

INF

Infrahang vizsgálata

1. Bevezetés

A hidegháború legnagyobb veszélye egy nukleáris háború kitörése volt. A két szembenálló fél (NATO illetve Varsói szerződés tagállamai) eleinte a **MAD** (*Mutually Assured Destruction* – garantált kölcsönös megsemmisítés) doktrínára alapozta stratégiáját. Ennek megfelelően a katonai kutatások fő célja minél pusztítóbb és minél kompaktabb nukleáris fegyverek kifejlesztése volt.

Az erőfeszítések minden épeszű határon túli sikerrel jártak. Pletykák szerint egy amerikai elnök megtudta, hogy a harmadik világháború kitörése esetén egy általa véletlenszerűen kiválasztott városra ötször annyi bombát dobnának le, mint a teljes elpusztításához szükséges lenne. Ez annyira sokkolta, hogy ennek az örületnek mindenáron véget akart vetni.

Elkezdődtek a fegyverzetkorlátozási tárgyalások, melyek fő célja a nukleáris fegyverek számának korlátozása és fokozatos leépítése volt. Szintén cél volt a további fejlesztések (még pusztítóbb, még könnyebben célba juttatható fegyverek) megakadályozása. Ennek egyik kulcsa a kísérleti robbantások azonnali betiltása volt.

Legalább ilyen fontos cél volt új nukleáris hatalmak megjelenésének megakadályozása. Az “atomklub” tagok (Szovjetunió, USA, Franciaország, Anglia) szerződést írtak alá, ami szerint a nem atomhatalmaknak nukleáris technológiát semmilyen formában nem adnak át, míg a nem nukleáris hatalmak nagy része (például Magyarország, de Irak is) vállalta, hogy ilyen katonai fejlesztéseket nem fog folytatni.

Természetesen hiába kötnek a nagyhatalmak szerződést bármiről, ha a szerződés betartását nem lehet ellenőrizni. Természetesen a fő eszközt a “kémek” és a hivatalos ellenőrök jelentik, de jelentős erőfeszítések történtek a szerződésellenes tevékenység technikai monitorozására is.

Ez a labormérés egy ilyen eszközön alapul, amit a Los Alamos National Laboratory (az USA két fő nukleáris fegyverkutató központjának egyike) fejlesztett ki nukleáris kísérleti robbantások észlelésére nagy távolságból. Az eszköz egy (akár föld alatti) robbantás keltette alacsonyfrekvenciás hanghullámok érzékelésén alapul, melyek akár más kontinensről is “hallhatók”.

Az eszközt az EGRG (Eötvös Gravity Research Group – több magyar egyetem és kutatóintézet összefogása) fejlesztette tovább békés célra: A LIGO egy majdnem 50 nemzetközi kutatóintézet és egyetem összefogása gravitációs hullámok kimutatására. A kísérlet lényegében a klasszikus Michelson interferométeren alapul, de annyira továbbfejlesztve, hogy az egymástól 4 kilométerre levő tesztömegek ezred protonnyi elmozdulását is képesek vagyunk mérni. Természetesen óriási kihívás a környezeti zavarok kiszűrése. Ezen zavarok egyike a hang. Ennek figyelésére fejlesztettük ki a labormérésben szereplő alacsonyfrekvenciás mikrofont.

A labormérés ennek megfelelően szakít a laborok hagyományával. Nem *egy* jelenség szemléltetésére készül *egy* kísérlet, hanem egy valós kísérletet mutatunk be, aminek során sok jelenséget kell megérteni. A laborban szereplő eszköz a LIGO számára épített alacsonyfrekvenciás mikrofonok prototípusának egyike, melynek egy mása jelenleg Hannoverben (GEO-600) működik és hamarosan üzembehelyezünk továbbiakat Hanfordban és Livingstone-ban is.

2. Hang alapismeretek

A hang a levegőben terjedő longitudális nyomáshullám (gázban nincsenek nyíró erők, így transzverzális hullámok nem tudnak kialakulni). A hang terjedési sebessége a *közeghez képest* állandó (de természetesen függ a közegtől, hőmérséklettől, páratartalomtól, stb.). A hullámteret a nyomáson keresztül le tudjuk írni, azaz a $p(\mathbf{x}, t)$ függvényt fogjuk használni, \mathbf{x} a helykoordináta, t az eltelt idő.

Síkhullám esetén ennek alakja $p(\mathbf{x}, t) = p_0 \sin(2\pi \mathbf{x} \cdot \mathbf{n} / \lambda + t\omega + \varphi_0)$, ahol \mathbf{n} a terjedési irányba mutató egységvektor, λ a hullámhossz, ω a körfrekvencia, φ_0 a kezdő fázis.

Ha a síkhullám az x-tengely irányában terjed, akkor a nyomásfüggvény $p(x, t)$ alakú.

$$p(x, t) = p_0 \sin(2\pi x / \lambda + t\omega + \varphi_0),$$

Frekvencia szerint három tartományba sorolhatjuk a hangot. 20KHz felett az ultrahang tartományról beszélünk (denevér és delfin), 20Hz és 20kHz között hallható tartományról (ember), és 20hz alatt találhatóak az infrahangok (elefánt).

Közelítő számítás az infrahang hatásának becslésére

Tekintsünk úgy az infrahangra, mint a levegőben terjedő nagyon nagy hullámhosszúságú p_0 amplitúdójú nyomáshullámra (A hullámhossz, λ kiszámolható a frekvenciából és a terjedési sebességből, tehát $\lambda = c/f$). Nézzük meg, hogy mekkora elmozdulást okoz egy a hullámfrontra merőleges A keresztmetszetű l hosszúságú testen.

A nyomáskülönbség a test két vége között felírható az alábbi formában.

$$\delta p = p_0 \sin(\omega t + \omega l / 2c) - p_0 \sin(\omega t - \omega l / 2c) = 2 \cos(\omega t) \sin(\omega l / 2c) \approx p_0 \frac{\omega l}{c} \cos(\omega t)$$

Ezután írjuk fel a próbatestre a mozgásegyenletet:

$$ma = A \rho a = \delta p A$$

$$a \approx \frac{p_0 \omega}{c \rho} \cos(\omega t)$$

$$v(t) = \int a dt \approx -\frac{p_0}{c \rho} \sin(\omega t)$$

$$x(t) = \int v dt \approx -\frac{p_0}{c \rho \omega} \cos(\omega t)$$

Ha behelyettesítünk 1mPa nyomást, 2500 kg/m³ sűrűséget, (tipikusan üveg) és frekvenciának 10mHz-et választunk, az elmozdulásnak ~20nm adódik, ami összemérhető a lézer hullámhosszával, így komoly hatást gyakorol a LIGO-ra. Ez azt jelenti, hogy ha bejutnak a rendszerbe az infrahangok, akkor azok szisztematikus nagyfrekvenciás hibát okoznak a detektor gravitációs hullám csatornájának jelében. A rendszerben jelen lévő nemlineáris folyamatok miatt megjelennek a felharmónikusok is.

Egy hanghullám erősségét természetesen meg lehet adni a nyomásingadozás amplitúdójával (hangnyomás). Tekintve, hogy az emberi fül logaritmikus érzékenységű, ezért sokkal praktikusabb a hangerőt dB (decibel) skálán megadni. Ezen a skálán 20dB tízszeres nyomásamplitúdó növekedésnek felel meg. A skála normalizálása (mely szabadon választható) úgy lett megválasztva, hogy a 0dB a leghalkabb hangnak feleljen meg, amit még meghallhat az ember. Ez (definíció szerint) 20μPa amplitúdó, amit egy szűnyog kb. 3 méter távolságból kelt. A hangnyomás a következő képlet alapján számolható ki:

$$L_p = 20 * \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) dB$$

ahol a p_{ref} az előbb említett 20μPa referencia amplitúdó. A dB skálán a tipikus beszéd 40-60 dB, 120 dB már maradandó károsodást okoz, 130dB a fájdalomküszöb.

Ahogy azt az előbb számoltuk, a sebesség oszcilláció amplitúdó $p_0/c\rho$ (egy kis levegő térfogatot is tekinthetünk próbatestnek). A hang által képviselt teljesítmény nyilván a

nyomás és keresztmetszet szorzata (erő), szorozva a sebességgel (egységnyi idő alatti elmozdulás, $(p_0)^2 A/cp$. A levegő sűrűsége 1.2 kg/m^3 , a hangsebesség 331 m/s .

A hangnyomásról bővebben: http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure

Hangforrás	Hangnyomás (Pa)	Hangnyomás (dB)
Krakatoa robbanás 160km-ről	20000	180
.30-as kaliberű puska 1m-ről	5023	168
Sugárhajtómű 30 m-ről	632	150
Fájdalomküszöb	63.2	130
Légkalapács 1m-ről	2	100
Sűrű forgalom 10m-ről	$2 \times 10^{-1} - 6.32 \times 10^{-1}$	80-90
Személyautó 10m-ről	$2 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-1}$	60-80
Normál beszéd 1m-ről	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$	40-60
Nagyon halk szoba	$2 \times 10^{-4} - 6.32 \times 10^{-4}$	20-30
Hallásküszöb (1kHz)	2×10^{-5}	0

Table 1: Néhány gyakori hangforrás hangnyomása

3. Mikrofon alapelvek

A hang mérésére több módszert fejlesztettek ki. Régi telefonkészülékekben szén mikrofonok voltak. Itt egy zárt térfogatban szénszemcsék voltak. A térfogat egyik fala a ránehezedő nyomásnak megfelelően elmozdulhatott, összenyomta a részecskéket, ami ellenállásváltozást okoz, ami elektromos jellé alakítható. Ez a megoldás abszolút nyomásmérőként viselkedik, rettentő rossz minőségű hangot produkál, viszont strapabíró, olcsó és minimális elektronikát igényel.

Az úgy nevezett dinamikus mikrofonokban a hang (nyomás) egy membránt mozgat, amihez tipikusan egy tekercs van rögzítve, ami állandó mágneses térben van. A membrán mozgása feszültséget indukál a tekercsben.

A kondenzátor mikrofonban a nyomás hatására elmozduló membrán egy nem mozgó lemezzel együtt egy kondenzátort alkot. A kondenzátort elektronikusan állandó töltéssel feltöltik. A membrán elmozdulása miatt változik a kapacitás, ami miatt változik a kondenzátoron mérhető feszültség ($Q=C*U$). A konstrukció nagyon alacsony frekvencián nem működhet, hiszen a töltés állandóságát elektronika oldja meg, ami egy bizonyos frekvencia alatt automatikusan kompenzálja a membrán elmozdulását. Egy adott kondenzátor kapacitását a következő képlet segítségével lehet kiszámolni:

$$C = \frac{\epsilon A}{d},$$

ahol A a kondenzátor fegyverzeteinek felülete, d a fegyverzetek távolsága, ϵ pedig a permittivitás ($\sim 8 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$).

Elektret mikrofonok lényegében azonosak a kondenzátor mikrofonnal, a fő különbség, hogy ferroelektromos anyaggal vonják be a fegyverzeteket, így aktív töltéselektronikára nincs szükség.

Dinamikus és kondenzátor mikrofonok esetén két alapvető mechanikai megoldás használatos. A membrán lehet mindkét oldalról nyitott, ekkor a membrán lényegében a nyomás gradienst követi. Ha a membrán egyik oldalról zárt, akkor lényegében abszolút nyomást mér.

Kérdések, amiken érdemes elgondolkodni:

1. *Indokolja meg, miért nem működhet a szén mikrofon nagyon magas frekvencián.*
2. *Indokolja meg, miért nem működhet egy dinamikus mikrofon nagyon alacsony frekvencián.*
3. *Egy 33mm átmérőjű kondenzátor mikrofon fegyverzettávolsága 35 μm . Mekkora a kapacitása?*

4. Az előző kérdésben számolt kapacitás mennyit változik, ha 1nm-t elmozdul a membrán?

4. Alacsonyfrekvenciás kondenzátor mikrofon

A mérési elv nagyon egyszerű, veszünk egy kis térfogatú tartályt, körülbelül néhány száz köbcentimétert, ezt használjuk nyomásreferenciának. Egy kis kapillárist illesztünk a referenciatérfogat és a környezete közé, így biztosítva a lassú nyomáskiegyenlítődést. A kapilláris mérete meghatározza a kiegyenlítődés idejét, ezáltal közvetlenül a kapillárisal beállítható az alacsonyfrekvenciás levágás. Az infrahangokat tulajdonképpen úgy érzékelhetjük ezzel az összeállítással, hogy differenciális nyomásmérést végzünk a két térfogat között.

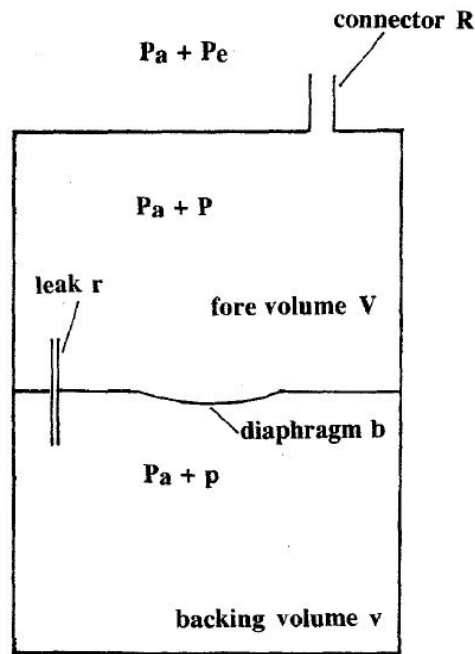


Figure 1: Egy infrahangmikrofon vázlata a Los Alamosi design alapján

Az adott mikrofonkonfigurációba a membránt (az ábrán „diaphragm”) egy kondenzátor egyik rugalmas fegyverzete, ami így elhelyezve a nyomáskülönbségeknek megfelelően fogja változtatni kapacitását, ezt nevezzük kondenzátor mikrofonnak. Az EGRG keretében kifejlesztettünk egy új kondenzátor mikrofon kiolvasó elektronikát, mely elméletileg bármilyen alacsony frekvencián is működik.

5. Jelfeldolgozás (nagyon) alapok

A mikrofonunk és általában a legtöbb környezeti hatást monitorozó berendezés idősort generál, ez a kimenete. Az idősor a pillanatnyi jel nagysága az idő függvényében rögzítve. Az idősor vizsgálatának egyik módja, amit a mérés kiértékelésében is használni kell majd, az idősor ábrázolása grafikusan, ezzel vizuális információt kaphatunk a mért jel nagyságáról. Ezzel a módszerrel rendkívül egyszerűen kaphatunk egy átfogó képet a jellegzetességekről, mérhetünk pillanatnyi amplitúdót, megállapíthatunk időben történt változásokat. Egyes jeleknek könnyedén megmérhetjük a frekvenciáját, ha ismerjük az időfelbontást. Ha másodpercenkénti periódusok számát kiszámoljuk, a frekvenciát hertzben kapjuk ($[frekvencia]=1/s=Hz$). Egy ilyen idősort láthatunk az 2. ábrán.

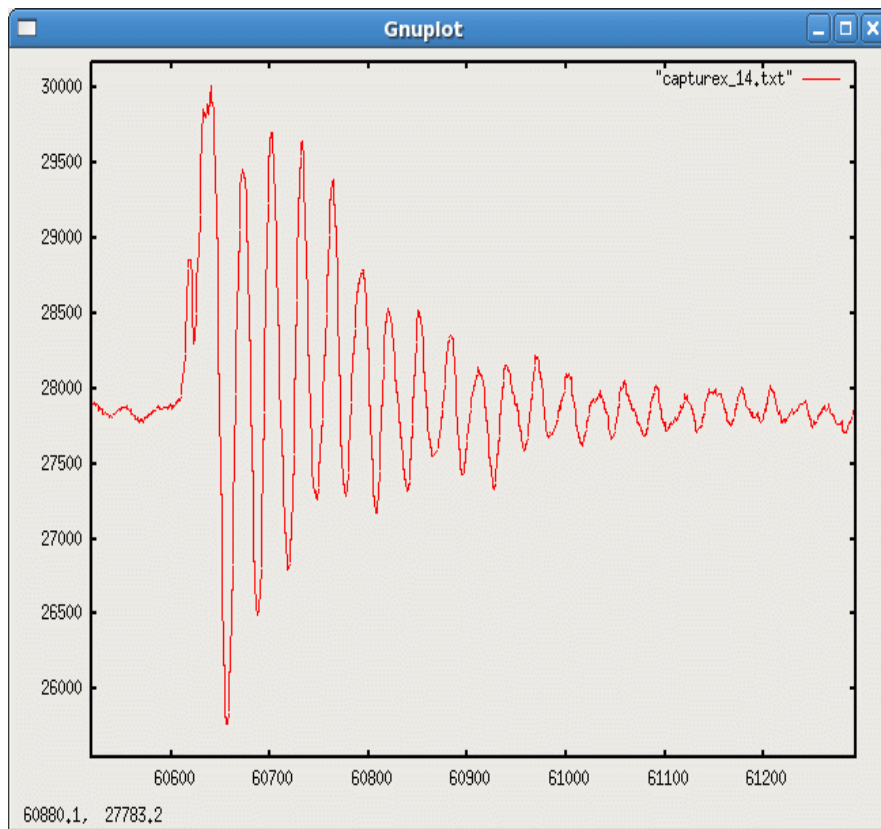


Figure 2: Tipikus példa idősorra. Vízszintes tengelyen 1/1024 másodperc, függőleges tengelyen amplitúdó digitális egységben.

Legegyszerűbben a Gnuplot nevű ingyenes szoftverrel ábrázolhatunk idősorokat, a használata rendkívül egyszerű parancssoros és számtalan leírás található hozzá az interneten. A program megtalálható Linux, MacOS és Windows operációs rendszerre is. Egy nagyszerű magyar nyelvű leírás: <http://achilles.elte.hu/gnuplot/>

Egy tetszőleges jelet (idősor) mindig felbonthatunk különböző amplitúdójú szinuszok szuperpozíciójára. A laborgyakorlat során rögzített adatokban is több jel- és zajforrás által generált hang összegét fogjuk mérni, amik „szétválasztására” szükség van például ahhoz, hogy megmondjuk, milyen frekvencián generálnak hangot ezek a források. A problémára megoldást ad a *fourier transzformáció*, ami a bonyolult jelet képes különböző frekvenciájú komponensekre bontani, azok amplitúdóját kiszámolni. Tehát azon kívül, hogy egy bonyolultabb jelben képesek vagyunk az egyes frekvenciákat megtalálni, egy átfogó képet kapunk az adott frekvenciájú komponensek amplitúdóarányáról is, így egy nagyon fontos és hasznos eszközt kaptunk. A fourier transzformáció elvégzésére sok szoftver alkalmas, amik ingyenesen elérhetőek bármilyen platformra. A spektrum elkészítéséről a laborgyakorlat során lesz szó.

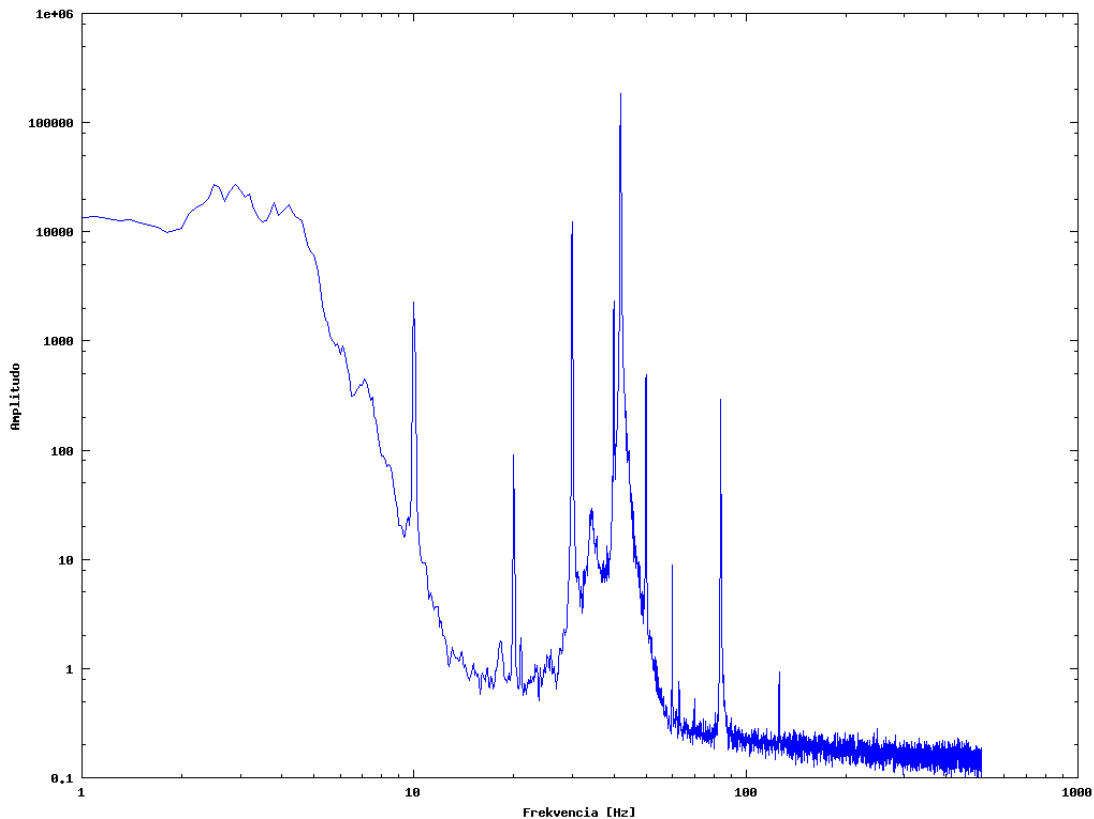


Figure 3: Spektrum (teljesítmény). A tengelyek logaritmikusak, vízszintes tengelyen frekvencia, függőleges tengelyen amplitúdó van ábrázolva.

Spektrogramnak vagy szonogramnak nevezzük a vízszintes tengelyen időt, a függőleges tengelyen frekvenciát ábrázoló grafikont. A spektrogramon a különböző frekvenciájú komponensek időbeli változását lehet egyszerűen megfigyelni, azok összefüggése lehet nagyon feltűnő. Egy spektrogram lényegében spektrumok sorozata, amik egymás után készültek fix időkülönbséggel, ezért lehet időbeli eltéréseket is észrevenni a segítségével. Az egyes spektrumok között lehet átfedés. Egyes komponensek amplitúdóját a képen az adott pont színével lehet ábrázolni, mivel mindkét tengely „foglalt”.

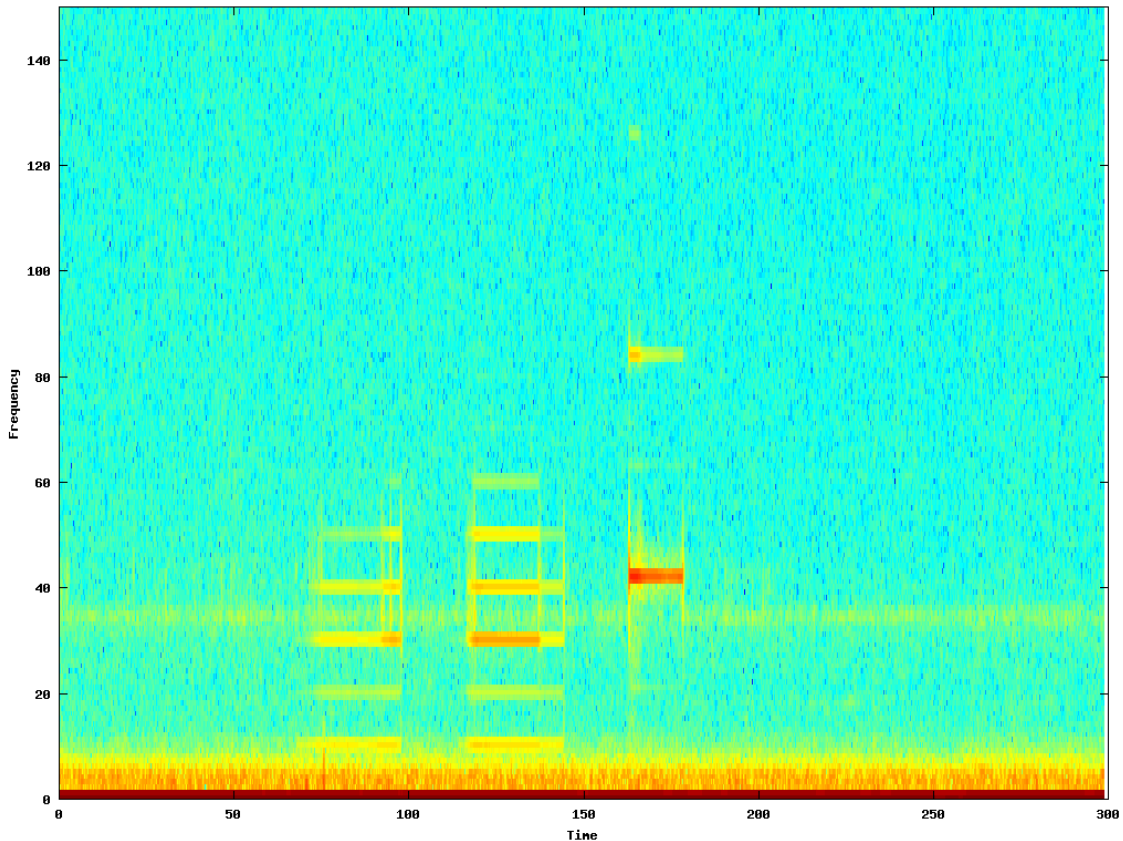


Figure 4: Egy spektrogram, ahol az adott frekvenciájú komponens amplitúdóját színekkel ábrázoljuk (kék a kis amplitúdó, piros a nagy amplitúdót jelzi)

6. A mikrofon üzemeltetése

A mikrofont nagyon egyszerű használni. Az akkumulátorhoz csatlakoztatva a műszer bekapcsol, majd kb. egy perc elteltével automatikusan elkezd adatokat gyűjteni. A mérés befejeztével (5 perc) egyszerűen ki kell húzni az eszközt és az SD kártyáról letölthetők a mérési eredmények. A mérést a kék LED világítása jelzi, ami nem látszik úgysem, mivel a műszer belsejében található.

Mérési feladatok:

A mérés kiértékelésével kapcsolatos pontos technikai részletek (pl. fourier transzformációval kapcsolatban) a laborgyakorlat során ismertetésre kerülnek, ezenkívül lehet készülni kérdésekkel!

- I. Vegyen mintát a labor háttérzajából. A minta Fourier Transzformáltjából állapítsa meg, milyen frekvenciájú források vannak jelen.

- II. *A rendelkezésre álló PC segítségével állítson elő valamilyen mély, de hallható hangot. Ajanlott az 50-100Hz tartományban megválasztani a frekvenciát.*
- III. *Vegyen egy öt perces mintát.*
- IV. *A minta ábrázolásával mérje meg a hangnyomás amplitúdóját. Hány dB-nek felel ez meg?*
- V. *Fourier Transzformáció segítségével mérje meg a mért hang frekvenciáját.*
- VI. *Az épületben és annak környékén keressen infrahang forrásokat. Minden bekapcsoláskor 5 perces mintavételezés fog történni, külön fileba. A mérések sorrendjét természetesen fel kell jegyezni. Alánlott célpontok: gépjárművek, liftek, elefántok, légkondicionálók.*