

Úloha II.E ... reproduktor

12 bodů; (chybí statistiky)

Naměřte závislost hladiny intenzity zvuku vydávaného vašim reproduktorem/mobilem/počítačem na vzdálenosti od zdroje. Určete také závislost hladiny intenzity na nastavení výstupní hlasitosti (tzv. volume). Nezapomeňte data fitovat. *Jarda toho v zadní lavici už moc neslyší.*

Úvod a teoretický základ

Hladina intenzity zvuku je zřejmě nejznámější akustická veličina. Její jednotkou je decibel dB. Už její dlouhý název nám napovídá, že tato veličina není na pochopení tak jednoduchá jako například hmotnost nebo délka (aspoň v klasické fyzice). Je definována jako

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0},$$

kde I je intenzita zvuku v měřeném místě, $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je intenzita prahu slyšení a číslo 10 se zde objevuje proto, že základní jednotkou je decibel, a ne jenom bel. Intenzita zvuku I je zase podíl akustického výkonu P a plochy S , kterou prochází. Intenzita a hladina intenzity tak jdou pomocí tohoto vztahu určit jedna ze druhé.

Hladina intenzity zvuku je tedy bezrozměrná veličina. Navíc se chová logaritmicky - zvětšíme-li intenzitu zvuku na dvojnásobek (například přidáním stejně hlučného zdroje), zvýší se L přibližně o 3 dB. Logaritmické měřítko je zvoleno kvůli tomu, že lidské ucho vnímá intenzitu logaritmicky a navíc dokáže fungovat v rozmezí asi 12 řádů, takže je to vhodné třeba i kvůli zakreslování hluku do grafu.

Promyslíme si rovnou, jak se bude chovat závislost hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti od bodového zdroje. Bodový zdroj je takový zdroj, že můžeme zanedbat jeho rozměry vůči vzdálenosti od něj. Předpokládejme, že z něj vychází nějaký výkon ΔP do prostorového úhlu $\Delta\Omega$. Plocha, kterou tento prostorový úhel vytíná na kouli o poloměru r se středem ve zdroji, je $\Delta S = \Delta\Omega r^2$ ¹. Intenzita ve vzdálenosti r tak je

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{\Delta P}{\Delta\Omega} \frac{1}{r^2}.$$

Intenzita tedy ne příliš překvapivě klesá se druhou mocninou vzdálenosti. Hladina intenzity zvuku se pak bude měnit jako

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{\Delta P}{I_0 \Delta\Omega} \frac{1}{r^2} = 10 \cdot \left(\log \frac{\Delta P}{I_0 \Delta\Omega} - 2 \log r \right),$$

z toho vyplývá, že klesá jako konstanta minus logaritmus vzdálenosti. Pokud si ale na osu x vyneseme vzdálenost v logaritmické škále (tedy místo r budeme vynášet $\log r$), měli bychom dostat lineární závislost s koeficientem -20 . Musíme ovšem poznamenat, že zápis ve tvaru $\log r$ není fyzikálně zcela správně a logaritmus v předchozí rovnici bychom neměli rozdělovat na rozdíl dvou logaritmů. Pro grafickou názornost je ovšem lepší poslední zápis, díky kterému budeme moci vynést datové body do přímky a určit její sklon.

Měření budeme provádět pomocí hlukoměru. Pokud nemáme k dispozici nějaký profesionálnější přístroj, stáhneme si na mobil aplikaci, která toto měření umožňuje.

¹Pokud by byl prostorový úhel roven 4π , tak dostáváme plochu povrchu celé koule

Naměřené hodnoty a zpracování výsledků

Pro měření závislosti hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti použijeme malý reproduktor, který by mohl reprezentovat bodový zdroj zvuku. Měření provádíme v běžné místnosti, nedokážeme proto zcela zamezit odrazům zvuku od stěn a nábytku. Generujeme zvuk o stálé frekvenci 440 Hz. Pro samotné měření používáme aplikaci *Zvukoměr* instalovanou na mobilní telefon.²

Tab. 1: Závislost hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti od zdroje.

r cm	L dB	r cm	L dB
5	87	60	69
10	86	70	63
15	83	80	66
20	81	90	68
25	80	100	70
30	78	120	67
35	77	140	62
40	76	160	66
45	75	180	66
50	74	200	65

Naměřenou závislosti zobrazíme v grafu 1.

Jak jsme zmínili v teoretickém úvodu, vyneseme ještě vodorovnou osu v logaritmické škále v grafu 2.

Datové body v grafu jsme rovnou proložili přímkou.³ Program sám určí takovou přímkou, která nejlépe odpovídá zobrazeným bodům. V našem případě je to po zaokrouhlení koeficientů na počet platných cifer určených odchylkou

$$y = -(17 \pm 1)x + (101 \pm 3) .$$

Chybu určení koeficientů nám ukáže program, ve kterém jsme koeficienty hledali.⁴ Zde však hodnoty chyb uvádíme zejména proto, abychom mohli diskutovat přesnost určení koeficientů. Podle předchozí rovnice určuje koeficient před x rychlost klesání intenzity zvuku. Pro bodový zdroj zvuku klesá intenzita jako r^{-2} , pro lineární jako r^{-1} . V našem případě dostáváme $r^{-1,7}$, tedy blíže k bodovému zdroji, jak bychom předpokládali.

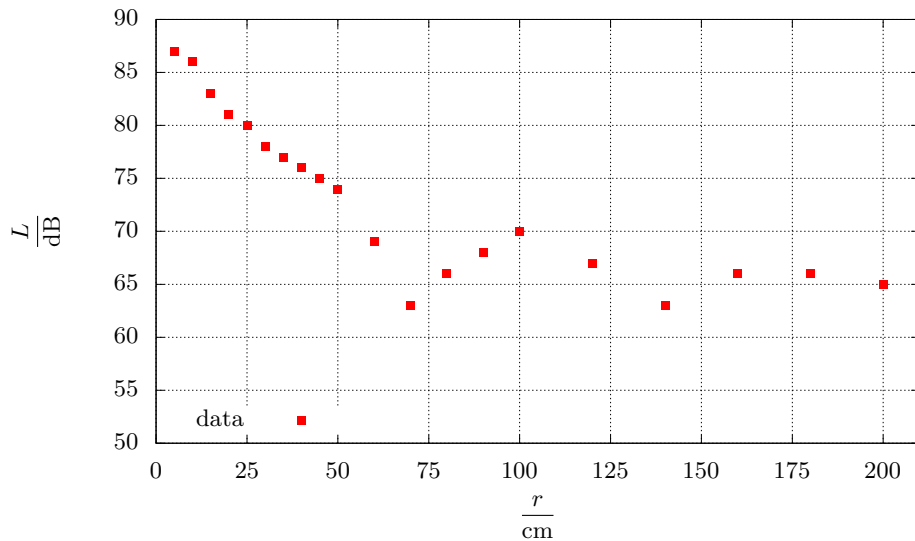
Dále jsme naměřili závislost hladiny intenzity zvuku na nastavení výstupní hlasitosti, tedy na tzv. volume. Tento parametr budeme v našem řešení značit v . Měřili jsme ve dvou vzdálenostech v rozmezí 0 až 100 jednotek (označíme j). Jako zdroj zvuku jsme použili laptop.

Naměřené hodnoty zobrazíme v grafu 3. Rovnou do něj přidáme i polynomy, kterými dané funkce aproximujeme. Proč budeme body prokládat právě "náhodnými" polynomy? Naměřili jsme jen několik datových bodů. Kdyby nás ale zpětně zajímalo, jaká by byla hladina intenzity zvuku například při volume $v = 50$ j, stačí dosadit do našeho polynomu a dostáváme poměrně přesnou hodnotu. Navíc nemáme žádný teoretický základ pro proložení závislosti něčím jiným.

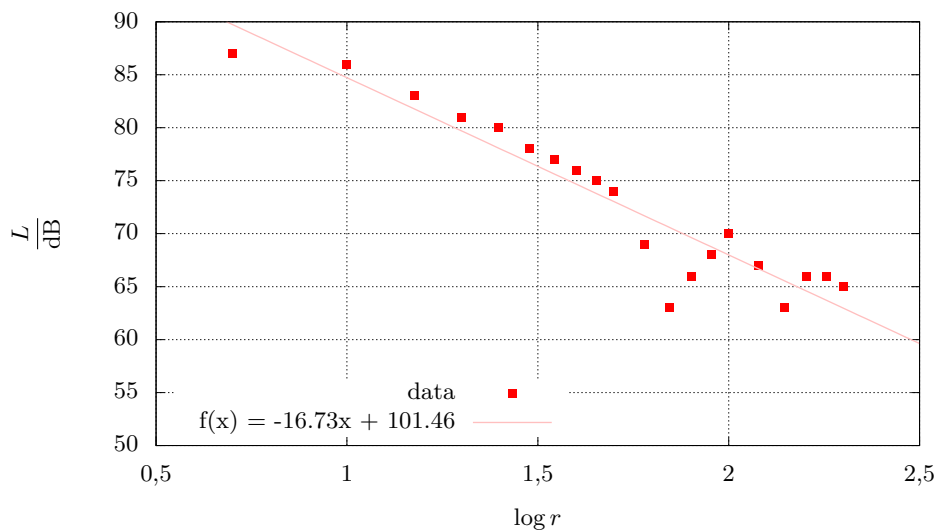
²Lze samozřejmě použít i jiné aplikace, např. známou aplikaci *Phyphox*

³Například v programu *Excel* funkce *spojnice trendu - lineární*. Přesnou rovnici proloženou přímkou získáme, pokud zaklikneme její zobrazení do grafu.

⁴V našem případě *Gnuplot*. V Excelu bohužel není snadné tento údaj dohledat.



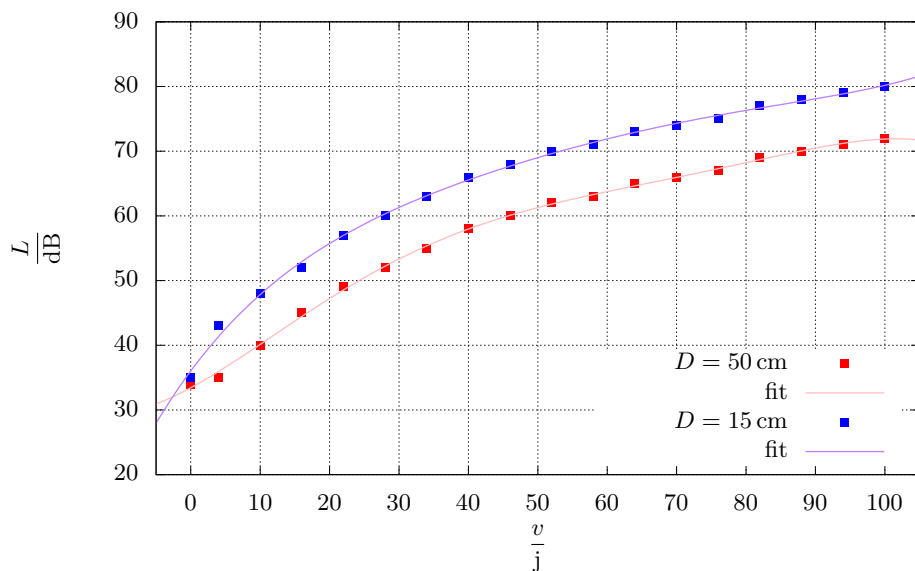
Obr. 1: Závislost hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti od zdroje.



Obr. 2: Závislost hladiny intenzity zvuku na logaritmu vzdálenosti od zdroje.

Tab. 2: Závislost hladiny intenzity zvuku na volume. Index u L určuje vzdálenost D od zdroje v centimetrech.

$\frac{v}{j}$	L_{15} dB	L_{50} dB
0	35	34
4	40	35
10	48	40
16	52	45
22	57	49
28	60	52
34	63	55
40	66	58
46	68	60
52	70	62
58	71	63
64	73	65
70	74	66
76	75	67
82	77	69
88	78	70
94	79	71
100	80	72



Obr. 3: Závislost hladiny intenzity zvuku na volume.

Závislost jsme proložili polynomem pátého stupně, protože máme poměrně hodně dat a nižší stupně polynomů by nebyly dostatečně přesné pro malé nebo velké hodnoty v . Pro závislost v $D = 15$ cm je rovnice polynomu

$$y = 1,2 \cdot 10^{-8} x^5 - 3,8 \cdot 10^{-6} x^4 + 4,6 \cdot 10^{-4} x^3 + 3,1 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,5x + 36,$$

zatímco pro $D = 50$ cm pak

$$y = -2,3 \cdot 10^{-8} x^5 + 5,9 \cdot 10^{-6} x^4 - 5,3 \cdot 10^{-4} x^3 + 1,4 \cdot 10^{-2} x^2 + 5,8 \cdot 10^{-1} x + 33.$$

Diskuze

V teoretickém úvodu jsme se zamýšleli nad chováním hladiny intenzity zvuku v různých vzdálenostech od bodového zdroje. Odvodili jsme, že intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Pokud tedy vyneseme hladinu intenzity v decibelech na svislou osu, a na vodorovnou vzdálenost v logaritmu, dostaneme přímkou se sklonem $10 \cdot (-2) = -20$ (10 kvůli tomu, že pracujeme v desetínách belu, a -2 je mocnina vzdálenosti). V našem případě jsme naměřili sklon -17 ± 1 , intenzita zvuku tedy klesá se vzdáleností jako $r^{-(1,7 \pm 0,1)}$. Protože je toto číslo menší než u bodového zdroje, je zřejmé, že nemůžeme zanedbat rozměry reproduktoru. Relativní chyba určení tohoto exponentu je přibližně 6 procent, můžeme tedy tvrdit, že data odpovídají lineární závislosti a určení koeficientu je poměrně přesné.

Výsledek může být nepřesný z několika důvodů. Měření jsme prováděli pouze pomocí aplikace na mobilním telefonu, u které nemáme jistotu, že naměří stejné hodnoty jako profesionální zkalibrovaný přístroj. Lepších výsledků bychom mohli dosáhnout po kalibraci aplikace, jak je to u aplikace *Phyphox*. Zároveň použitá aplikace neuvádí nepřesnost měření, nemůžeme tak stanovit chybu měření.

Měření probíhalo v běžné místnosti. V důsledku přítomnosti stěn a podlahy mohlo docházet k odrazům zvuku, a tedy k ovlivnění výsledku.⁵ Na druhou stranu byla místnost vybavená klasickým nábytkem a kobercem, část zvuku tak byla pohlcena a ne odražena směrem k měřicímu telefonu.

Co je ale z pohledu na graf naprosto zřejmé, jsou dvě místa, kde dochází k výraznému snížení intenzity oproti zbytku závislosti. Jejich poloha (přibližně 70 cm a 140 cm) není náhodná, podezřele se blíží k násobkům vlnové délky měřeného zvuku, která je

$$\lambda = n \frac{c}{f}, \quad (1)$$

kde $c \doteq 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost šíření zvuku a $f = 440 \text{ Hz}$ je použitá frekvence. Pro tyto hodnoty vychází 77 cm a 154 cm, což přibližně odpovídá zmíněným bodům. V důsledku experimentálního uspořádání tak dochází k destruktivní interferenci. O správnosti této teorie bychom se mohli přesvědčit, kdybychom polohy bodů, kde se intenzita výrazně snižuje, naměřili i pro jiné frekvence. Ukázalo by se, že tato závislost se řídí přibližně rovnicí (1).

Při měření hladiny intenzity v závislosti na volume si můžeme všimnout, že graf neroste lineárně. Při nižších hodnotách je nárůst strmější, při vyšších pomalejší. Jestliže si tedy zvyšujeme hlasitost, čím výše jsme, tím méně je to efektivní. Naměřená závislost však patrně závisí na konkrétním přístroji a softwaru.

⁵Můžeme si to představit, jako když vedle zrcadla postavíme lampičku - taky ji vidíme dvakrát a jde k nám více světla

Závěr

Naměřili jsme závislost hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti od zdroje a vynesli ji do grafu. Zjistili jsme, že intenzita zvuku klesá se vzdáleností přibližně jako $r^{-(1,7 \pm 0,1)}$. Reprodukční se tak chová přibližně jako bodový zdroj.

Závislost hladiny intenzity zvuku jsme naměřili ve dvou vzdálenostech. V každé z obou vzdáleností od zdroje (laptopu) jsme určili polynom pátého stupně, který danou vzdálenost dobře popisoval. Je zřejmé, že hladina intenzity zvuku neroste s vlnovou délkou lineárně, ale pro jeho větší hodnoty roste pomaleji než pro menší.

Jaroslav Herman
jardah@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.