. egységrendszerhez tartozik, melynek bemenete megegyezik a kimenetével. Ez a kimenet visszacsatolásként szolgál, valamint információt ad a mérőrendszerünk belső viselkedésével (átlapolásgátló szűrű átviteli karakterisztikája, jel/zaj viszony stb.) kapcsolatosan. Az $y_2(t)$ kimenet az erősítő kimenő feszültsége, az $y_3(t)$ kimenet pedig a mikrofon kimenő feszültsége. A továbbiakban a mérés során elvégzendő feladatokkal kapcsolatos tudnivalókat tekintjük át.

8. A mérőmikrofon kalibrációja

A mikrofonra mint méréstechnikai eszközre elektroakusztikai átalakítóként tekintünk, mely a vett hangnyomásjelet kimenő feszültségjellé alakítja. A mikrofon legfontosabb specifikáló mérőszáma az érzékenysége, amit a leadott feszültségszint effektív értékének és a mért hangnyomásszint effektív értékének hányadosával jellemzünk.

$$e_{\mathrm{mikr}} = \frac{u_{\mathrm{eff}}}{p_{\mathrm{eff}}} \qquad \left[\frac{\mathrm{mV}}{\mathrm{Pa}}\right] \tag{12}$$

A mikrofon érzékenysége is frekvenciafüggő, a frekvenciamenet kifejezés alatt a továbbiakban a mikrofonokra vonatkozólag az érzékenység frekvenciafüggését értjük. A katalógusban megadott érzékenységérték mellett fel szokás tüntetni a kalibrációs frekvenciát is.

Validációs mérésekhez precíziós kondenzátormikrofonokat alkalmazunk, melyek frekvenciamenete jó közelítéssel konstans a teljes audiotartományon. Ezek a mikrofonok 5–$10\,\mathrm{Hz}$-től 20–$25\,\mathrm{kHz}$-ig egyenes átvitellel bírnak, az ingadozás mértékét az adatlapon szokás megadni, tipikusan ± 0.5, $\pm 1\,\mathrm{dB}$ a teljes tartományra.

A mikrofon érzékenysége megváltozhat a hőmérséklet vagy a páratartalom hatására, ezért a mérés elvégzése előtt kalibráljuk a mikrofont. A kalibrátor egy kis üregben – melyet tökéletesen lezárunk a mikrofon membránjával – állít elő megadott hangnyomásszintet, egy frekvencián. Laboratóriumunk mérőmikrofonjainak érzékenysége tipikusan 20 és $30\,\mathrm{mV/Pa}$ között van, típusfüggően.

Mivel a mérőmikrofon frekvenciamenetének ingadozása igen alacsony, ezért a kalibrációs frekvencián mért érzékenységet a teljes tartományon elfogadjuk, további mikrofonok mérésénél azt referenciának tekiktjük.

9. Hangfal érzékenységének mérése

A mikrofonnál leírtakhoz hasonlóan, az érzékenység vizsgálatakor a hangszórót (hangfalat) elektroakusztikai átalakítónak tekintjük, melynek érzékenységét az egységnyi felvett elektromos teljesítmény mellett leadott hangnyomásszint határozza meg. Mivel ez a hangnyomásszint a hullámterjedés tulajdonságai miatt (közelítőleg gömbhullámú terjedés) erősen távolságfüggő, az $1\ \mathrm{m}$ távolságra vonatkozó szintet adjuk meg.

$$e_{\mathrm{hsz}} = p_{\mathrm{eff}} \quad [\mathrm{dBSPL@1\ m, 1\ W}] \tag{13}$$

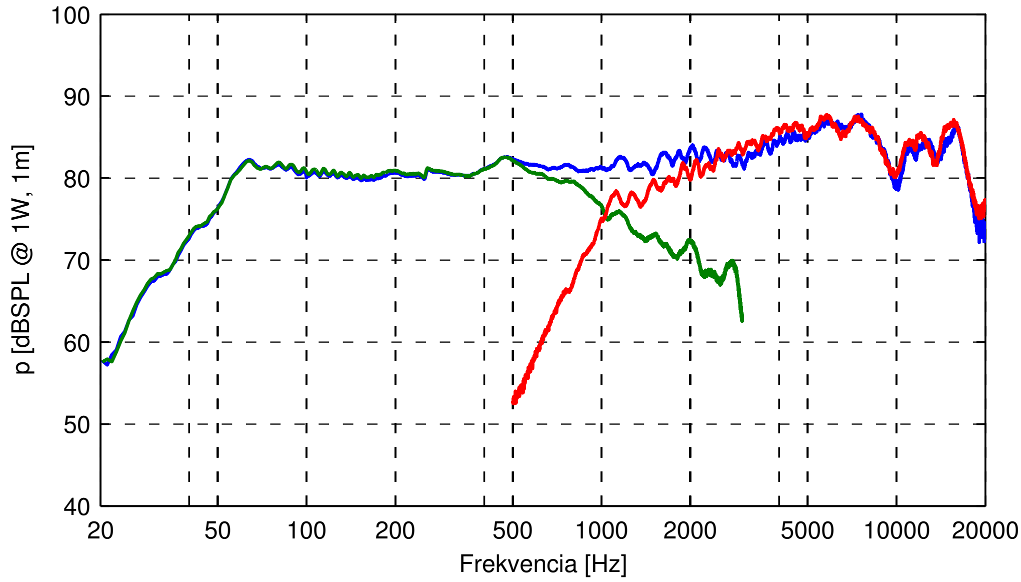
Az érzékenység frekvenciamenetetét logaritmikus frekvencia- és amplitúdóskálákon szokásos ábrázolni. Kétutas hangfal frekvenciamenete látható az 5. ábrán. Külön látható a magas- és mélysugárzók, valamint a teljes, kétutas rendszer érzékenysége. Érdemes megfigyelni a keresztezési frekvencia környékén a rendszer viselkedését.

10. Hangfal torzításának mérése

10.1. A harmonikus torzítás

A torzítást a teljes harmonikus torzítás (THD – Total Harmonic Distortion) mutatóval adjuk meg. A THD megadja a felharmonikusok összeteljesítményét az alapharmonikus teljesítményéhez képest.

$$\mathrm{THD} = \frac{\sum\limits_{k=2}^{N} X_k^2}{X_1^2}, \tag{14}$$



5. ábra. Kétutas hangfal érzékenységének frekvenciafüggése szabad süketszobai méréssel meghatározva. — Együttes átvitel. — Mélysugárzó. — Magassugárzó.

ahol X_k a k-adik felharmonikus amplitúdója. A szummázás felső korlátját szokásosan $N = 5 \dots 10$ érték között állítjuk be.[5] A (14) képlet eredménye egy dimenziótlan mennyiség, általában százalékban, vagy dB-ben szokásos megadni az értékét. A THD érték mellett még szokásos megadni a THD$_n$ (THD + noise) értéket, ahol a felharmonikusok teljesítményéhez a szélessávú zajteljesítményt is hozzávesszük.

Fontos megjegyezni, hogy a THD egy hangszóró esetében frekvencia- és teljesítményfüggő mennyiség, ezért az adatlapon feltüntetett THD értéket egy megadott referencia teljesítmény mellett kell megadni. (Pl. THD $< 1\%@1$ W, 20 Hz $- 20$ kHz)

10.2. A mérés menete

A torzítás méréséhez szinuszos mérőjelet kell alkalmaznunk. (Szélessávú mérőjellel mérve nem tudnánk elkülöníteni a kimeneten mért szélessávú jelben az egy frekvenciához tartozó felharmonikusokat a megegyező frekvenciájú hasznos jeltől.)

Kis torzítású rendszerek vizsgálata esetén ügyelnünk kell arra, hogy a digitalizálás során bevitt kvantálási hiba teljesítménye egy nagyságrendbe eshet a harmonikus torzítás teljesítményével. Ezért a mintavételezés során arra törekszünk, hogy a kvantálási hiba minél inkább zajszerű legyen, amit akkor közelítünk meg legjobban, ha minden mintát a harmonikus jel más és más fázisában veszünk. Ekkor teljesül, hogy

$$f_i = \frac{J}{M} f_s \qquad J, M \in \mathbb{Z}^+ \qquad (J, M) = 1, \tag{15}$$

ahol f_i a mérési frekvenia, f_s a mintavételi frekvencia, J a vett periódusok száma, M pedig az egy regisztrátumban lévő minták száma. (A jobboldali kifejezés azt jelenti, hogy J és M legnagyobb közös osztója 1, vagyis J és M relatív prímek, e feltétel teljesülése biztosítja a mintánként eltérő fázist.) Megjegyzés: azzal, hogy J egész szám biztosítjuk a koherens mintavételezést, ami azt jelenti, hogy a regisztrátumunk egész számú periódust tartalmaz a jelből. A koherens mintavételezés nem tévesztendő össze $(J, M) = 1$ által megadott követelménnyel.

[5] A THD megadására szokásos még alkalmazni a $\frac{\sum_{k=2}^{N} X_k^2}{\sum_{k=1}^{N} X_k^2}$ a képletet, ez annyiban különbözik a fentitől, hogy itt a torzítás teljesítményét a teljes harmonikus teljesítményhez viszonyítjuk. Ekkor a THD maximális értéke 1.

Ahhoz, hogy egy tartományban sok frekvencián meg tudjuk vizsgálni a rendszer teljes harmonikus torzítását, (15) értelmében esetleg változtatnunk kell M értékét is, vagyis a regisztrátum hossza nem lesz állandó a mérés során, hanem az előre megadott értékhez képest bizonyos határok között ingadozni fog a különböző frekvenciákon.

11. Hangfal iránykarakterisztikájának mérése

A hangfal egyik fontos jellemzője érzékenységének irányfüggése. Mivel az audiotartomány nagy hullámhossztartományt is átfog, mérésünk során a frekvencia változásával a hangfal közelében a hullámterjedési viszonyok is jelentősen változnak. Míg a kisfrekvenciás, nagy hullámhosszú hanghullámok számára a hangsugárzó doboza gyakorlatilag „átlátszó", addig kis hullámhossz mellett, nagyfrekvencián jelentős visszaverődéseket tapasztalhatunk a hullámhosszal összemérhető méretű dobozról. Ezért a hangfal kis frekvencián jó közelítéssel gömbsugárzónak tekinthető, míg nagy frekvencián erősen irányított sugárzóként viselkedik.

Az iránykarakterisztika egy kényelmes mérési módja a forgóasztal használata. A forgóasztal megadott T_p periódusidővel (laborunk forgóasztala esetében ez 90 másodperc) forog körbe. Így, ha K pontban szeretnénk mérni az iránykarakterisztikát, akkor egy mérés legfeljebb T_p/K ideig tarthat, ami meghatározza a frekvenciafelbontást is. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a T_p időkorlát által a frekvencia- és a szögfelbontás finomságának szorzata konstans.

Az iránykarakterisztika természetesen meghatározható megfelelően sok pontban elvégzett frekvenciamenet-méréssel is. Ekkor a felbontást (elvileg) tetszőlegesen finomra vehetjük a frekvencia- és a szögtartományban is.

Az iránykarakterisztikát a legtöbbször polárdiagramon szokás megadni, ahol a $0°$-os főirányra normalizált értékeket ábrázolunk. A frekvenciafüggés érzékeltetése érdekében a katalógusben különböző frekvenciákon ábrázolják a karakterisztikát.

Elsősorban többhangszórós hangfalaknál meg szokás adni a térbeli iránykarakterisztikát is, erre itt nem térünk ki.

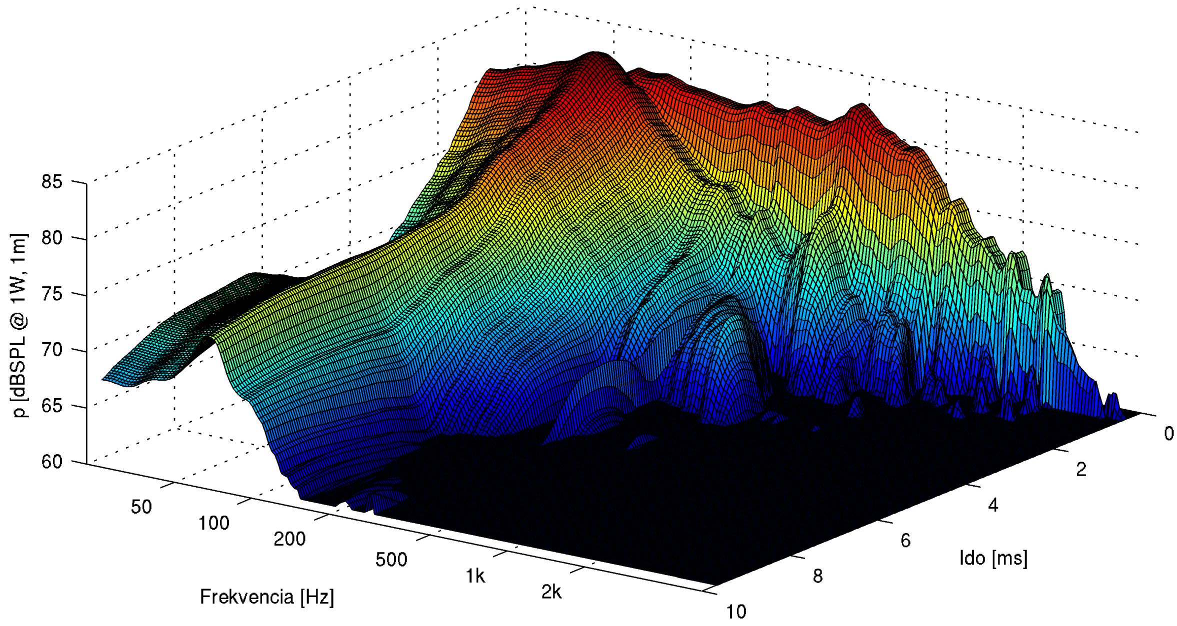
12. Hangfal vízesésdiagramjának számítása

A vízesésdiagram kedvelt ábrázolási módja az impulzusválasz energia-lecsengésének. A diagramot az impulzusválasz analízisével számítjuk ki, és egyszerre ábrázoljuk rajta a frekvencia- és az időtartományt. Így egy háromdimenziós felületet kapunk, melyen a z koordinátán ábrázoljuk az adott idő és frekvenciaponthoz tartozó amplitúdót. Mivel a rendszerünk stabilis, az impulzusválaszunk lecsengő jellegű, így vízeséshez hasonló felületet kapunk, innen a vízesésdiagram elnevezés.

A spektrogramhoz hasonlóan a számítás lényege, hogy az impulzusválaszból megfelelő ablakfüggvénnyel[6] súlyozva időszeleteket veszünk, majd az egyes szeleteken végrehajtva a Fourier-analízist, megkapjuk az adott időszelethez tartozó spektrumot. Lényeges különbség a spektrogram számításához képest, hogy míg előbbinél az időszeletek mintaszáma (hossza) egyforma, addig a vízesésdiagram számításánál egyre rövidülő időszeletekkel végezzük el a számítást. (Az első időszelet a teljes impulzusválaszt tartmalmazza, majd minden egyes lépésnél az időablak kezdőpontját toljuk tovább, míg az ablak végpontját változatlanul hagyjuk.)

Mérésünk során frekvenciaszelektív ablakfüggvényt (ún. Gábor-waveletet – Gábor Dénes után) alkalmazunk, mellyel az adott időszelethez tartozó függvényt megadott középfrekvencián és megadott sávszélességgel (pl. $1/12$ vagy $1/24$ oktávsáv) szűrjük. A sávközépi frekvencia megfelelő változtatásával előállítjuk a Gábor-szűrőket, majd az egyes szűrt jelek energiátartal-

[6]Az ablakfüggvény megfelelő megválasztása szükésges az oldalnyalábok kellő elnyomásához, valamint frekvenciaszelektív ablakozás esetén az adott frekvenciasávba eső jelenergia pontos megállapításához.



6. ábra. Mélysugárzó vízesésdiagramja.

mát ábrázoljuk az adott időszeletre, sávonként. Így kapjuk meg a frekvenciafüggő energialecsengést.

A vízesésdiagramról leolvasható a hangfal lecsengésének gyorsasága az egyes frekvenciákon. Megfigyelhető, hogy a hangfal rezonanciafrekvenciájának közelében a lecsengés sokkal lassabb, mint egyéb frekvenciákon. Más frekvenciasávokban is megjelenhetnek ingadozások, pl. a mérőhelyiségben megjelenő nemkívánatos reflexiók hatására. Egy mélysugárzó vízesésdiagramja látható a 6. ábrán. Jól látható, hogy a lecsengés sokkal lassabb a 60 Hz környékénél lévő rezonanciafrekvenián. A $t = 0$ időponthoz tartozó felszín pedig az átviteli karakterisztikával egyezik meg.

13. Mikrofonok jellemzése

A membrán síkjára merőleges, a membrán középpontján áthaladó egyenes a mikrofon főtengelye. Főirányból érkezik a hang, amikor a főtengellyel párhuzamosan, elölről éri a membránt. Az érzékenységet vizsgálhatjuk főirányban a frekvencia függvényében, ezt nevezzük a mikrofon frekvenciamenetének. Egy rögzített frekvencián, a beeső hang irányának függvényében mért érzékenységgörbe a mikrofon iránykarakterisztikája.

A mikrofonok akusztikai működésük alapján két nagy csoportba oszthatók: nyomás- és nyomásgradiens-mikrofonokra. A nyomásmikrofonokra gömb, a gradiens mikrofonokra térbeli nyolcas iránykarakterisztika a jellemző. A két akusztikai alaprendszer kombinációjából származik a kardioid iránykarakterisztika.

Ha a mikrofon membránjának méretei a hullámhosszhoz képest kicsik, akkor a zárt konstrukciójú nyomásmikrofon iránykarakterisztikája gömbi, hiszen a viszonyok függetlenek a mikrofon főtengelyének a beeső hang irányával bezárt szögétől. Ha a membrán hátulról teljesen nyitott, mozgását az elő- és hátoldal között kialakuló nyomáskülönbség határozza meg. Ilyen felépítésű a szalagmikrofon, ahol az érzékelő membrán egy vékony fémszalag. Könnyen belátható, hogy ebben az esetben a membrán síkjával párhuzamosan beeső hanghullám a membrán két oldala között nyomáskülönbséget nem hoz létre, tehát a mikrofon ebben az esetben nem ad kimenő jelet. Az ilyen mikrofont nyolcas karakterisztikájúnak hívjuk. A harmadik eset a kardioid mikrofon esete, a nyomás és a nyolcas karakterisztikájú mikrofon keveréke, amely a zárt konstrukciójú nyomásmikrofon hátsó falának megnyitásával és fázistoló akusztikai hálózat beiktatásával kapható.

Kardioid mikrofonok esetén a jellemzők közt gyakran csak az úgynevezett előre-hátra viszony szerepel, amely az elölről illetve a hátulról mért érzékenység aránya dB-ben kifejezve. Természetesen ez a mennyiség is frekvenciafüggő.

14. Mérési feladatok

14.1. A mérőrendszer megismerése és a teljesítményerősítő mérése

Kösse a mérőrendszer $x(t)$ kimenetét a teljesítményerősítő bemenetére, majd az erősítő bemenetéről ágaztassa le az $y_1(t)$ jelet a mérőrendszer egyik bemenő csatornájára. A mérőerősítő $y_2(t)$ kimenetét kösse a mérőrendszer egy másik bemenő csatornájára. A Channel Setup modulban állítsa be a két kiválasztott csatornát előerősítés nélküli feszültségmérésre, majd lépjen be a Transfer modulba.

1. Gerjessze a rendszert harmonikus mérőjellel. Figyelje meg az $x(t)$ és $y_i(t)$ jelalakokat, állítsa be a gerjesztés szintjét és az erősítő erősítését úgy, hogy a rendszer lineáris üzemmódban működjön. (Megjegyzés: nemlinearitást figyelhetünk meg például akkor, ha a rendszer valamelyik bemenetét túlvezéreljük.)

2. Állítsa be a mintavételi frekvenciát és a jelregisztrátumok mintaszámát úgy, hogy a mérési idő legalább 2 s legyen. Mérje meg harmonikus mérőjellel az erősítő átvitelét a $10\ \mathrm{Hz} - 10\ \mathrm{kHz}$ tartományban, oktávonként egy frekvenciaértéken.

3. Mérje meg a rendszer átviteli karakterisztikáját sepert szinuszos mérőjellel, átlagolás nélkül. Figyelje meg, mi történik, ha a rendszert az $1\ \mathrm{Hz} - 25\ \mathrm{kHz}$ tartományon vizsgálja, de a sepert szinusz csak az $1\ \mathrm{Hz} - 1\ \mathrm{kHz}$ frekvenciatartományt futja be. Magyarázza meg az átviteli karakterisztikén és az impulzusválaszon tapasztaltakat.

4. Vizsgálja meg az átlagolás hatását. Hogyan változik a rendszer átvitele és impulzusválasza, ha az átlagok K számát növeli?

5. Mérje meg a rendszer átvitelét szélessávú fehér zaj gerjesztéssel átlagolás nélkül. Gondolja végig és indokolja meg, hogy miért szükséges a mérés során legalább egy előgerjesztési ciklust alkalmazni!

6. Vizsgálja meg az átlagolás hatását a zajszerű gerjesztés esetében.

7. Vizsgálja meg a rendszer átvitelét színes zaj gerjesztéssel. Próbálja ki a lila, kék, rózsa- és vörös zaj gerjesztéseket. Mit tapasztal az átviteli karakterisztika és az impulzusválasz alapján?

14.2. A hangfal átvitelének mérése

A hangfal átvitelét közvetlenül mérni nem tudjuk, csak a hangfal és a mérőmikrofon együttes átvitelét. Szerencsére a mérőmikrofon átvitele egyenletesnek tekinthető a teljes hangfrekvenciás tartományban, így beiktatása csak egy konstans szorzót (a mikrofon érzékenysége) jelent a rendszer átvitelében. Kalibrálás után a mérőrendszer a mikrofon jelét már közvetlenül pascalban méri.

Csatlakoztassa a mérőmikrofon kimenetét a mérőrendszer egy harmadik bemenő csatornájára. A Channel Setup modulban állítsa be a kiválasztott mikrofont.

1. Végezze el a mérőmikrofon kalibrálását a Calibration modulban. Vesse össze a névleges és mért értékeket! Milyen mértékű eltérés tapasztalható és mi lehet a különbség oka?

2. Mérje meg a hangfal átvitelét harmonikus mérőjellel a $50\ \mathrm{Hz} - 20\ \mathrm{kHz}$ tartományban, oktávsávonként (a sávközépi frekvenciákon). Hogyan befolyásolja az erősítő átvitele a mért eredményt? Határozza meg a hangfal érzékenység frekvenciamenetének pontjait.

3. Mérje meg a hangfal frekvenciamenetét és impulzusválaszát az $1\ \mathrm{Hz} - 25\ \mathrm{kHz}$ tartományban szélessávú gerjesztéssel. Elemezze és értelmezze az impulzusválasz szakaszait!

4. Mérje meg a hangfal teljes harmonikus torzítását, a $50\ \mathrm{Hz} - 5\ \mathrm{kHz}$ tartományban, 30 pontban, különböző bemenő elektromos teljesítmények mellett? Mit tapasztal? Mi látható a THD_n viszonylatában?

5. Mérje meg a hangfal frekvenciafüggő iránykarakterisztikáját. A mérést több lépésben végezze úgy, hogy a hangfalat $5°$-os felbontással elforgatja $0°$-os állásból $180°$-os állásig. Minden pozícióban mentse el a hangfal átvitelét, majd a mérés elvégzése után ábrázolja Matlabban az iránykarakterisztikát a rendelkezésre álló programkóddal!

6. Készítsen egy minél pontosabb impulzusválasz mérést, majd mentse el az eredményt. Ábrázolja a vízesésdiagramot Matlabban az előre elkészített programkóddal!