

# 3. Subharmonický zvuk

Richard Hlubina

UK Bratislava

Úvodné sústreďenie TMF, Bratislava 26.10. 2018

# Zadanie

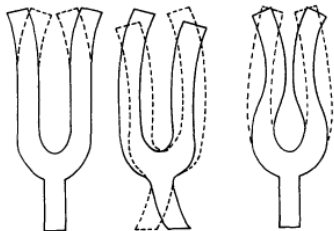


Jemne priložte list papiera k rozkmitanej ladičke alebo inému jednoduchému oscilátoru. Frekvencia výsledného tónu môže byť nižšia, než je základná frekvencia ladičky. Preskúmajte tento jav.

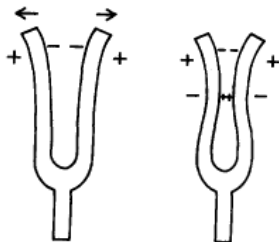
- Hossein Salari, [iypt-kit-2019.pdf](#)
- [video](#) <https://gypt.org/aufgaben/03-undertone-sound.html>
- [video](#) Canadian Young Physicists' Tournament youtube channel
- ruské diskusné fórum *Voronežskije turnirščiki*  
<https://vk.com/topic-29767293-39393627>
- H. Knapman, *An Experiment Illustrating Harmonic Undertones*, Proceedings of the Royal Society of London **74**, 118-120 (1904)
- T. D. Rossing, D. A. Russell, and D. E. Brown, *On the acoustics of tuning forks*, American Journal of Physics **60**, 620-626 (1992)
- J. J. Barroso, M. V. Carneiro, and E. E. N. Macau, Physical Review E **79**, 026206 (2009)

# Ako funguje ladička?

zvuk vo vzduchu:  $\nu = 20 \text{ Hz}$  až  $20 \text{ kHz}$ ,  $\lambda = 17 \text{ m}$  až  $1.7 \text{ cm}$



prvé tri vibračné módy ladičky



kvadrupól - oktopól

wikipédia:

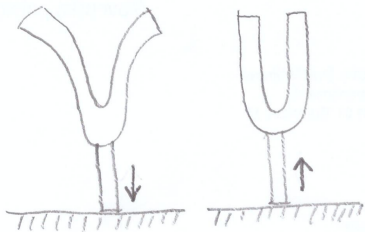
žiarenie monopólu, úmerné  $(a/\lambda)^2$

žiarenie dipólu, úmerné  $(a/\lambda)^4$

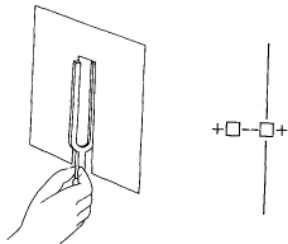
žiarenie kvadrupólu, úmerné  $(a/\lambda)^6$

# Zosilnenie vyžarovania fundamentálneho módu

- kvadrupólové vyžarovanie ladičky → dipólové žiarenie ozvučnice
- vynútené kmity ozvučnice



ozvučnica budená kmeňom  
dvojnásobná frekvencia budenia



ozvučnica budená ramenom  
(list papiera s výrezom)  
zosilnenie asymetriou

# Spektrum zvuku

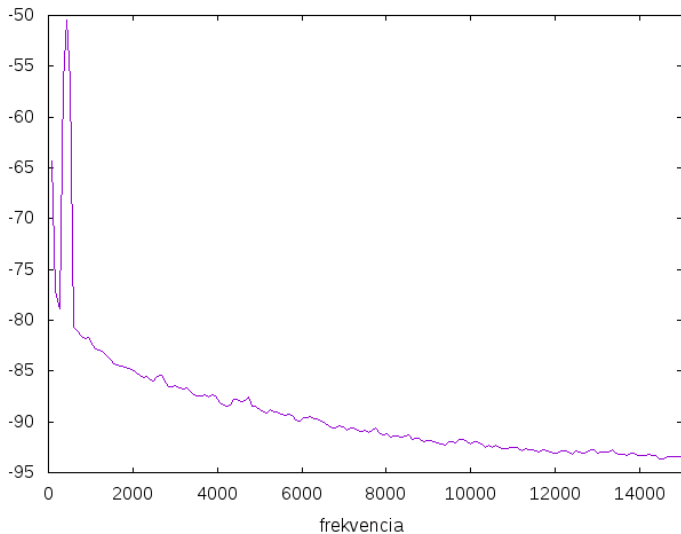
- mikrofón zaznamenáva časový vývoj tlaku  $p(t)$
- Fourierov rozvoj:

$$p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [c_n \cos(\omega_n t) + d_n \sin(\omega_n t)]$$

kde  $\omega_n = n\Delta\omega$  a  $\Delta\omega$  je vhodne zvolený krok

- váha vlny  $\omega_n$  v rozvoji  $p(t)$  je  $K_n = \sqrt{c_n^2 + d_n^2}$
- spektrum: závislosť  $K_n$  od frekvencie  $\omega_n$
- na výpočet koeficientov  $K_n$  pre meraný priebeh  $p(t)$  existuje voľne prístupný softvér, napr. `audacity`

# Spektrum hrnca podľa audacity



# Spektrum zvuku ozvučnice podľa **lineárnej teórie**

Tvar spektra ozvučnice závisí od:

- spektra zvuku vybudeného v ladičke (úderom je vybudených viacero módov!)  
budené kmity: v spektre ozvučnice prítomné iba vlastné módy ladičky!  
(predpoklad: kmity ladičky slabo ovplyvnené ozvučnicou - je to tak?)
- efektívnosti prenosu kmitov z ladičky na ozvučnicu  
(rôzna pre rôzne módy!)
- spektra vlastných kmitov ozvučnice (ak takéto kmity vôbec existujú!)  
(čím bližšie je budiaci frekvencia k vlastnej frekvencii ozvučnice, tým väčší koeficient  $K_n$ )

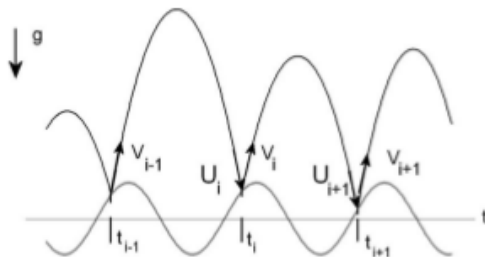
dôsledky pre spektrum ozvučnice:

- buď ladička slabo ovplyvnená a niet módov s frekvenciou nižšou ako fundamentálna frekvencia ladičky
- alebo ladička a ozvučnica tvoria zviazané oscilátory, ktoré majú iné vlastné módy ako oddelené oscilátory



# Spektrum zvuku ozvučnice: možné nonlinearity

- minimálny model:  
ladička = hmotný bod (poloha  $x_1$ ), ozvučnica = hmotný bod (poloha  $x_2$ )
- ladička je určite harmonický oscilátor:  $F_1 = -m_1\omega_1^2x_1$
- sila medzi ladičkou a ozvučnicou určite nie je lineárna:  $F \neq K(x_2 - x_1)$
- ozvučnica pravdepodobne nie je harmonický oscilátor:  $F_2 \neq -m_2\omega_2^2x_2$
- model skúmaný v literatúre: guľôčka skákajúca na oscilujúcom stole



- reprodukovateľne buďte ladičku a nájdite jej spektrum pri tomto buzení
- reprodukovateľne upevnite papier do držiaka (napr. ako zástavu); experimentujte s rozmermi papiera a jeho hrúbkou
- reprodukovateľne zrealizujte kontakt medzi ladičkou a papierom, napr. ich pevným upevnením na lavici
- mikrofónom merajte zvuk generovaný ozvučnicou a analyzujte jeho spektrum pri zmene parametrov (napr. relatívnej vzdialenosti papier-ladička pri fixovanom buzení ladičky)
- simulujte časový vývoj modelu skákajúcej guľôčky; nájdite frekvenčné spektrum funkcie  $z(t)$  a porovnajte ho s experimentom