فصل صوت ۱

صوت

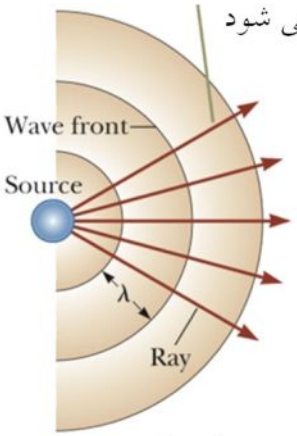
- موج طولی
- منتشر شده در هوا یا دیگر سیالات
- قابل شنیدن
- حاصل از نوسان لایه های هوا حول نقطه تعادل: انبساط و انقباض لایه ها

کاربردها:

- اکتشاف معادن
- ردیابی زیر دریایی
- تخریب بافتها

مفاهیم

چشمه نقطه ای (point source):
منبع تولید صوت بسیار کوچک که امواج آن به صورت کروی منتشر می شود



جبهه موج (wave front):
سطوحی از هوا که با همدیگر نوسان می نمایند
کره های هم مرکز با شعاع های مختلف

پرتو (Ray):
خطوط عمود بر جبهه موج
بیانگر جهت انتشار
با عبور موج، هر لایه از هوا حول وضعیت تعادلی خود عقب و جلو می رود (نوسان می کند) و لذا منبسط و منقبض می شود

سرعت صوت:

الف) بحث کیفی:

انتشار موج صوتی در هوا ناشی از انبساط و انقباض متوالی لایه های هوا (المانهای کوچکی از محیط)

ضریب تراکم پذیری $\beta = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$

ماده ای با تراکم پذیری بیشتر، دارای ضریب تراکم کوچکتری است

خاصیت تراکم پذیری محیط / خاصیت لختی $\Rightarrow v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$

خاصیت انعطاف پذیری / خاصیت لختی $v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$

نکاتی پیرامون سرعت صوت

- سرعت صوت در ماده به خواص کشسانی محیط بستگی دارد
- سرعت صوت در مواد مختلف متفاوت است
- خاصیت کشسانی بیشتر سرعت بیشتر
- در جامدات، توانایی بازگشت ماده به شکل اولیه اش بعد از اعمال یک نیروی خارجی تعریف می شود.
- سرعت صوت: در هوا یا گاز ـ در مایعات ـ جامدات
- سرعت صوت در خلاء صفر است
- سرعت صوت به دمای محیط انتشار وابستگی دارد
- رابطه سرعت صوت منتشر شده در هوا با دمای محیط

$$v = (331\ \text{m/s})\sqrt{1+\frac{T_C}{273}}$$

- The 331 m/s is the speed at 0° C.
- T_C is the air temperature in Celsius.

TABLE 17.1 *Speed of Sound in Various Media*

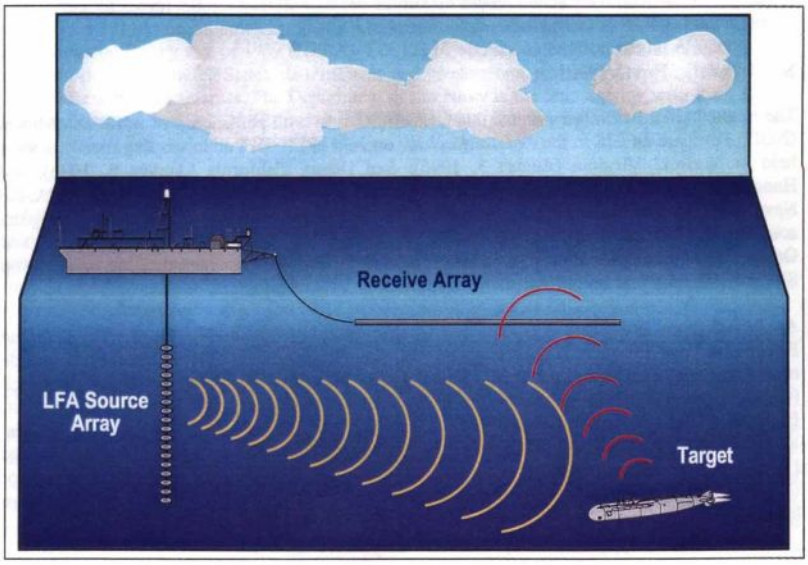
Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)
Gases		**Liquids at 25°C**		**Solids**[a]	
Hydrogen (0°C)	1 286	Glycerol	1 904	Pyrex glass	5 640
Helium (0°C)	972	Seawater	1 533	Iron	5 950
Air (20°C)	343	Water	1 493	Aluminum	6 420
Air (0°C)	331	Mercury	1 450	Brass	4 700
Oxygen (0°C)	317	Kerosene	1 324	Copper	5 010
		Methyl alcohol	1 143	Gold	3 240
		Carbon tetrachloride	926	Lucite	2 680
				Lead	1 960
				Rubber	1 600

[a]Values given are for propagation of longitudinal waves in bulk media. Speeds for longitudinal waves in thin rods are smaller, and speeds of transverse waves in bulk are smaller yet.

- Sonar (**So**und **Na**vigation **R**anging)
- Sound is emitted from the hull of a ship.
- It bounces off some object.
- The echo returns to a receiver on the hull of the ship
- How far away is a ship if it takes 3.4 s to receive a return signal in seawater?

  d = 2618 m

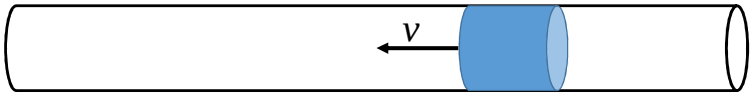
Echo Location and Sonar



سرعت صوت:

ب) بحث کمی:

۱- بررسی تک پالس در حال انتشار از راست به چپ درون لوله ای به مساحت مقطع A



پالس آشفتگی در حال انتشار در هوا

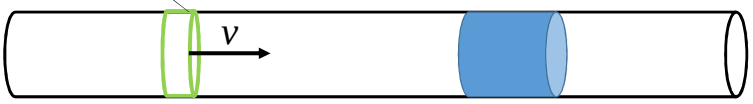
۲- استفاده از قوانین نیوتن

۳- دستگاه مختصات در حال حرکت با سرعت صوت

پالس ساکن است

هوا از چپ به راست با سرعت صوت حرکت می کند

المان هوا که در دستگاه متحرک با پالس دارای سرعت صوت است



پالس آشفتگی ساکن

٤- تغییر فشار لایه هوا با ورود به ناحیه مختل شده

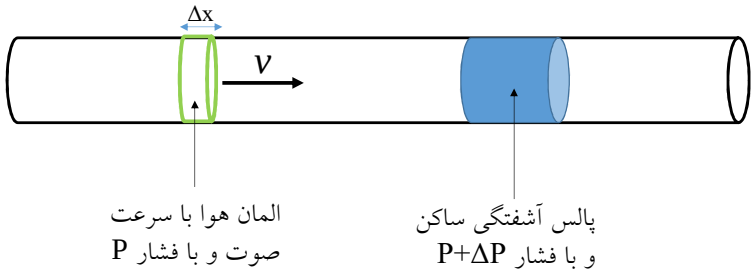
فشار هوای مختل نشده (قبل از رسیدن پالس آشفتگی) = P

فشار هوای مختل شده (درون پالس آشفتگی) = P+ΔP

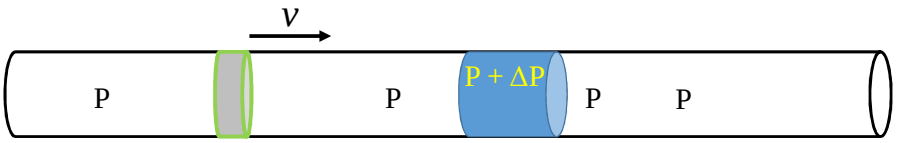
در لایه هوای متراکم $\Delta P > 0$ و در لایه هوای منبسط $\Delta P < 0$

٥- در نظر گرفتن المان لایه ای از هوا به ضخامت Δx و مساحت A

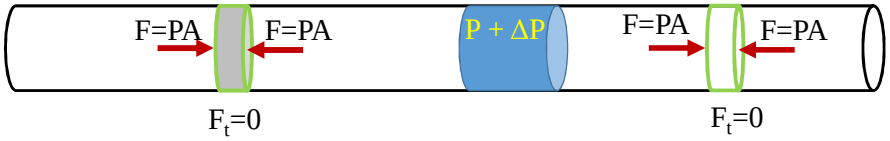
در دید ناظر متحرک با پالس: پالس آشفتگی ساکن و المان هوا با سرعتی برابر با سرعت صوت به پالس نزدیک می شود



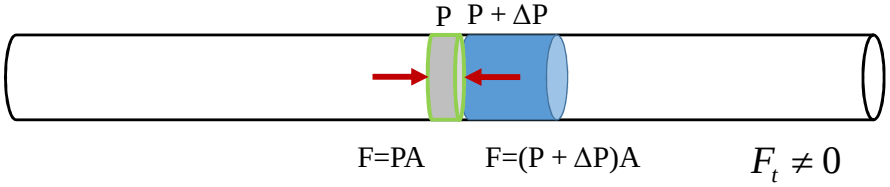
٦- فشار در نواحی مختلف لوله هوا



٧- نیروی خالص وارد بر لایه هوا در نقاط مختلف



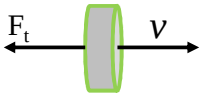
قبل و بعد از رسیدن لایه هوا به پالس



در هنگام ورود لایه هوا به پالس

۸- نیروی خالص وارد بر لایه هوا در ورود به پالس یا ناحیه آشفته

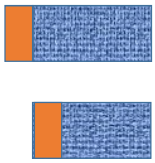
$$F_t = P.A - (P + \Delta P).A = -\Delta P.A \quad (1)$$



حرکت کندشونده سبب کاهش سرعت به اندازه Δv می گردد $(\Delta v < 0)$

۹- مدت زمان اعمال نیروی خالص وارد بر لایه هوا در ورود به پالس یا ناحیه آشفته:
تا زمانی که فشار در دو طرف لایه هوا متفاوت باشد
زمان شروع: از لحظه ورود المان هوا بدرون پالس (نیروی خالص مخالف صفر)
زمان پایان: تا لحظه ای که المان هوا کاملا درون پالس قرار گیرد

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$$



۱۰- جرم المان Δm

$$\Delta m = \rho V = \rho A \Delta x = \rho A v \Delta t \quad (2)$$

۱۱- محاسبه شتاب کاهشی در ورود لایه هوا بدرون پالس آشفتگی
در مدت Δt سرعت لایه هوا در ورود به پالس به اندازه Δv تغییر می نماید

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$

۱۲- نوشتن قانون دوم نیوتن برای المان لایه ای هوا:

$$F = ma \xrightarrow{1\,2\,3} -\Delta P.A = \rho A v \Delta t \times \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\longrightarrow \quad -\Delta P = \rho v \Delta v = \rho v^2 \frac{\Delta v}{v}$$

$$\longrightarrow \quad \rho v^2 = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{v}} \qquad (5)$$

۱۳- ارتباط تغییر حجم نسبی المان هوا در ورود به پالس با تغییر سرعت نسبی آن:

حجم لایه هوا قبل از رسیدن به پالس $V = A\Delta x = Av\Delta t$

تغییر حجم لایه هوا بعد از رسیدن به پالس و متراکم شدن آن $\Delta V = A\Delta v\Delta t$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A\Delta v\Delta t}{Av\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta v}{v} \qquad (6)$$

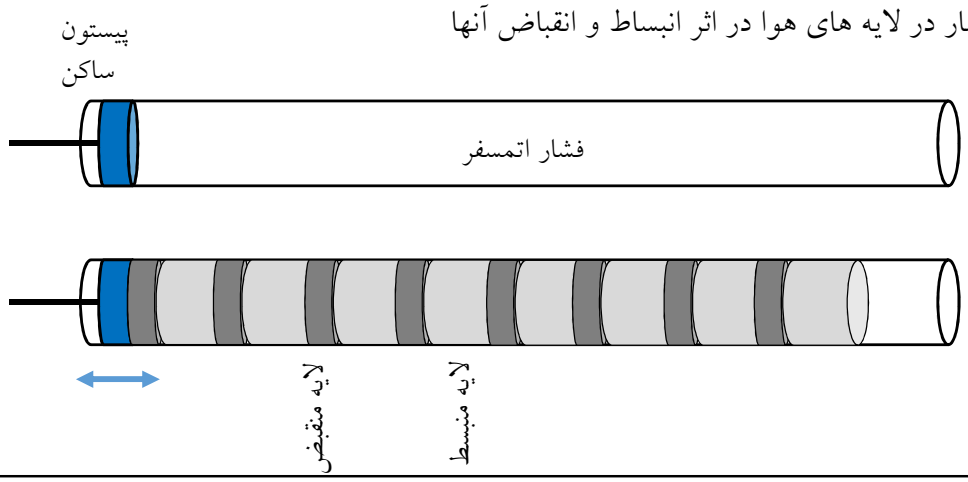
(6) (5)

$$\rho v^2 = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{v}} = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} = \beta$$

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$$

تاثیر انتشار صوت بر لایه های هوا

عبور موج صوتی درون محیط همراه خواهد بود با
- ❖ جابه جایی و نوسان المانهای (لایه) هوا
- ❖ تغییر فشار در لایه های هوا در اثر انبساط و انقباض آنها

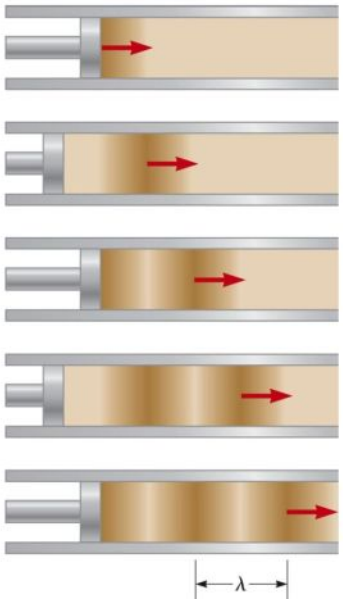


Producing a Periodic Sound Wave

A one-dimensional periodic sound wave can be produced by causing the piston to move in simple harmonic motion.

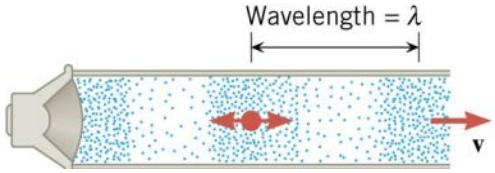
The darker parts of the areas in the figures represent areas where the gas is compressed and the density and pressure are above their equilibrium values.

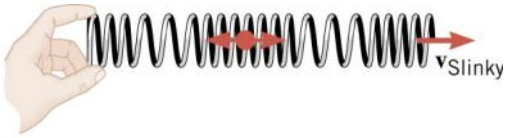
The compressed region is called a **compression.**



- ✓ با جلو رفتن پیستون در ابتدای محیط، هوای در مجاورت پیستون متراکم می شود (Condensation).
- ✓ در اثر تراکم فشار در لایه زیاد می شود
- ✓ لایه اول یک نیروی خالص به لایه مجاور وارد می سازد و آن را پس می زند
- ✓ درنتیجه لایه اول منبسط و لایه دوم (لایه مجاور) فشرده می شود.
- ✓ لذا فشار درون لایه اول کاهش و در لایه دوم زیاد می شود
- ✓ و با عقب بردن پیستون و انبساط لایه ها، فرآیند عکس رخ می دهد (Rarefaction).
- ✓ و به این ترتیب، انبساط و انقباض ها لایه به لایه به عنوان یک موج آشفتگی پیش می رود

Film 1



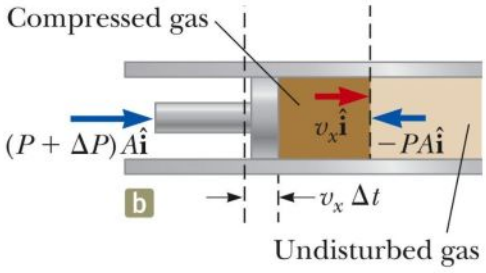


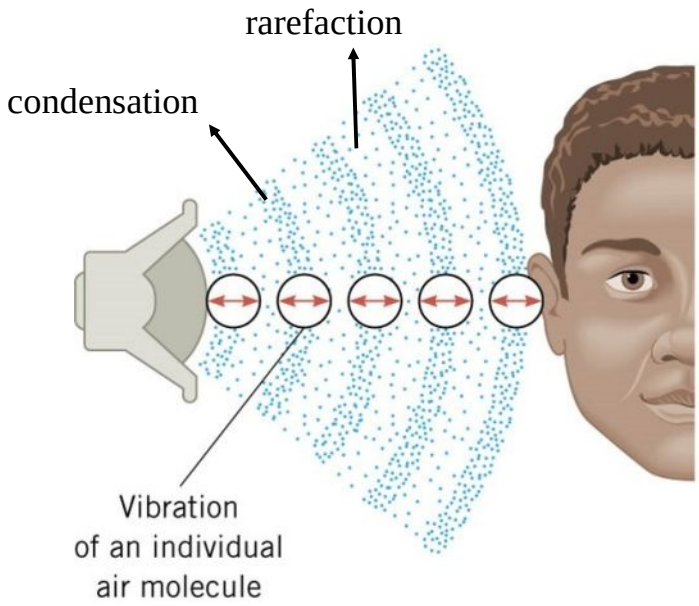
Speed of Sound in a Gas, cont.

After a time period, Δt, the piston has moved to the right at a constant speed v_x.

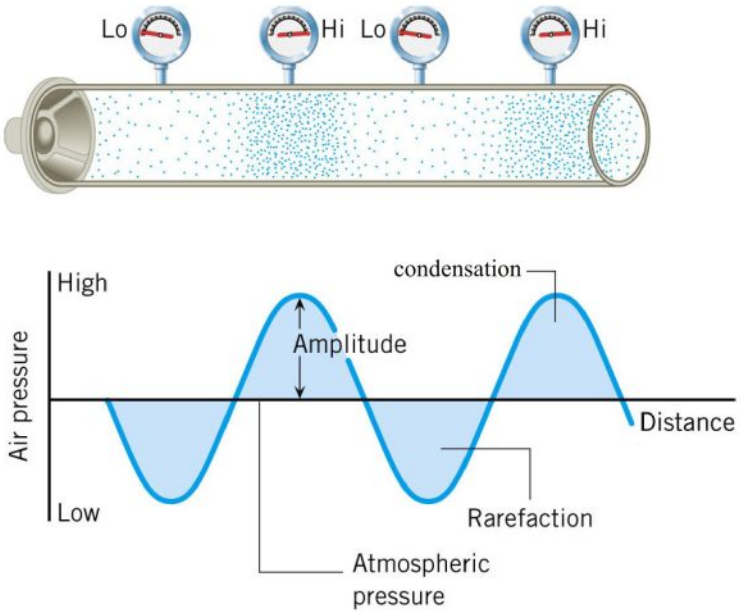
The force has increased from PA to $(P+\Delta P)A$.

The gas to the right of the element is undisturbed since the sound wave has not reached it yet.

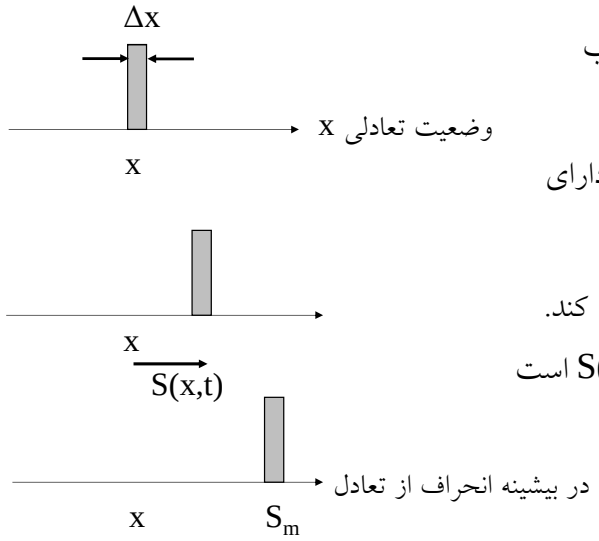



rarefaction
condensation
Vibration
of an individual
air molecule

Film 2


Lo
Hi
Lo
Hi
High
Air pressure
Low
condensation
Amplitude
Distance
Rarefaction
Atmospheric
pressure

نوسان المان های هوا در عبور موج صوتی



لایه های هوا با عبور موج از آنها به جلو و عقب نوسان می کنند

مثلا؛ المانی از هوا که در وضعیت تعادلی x و دارای طول Δx است

با عبور موج از المان، المان شروع به نوسان می کند.

جابه جایی المان از وضعیت تعادلی خود S(x,t) است

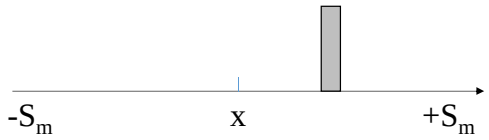
$$S(x,t) = S_m \cos(kx-\omega t)$$

$$S(x,t) = S_m \cos(kx-\omega t)$$

المان در لحظه t = 0 در بیشینه دامنه انحرافی از وضعیت تعادل قرار دارد

$$S_m << \lambda$$

دامنه نوسانی المانها — طول موج صوتی



$$-S_m < S(x,t) < +S_m$$

تغییر فشار درون المان های هوا در عبور موج صوتی

با نوسان المانهای هوا از وضع تعادل، هر المان با گذشت زمان دچار انبساط و انقباض می شوند.
تغییرات فشار داخل المان به صورت رابطه زیر است

$$\Delta P(x,t) = \Delta P_m \sin(kx - \omega t)$$?

۱- ΔP_m حداکثر تغییر فشار در المان است (دامنه تغییرات فشار)

۲- $-\Delta P_m \leq \Delta P \leq +\Delta P_m$

تغییر فشار در لایه هوا برای یک المان به صورت تناوبی با زمان تغییر می کند

۳-

ΔP: $-\Delta P_m \leq 0 \leq +\Delta P_m$

لایه منبسط شده و فشار درون آن کم می شود

لایه منقبض شده و فشار درون آن زیاد می شود

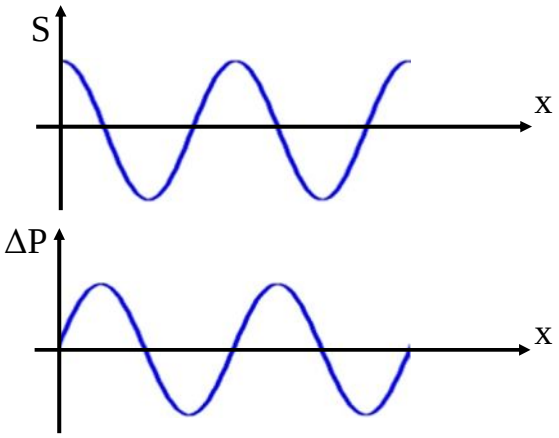
٤- تغییر فشار در لایه هوا ناشی از عبور موج خیلی کمتر از فشار اتمسفر است

$\Delta P_m << P$

برای یک صوت عادی $\Delta P_m = 0.03$ Pa و $P = 10^5$ Pa

۵- تغییر فشار در لایه هوا یک اختلاف فاز $\frac{\pi}{2}$ نسبت به جابه جایی لایه در حال نوسان دارد

فشار جایی بیشینه است که میزان جابه جایی المان از حالت تعادل صفر است

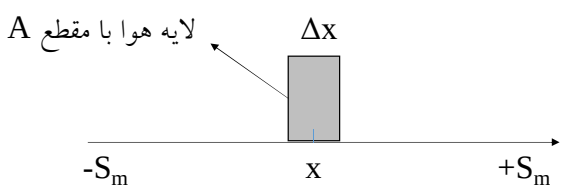


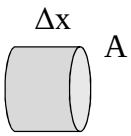
$$S(x,t) = S_m \cos(kx-\omega t)$$

$$\Delta P(x,t) = \Delta P_m \sin(kx-\omega t)$$

? $\Delta P_m = v\rho\omega S_m$ -٦

اثبات رابطه تغییر فشار در عبور صوت





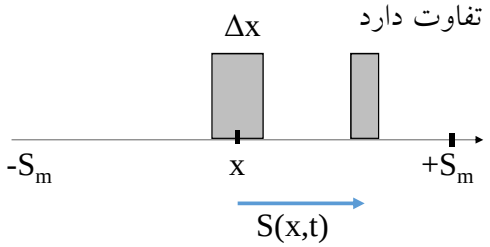
$V = \Delta x \cdot A$ (1)

حجم المان لایه ای هوا در نقطه تعادلی x برابر با $\Delta x\, A$ است. با جابه جایی المان از نقطه تعادل، حجم المان دستخوش تغییر می گردد

ΔV تغییر حجم

تغییر فشار ناشی تغییر ضخامت المان

میزان جابه جایی وجوه المان به مقطع A با همدیگر تفاوت دارد



با جابه جایی المان به اندازه S، ضخامت المان به اندازه ΔS تغییر می نماید

تغییر حجم المان $\Delta V = A \,.\, \Delta S$ (2)

ارتباط تغییر حجم با تغییر فشار $\beta = -\dfrac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} \Rightarrow \Delta P = -\beta \dfrac{\Delta V}{V}$ (3)

3 2 1

$$\Delta P = -\beta \frac{\Delta V}{V} = -\beta \frac{A\Delta S}{A\Delta x} \Rightarrow \Delta P = -\beta \frac{\Delta S}{\Delta x}$$

$$\Delta P = -\beta \frac{\partial S}{\partial x}$$

تغییرات ضخامت المان با جابه جا شدن المان در راستای x

$$S(x,t) = S_m \cos(kx-\omega t)$$

$$\Delta P = -\beta \frac{\partial S}{\partial x} = -\beta[-kS_m \sin(kx-\omega t)] = \beta k S_m \sin(kx-\omega t)$$

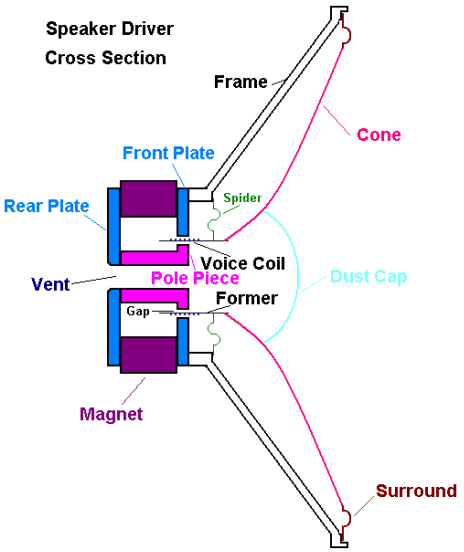
$$\Delta P_m = \beta k S_m \quad , \quad v^2 = \frac{\beta}{\rho} \rightarrow \beta = \rho v^2 \quad , \quad k = \frac{\omega}{v}$$

$$\Delta P_m = \rho v^2 k S_m = \rho v \omega S_m$$

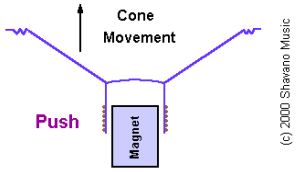
Speakers: Inverse Eardrums

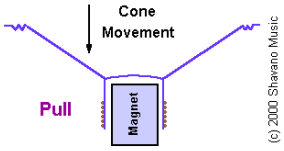
- Speakers vibrate and push on the air
  - pushing out creates compression
  - pulling back creates rarefaction
- Speaker must execute complex motion according to desired waveform
- Speaker is driven via “solenoid” idea:
  - electrical signal (AC) is sent into coil that surrounds a permanent magnet attached to speaker cone
  - depending on direction of current, the induced magnetic field either lines up with magnet or is opposite
  - results in pushing or pulling (attracting/repelling) magnet in coil, and thus pushing/pulling on center of cone

Speaker Geometry



Push Me, Pull Me





- When the center of the speaker cone is kicked, the whole cone can't respond instantaneously
  - the fastest any mechanical signal can travel through a material is at the speed of sound in the material
- The whole cone must move into place well before the wave period is complete
  - otherwise, different parts of the cone might be moving in while others are moving out (thus canceling the sound)
  - if we require the signal to travel from the center to the edge of the cone in $1/N$ of a wave cycle (N is some large-ish number):
    - available time is $\Delta t = 1/Nf = \lambda/Nc_{air}$
    - ripple in cone travels $c_{cone}\Delta t$, so radius of cone must be $< \lambda c_{cone}/Nc_{air}$
  - basic point is that speaker size is related to wavelength of sound
    - low frequency speakers are big, high frequency small

تداخل امواج صوتی

$$S_1 = S_m \cos(kx - \omega t)$$
$$S_2 = S_m \cos(kx - \omega t + \phi)$$

$$S' = \underbrace{2S_m \cos(\frac{\phi}{2})}_{S'_m} \cos(kx - \omega t + \frac{\phi}{2})$$

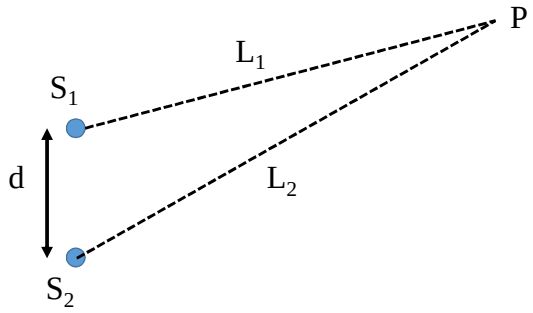
۱- دامنه موج حاصل از تداخل $S'_m = 2S_m \cos(\frac{\phi}{2})$

۲- کیفیت موج حاصل از تداخل به اختلاف فاز ϕ بین دو موج رسیده به نقطه مورد نظر وابسته است

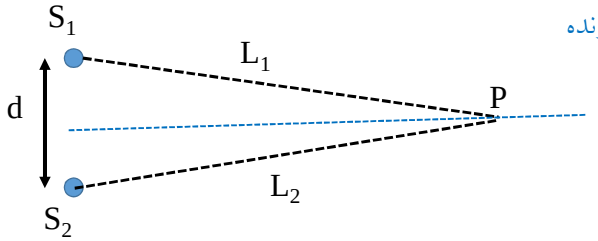
۳- ϕ را می توان توسط اختلاف راه بین موج های رسیده کنترل نمود

۱- صوت توسط دو چشمه نقطه ای S_1 و S_2 منتشر می شود. که چشمه ها؛ هم دامنه، هم فاط و هم طول موجند

۲- نقطه P در فاصله دور نسبت به دو چشمه قرار دارد بگونه ای که امواج رسیده به P را می توان تقریبا به صورت هم راستا در نظر گرفت



۳- اگر نقطه P روی عمود منصف خط واصل بین دو چشمه باشد فاصله طی شده توسط موج تا نقطه P ($L_1 = L_2$) بوده و بنابراین دو موج کاملا هم فازمی باشند. تداخل سازنده



$$S'_m = 2S_m \cos(\frac{\phi}{2}) \xrightarrow{\phi=0} S'_m = 2S_m$$

٤- اختلاف راه طی شده بین چشمه ها تا نقطه P منجر به اختلاف فاز شده است

$$S_1 = S_m \cos(kx_1 - \omega t)$$
$$S_2 = S_m \cos(kx_2 - \omega t)$$

$$\phi = kx_2 - kx_1 = k(L_2 - L_1) = k\Delta L$$

$$\phi = k(L_2 - L_1) = k\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L$$

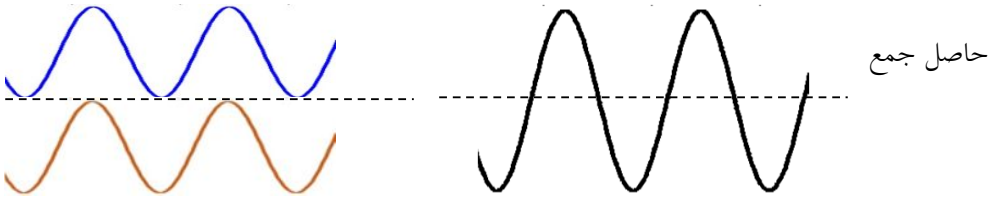
۵- تداخل سازنده:

اگر اختلاف فاز مضرب صحیحی از 2π باشد نوع تداخل سازنده خواهد بود و دامنه موج دو برابر دامنه هر کدام از موج ها خواهد بود

$$\phi = m\,(2\pi) \quad , m = 0 , 1 , 2 , \ldots$$

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta L}{\lambda} = m \quad \rightarrow \quad \Delta L = m\lambda$$

اگر اختلاف راه طی شده توسط دو صوت مضرب صحیحی از λ باشد نوع تداخل سازنده خواهد بود



حاصل جمع

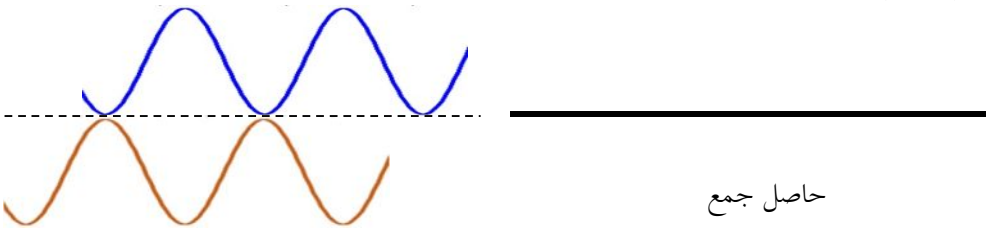
٦- تداخل ویرانگر:

اگر اختلاف فاز مضرب فردی از π باشد تداخل دو موج ویرانگر خواهد بود و همدیگر را حذف می کنند

$$\phi = (2m+1)\,\pi \quad , m = 0 , 1 , 2 , \ldots$$

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{2m+1}{2} \quad \rightarrow \quad \Delta L = (m+\frac{1}{2})\lambda$$

اگر اختلاف راه طی شده توسط دو صوت مضربی از $0.5\,\lambda$ یا $1.5\,\lambda$ یا $2.5\,\lambda$ و ... باشد نوع تداخل ویرانگر خواهد بود



حاصل جمع

Interference in Sound Waves

Sound from S can reach R by two different paths.

The distance along any path from speaker to receiver is called the **path length**, *r*.

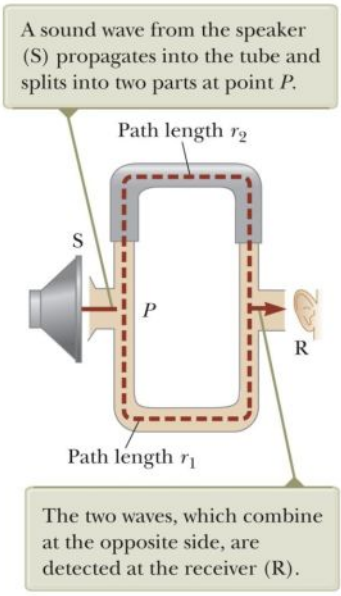
The lower path length, r_1, is fixed.

The upper path length, r_2, can be varied.

Whenever $\Delta r = |r_2 - r_1| = n\,\lambda$, constructive interference occurs.

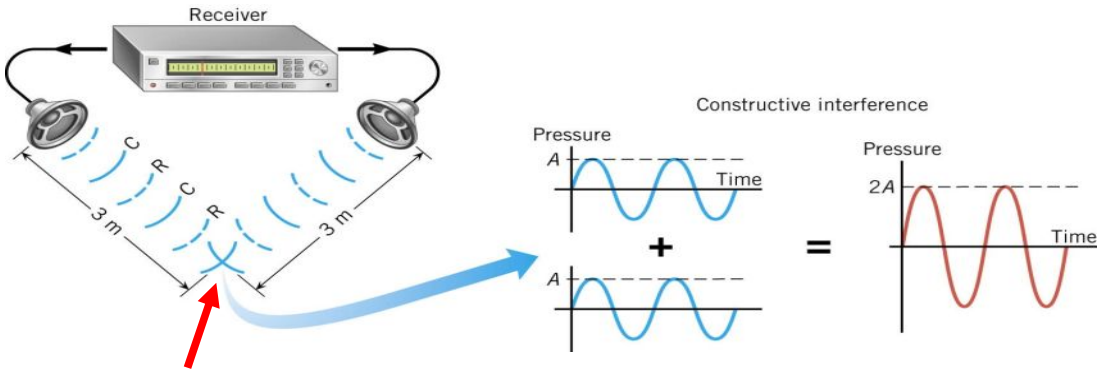
- $n = 0, 1, \ldots$

A maximum in sound intensity is detected at the receiver.



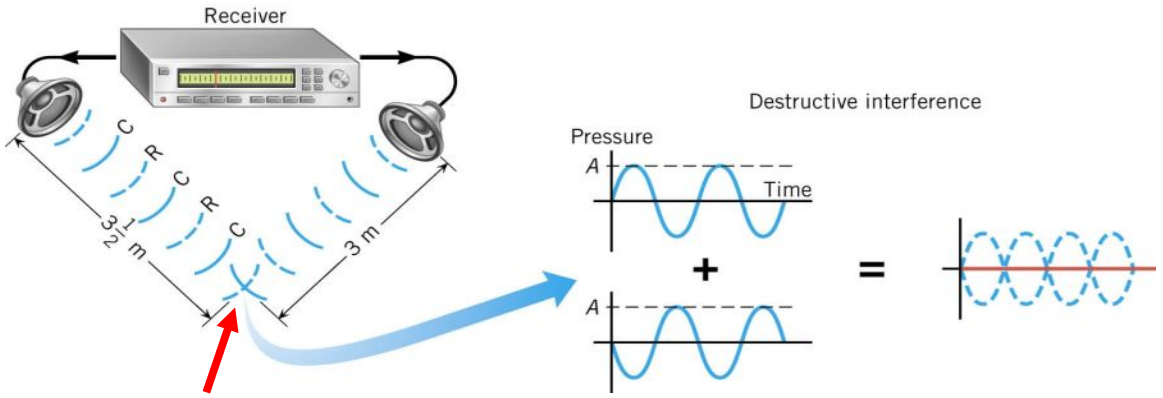
صوت منتشر شده توسط دو بلندگو دارای طول موجی برابر با 1 m می باشد.

در محل مشخص شده با توجه به آنکه اختلاف راه صفر است تداخل سازنده داریم

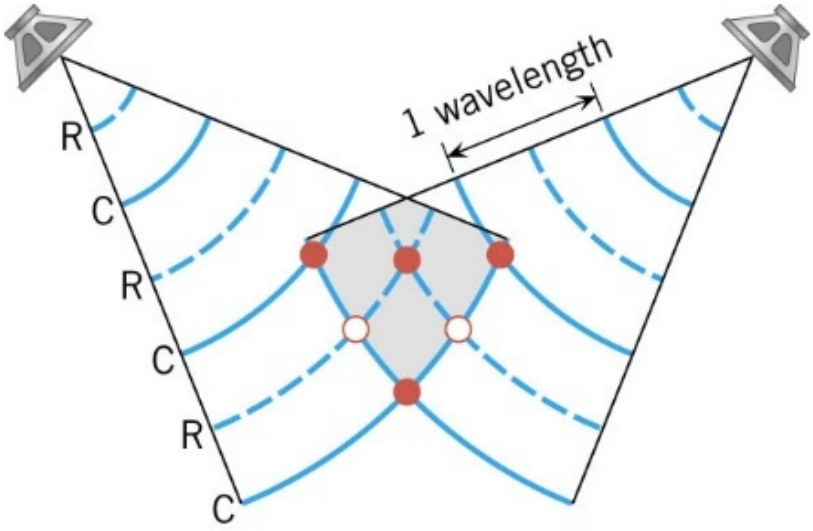


تداخل دو بعدی- ویرانگر

در محل مشخص شده با توجه به آنکه اختلاف راه نصف طول موج است تداخل ویرانگر داریم

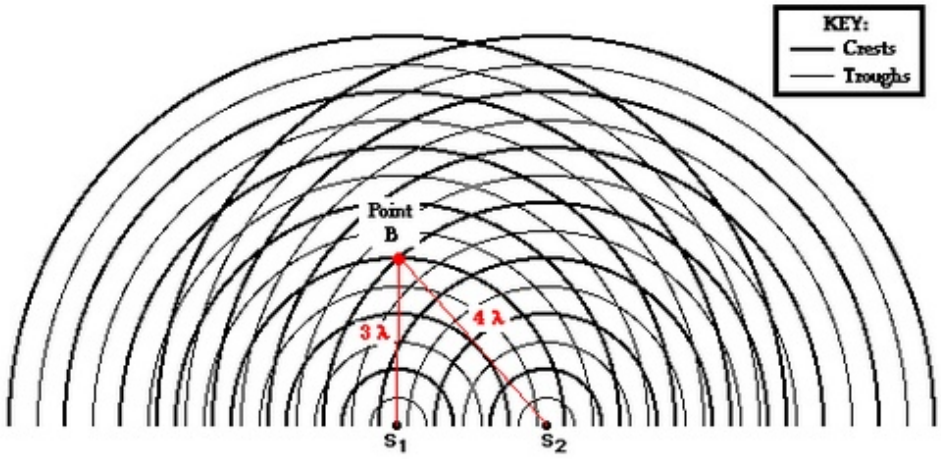


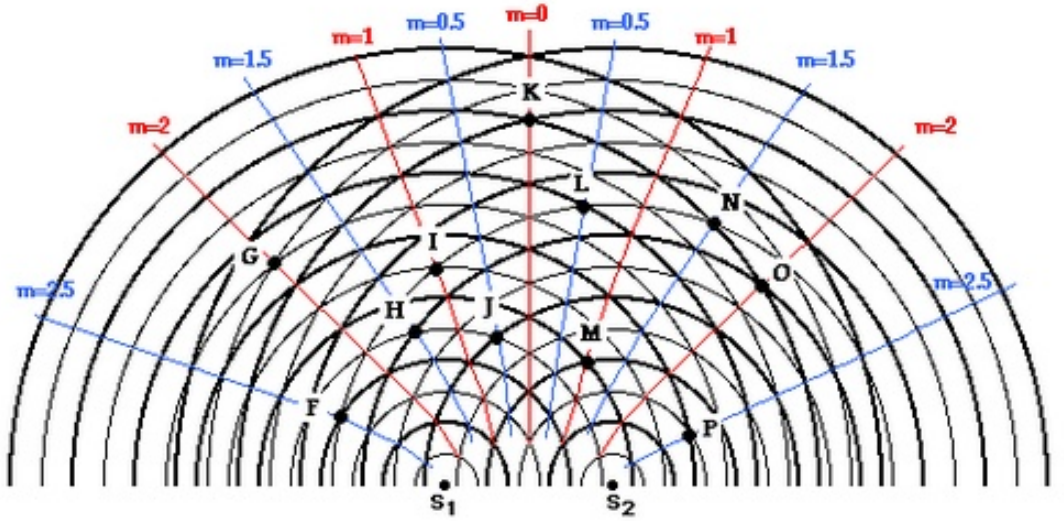
تداخل دو بعدی

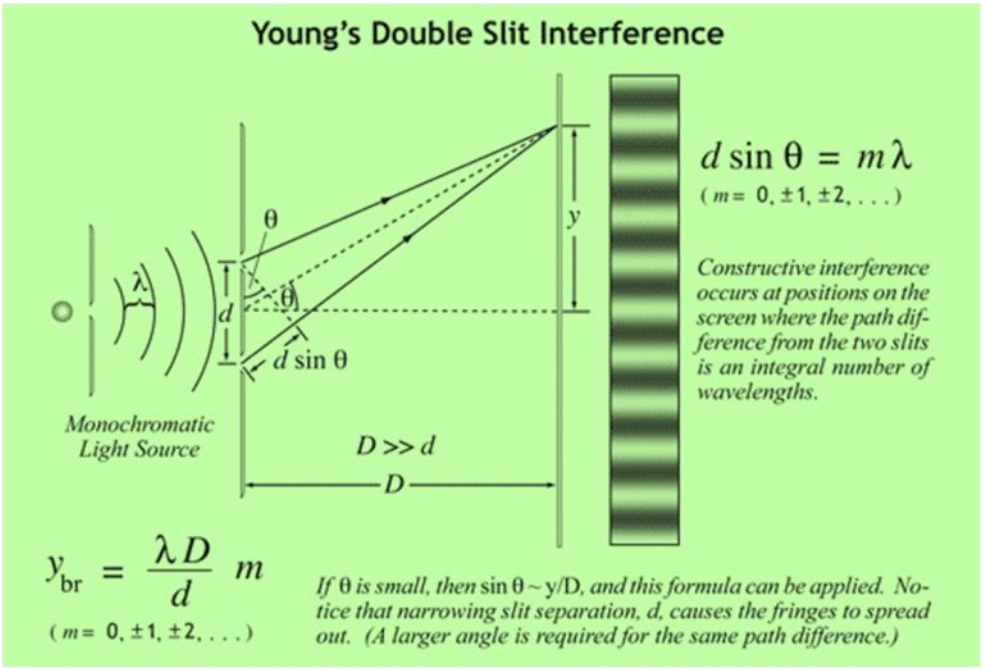


$PD = |S_1B - S_2B| = |3\lambda - 4\lambda| = 1\lambda$

PD = Path Difference
(in terms of λ's)







ضربان (Beat)

اگر دو موج صوتی با فرکانس های به هم نزدیک (f_1 و f_2) منتشر شوند:

تشخیص آنها از هم دشوار خواهد بود

به نحوی که یک تک صوت با فرکانسی برابر با متوسط دو فرکانس شنیده می شود

همچنین اعوجاج های منظمی در شدت صوت مشاهده می شود جایی که شدت به ارامی کم و زیاد می شود

ضربان های نوسان کننده در فرکانسی برابر با اختلاف فرکانس موج ها (f_2-f_1) تکرار می شوند

بررسی تغییرات وابسته به زمان جابه جایی یک المان از محیط

دامنه یکسان

فرکانسها متفاوت ($\omega_2 > \omega_1$)

x = 0 ⟶

$$s_1 = s_m \cos\omega_1 t$$
$$s_2 = s_m \cos\omega_2 t$$

$$s = s_1 + s_2 = s_m\left[\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t\right]$$

استفاده از معادله مثلثاتی زیر:

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos[\tfrac{1}{2}(\alpha - \beta)]\cos[\tfrac{1}{2}(\alpha + \beta)]$$

$$s = s_1 + s_2 = s_m\left[\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t\right]$$

$$s = 2s_m \cos[\tfrac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t]\cos[\tfrac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t]$$

$$\begin{cases} s = 2s_m \cos[\tfrac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t]\cos[\tfrac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t] \\ \omega' = \tfrac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \\ \omega = \tfrac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \end{cases}$$

$$s(t) = [2s_m \cos\omega' t]\cos\omega t$$

اگر فرکانس های زاویه ای خیلی به هم نزدیک باشند $\omega \gg \omega'$

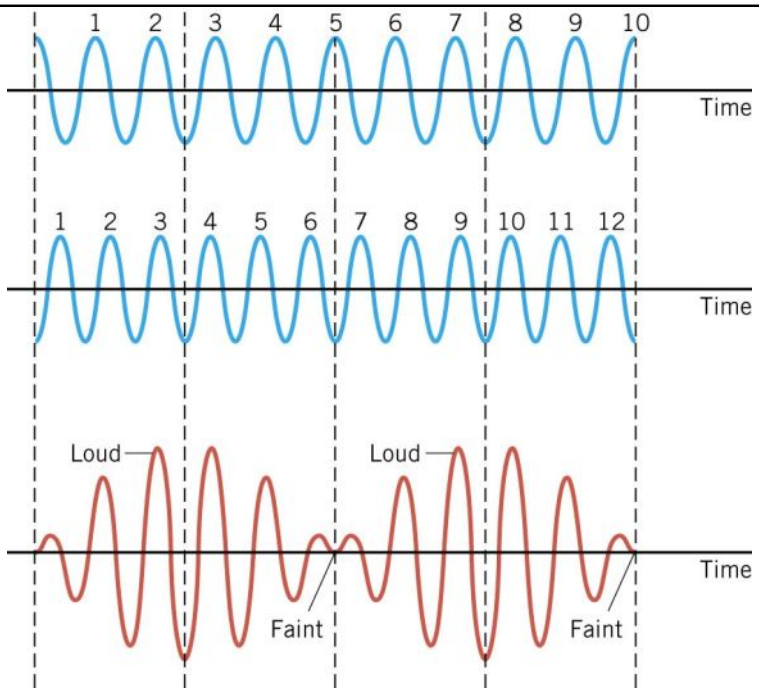
دامنه متغیر $2s_m \cos\omega' t$

$-1 \le \cos\omega' t \le +1$ پس دامنه در هر تکرار تابع کسینوسی دوبار بیشینه می شود

فرکانس زاویه ای ضربان $\omega_{beat} = 2\omega'$

$$\omega_{beat} = 2\omega' = (2)(\tfrac{1}{2})(\omega_1 - \omega_2) = \omega_1 - \omega_2$$

$f_{beat} = f_1 - f_2$ (beat frequency)



استفاده از ضربان در موسیقی

- A simple way to tune musical instruments is with beats
- If the notes are out of tune, you hear beats
- Adjust the tuning and try again
- If the frequency of the beats is higher, adjust the other way
- Keep adjusting until there are no more beats

Film 3