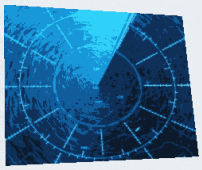
Echolokacja
E4V1S4

Akustolokacja lub sonolokacja dział echolokacji (teledetekcja) zajmujący się problemami lokalizacji i rozpoznawania obiektów za pomocą fal dźwiękowych (mechanicznych)

gr. *ακουστική* - dotyczący słuchu

łac. *sonus* – pochodzi także z jęz. gr. od słowa τόνος ozn. szum, hałas, dźwięk

Zastosowania



nawigacja

hydrografia

oceanologia

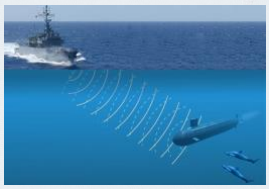
geologia

diagnostyka medyczna

glacjologia

miernictwo

diagnostyka przemysłowa (NDT, NDE)



sejsmologia

mikroskopia

zoologia

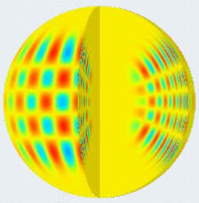
diagnostyka podwodna

meteorologia

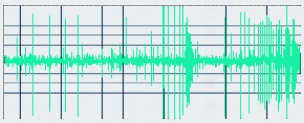
architektura

audiofonia

muzykologia



astronomia, kosmologia



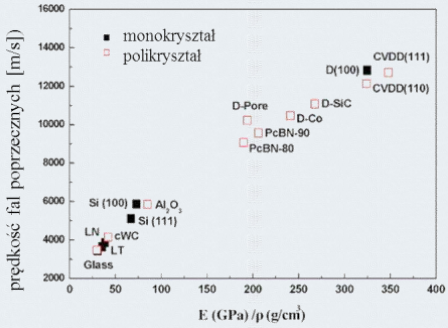
liczne zastosowania wojskowe

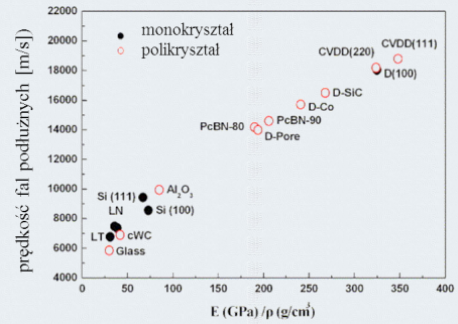
Widmo dźwięków

częstotliwość Debye'a $f_{max} = v\sqrt[3]{\frac{3N}{4\pi V}}$ N/V – liczba atomów na jednostkę objętości

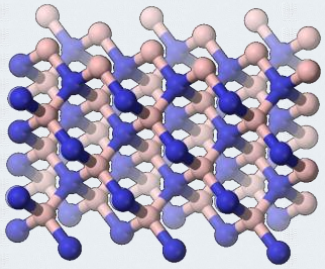
naturalne źródła dźwięków		przykłady zastosowań	minimalne długości fal
	1THz		
kolaps grawitacyjny drgania własne kryształów	hiperdźwięki	spektroskopia akustyczna technika sensorowa obróbka sygnałów	gazy $3{,}4\ 10^{-10}$ m ciecze $1{,}5\ 10^{-9}$ m ciała stałe $5\ 10^{-9}$ m
	1GHz		
drgania płyt maszyny wysokoobrotowe kawitacja krótkie piszczałki odgłosy zwierząt	ultradźwięki	mikroskopia NDT medycyna hydrolokacja czyszczenie	gazy $3{,}4\ 10^{-7}$ m ciecze $1{,}5\ 10^{-6}$ m ciała stałe $5\ 10^{-6}$ m
	16 kHz		
odgłosy zwierząt zjawiska przyrodnicze	dźwięki	komunikacja akustyczna rozrywka sonolokacja	gazy $2\ 10^{-2}$ m ciecze 0,1 m ciała stałe 0,3 m
	16 Hz		
wyładowania atmosferyczne fale sejsmiczne wibracje dużych obiektów detonacje	infradźwięki	badanie zjawisk sejsmicznych geolokacja	gazy 20 m ciecze 100 m ciała stałe 300 m
	0 Hz		

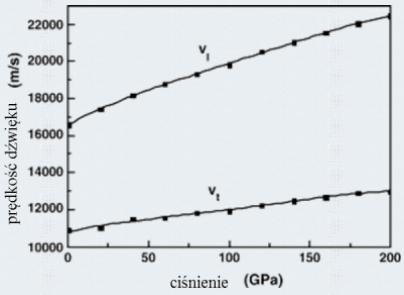
Prędkości dźwięku w kryształach





Azotek boru (kubiczny)





Prędkości dźwięku w ciałach stałych

stal węglowa	3 230
aluminium	3 100
miedź	2 260
blacha okrętowa	2 120
złoto	1 200
żelazo (elektrolityczne)	3 240
żeliwo	2 500
nikiel	2 960
tytan	3 125
wolfram (wygrzany)	2 890
cynk	2 440
szkło (pyrex)	3 280
szkło (krzemiankowe)	2 380
nylon	1 150
polietylen liniowy	540
polichlorek winylu	1 060
akryl	1 430

Prędkości dźwięku w ośrodkach ciekłych

substancja	kg/m³	m/s	m/s/°C	uwagi
aceton	0,791	1174	4,5	25 °C
amoniak	0,771	1729	6,68	- 33 °C
argon	1,400	853		- 188 °C
chloroform	1,489	979	3,4	25 °C
glikol dietylowy	1,116	1586	2,4	25 °C
alcohol etylowy	0,789	1207	4,0	25 °C
eter	0,713	985	4,87	25 °C
glikol	1,113	1658	2,1	25 °C
hel	0,125	1183	-	- 269 °C
wodór	0,071	1187		- 256 °C
rtęć	13,594	1449		24 °C
azot	0,808	962		- 199 °C
olej silnikowy (SAE 20a,30)	1,74	870		25 °C
tlen	1,155	952		-186 °C
Pentachlorine-ethane (47)	1,687	1082		25 °C
siarka		1177	-1,13	250 °C
kwas siarkowy	1,841	1257,6	1,43	25 °C
toluen	0,867	1328	4,27	20 °C
woda destylowana	0,996	1498	-2,4	25 °C
woda ciężka		1400		25 °C
woda morska	1,025	1531	-2,4	25 °C

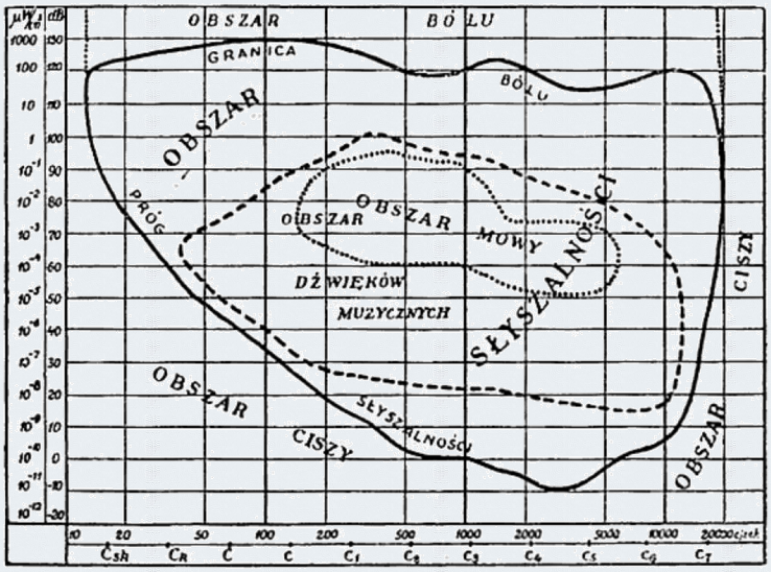
Prędkości dźwięku w gazach

powietrze	331
ditlenek węgla	259
tlen	316
hel	965
wodór	1290
para wodna	405

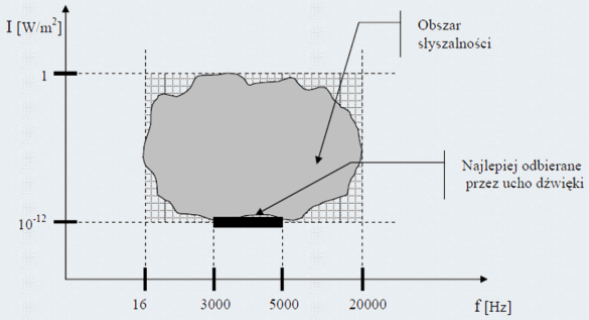
Prędkości dźwięku w powietrzu

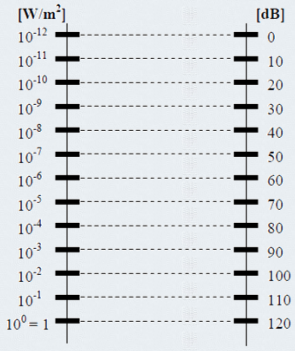
temperatura [°C]	prędkość [m/s]	gęstość [kg/m³]	impedancja akust. rayl=[N·s /m³]
+35	351,88	1,1455	403,2
+30	349,02	1,1644	406,5
+25	346,13	1,1839	409,4
+20	343,21	1,2041	413,3
+15	340,27	1,2250	416,9
+10	337,31	1,2466	420,5
+5	334,32	1,2690	424,3
0	331,30	1,2922	428,0
−5	328,25	1,3163	432,1
−10	325,18	1,3413	436,1
−15	322,07	1,3673	440,3
−20	318,94	1,3943	444,6
−25	315,77	1,4224	449,1

Poziomy dźwięku w okolicach obszaru słyszalności



Statystycznie ucho jest najbardziej czułe dla tonu o częstotliwości ok. 4 kHz.
Dla tonu o częstotliwości 1 kHz definiuje się nominalną wartość odniesienia ciśnienia akustycznego.
Jest ona określona na poziomie 20 µPa, co odpowiada natężeniu dźwięku 10^{-12} W/m^2



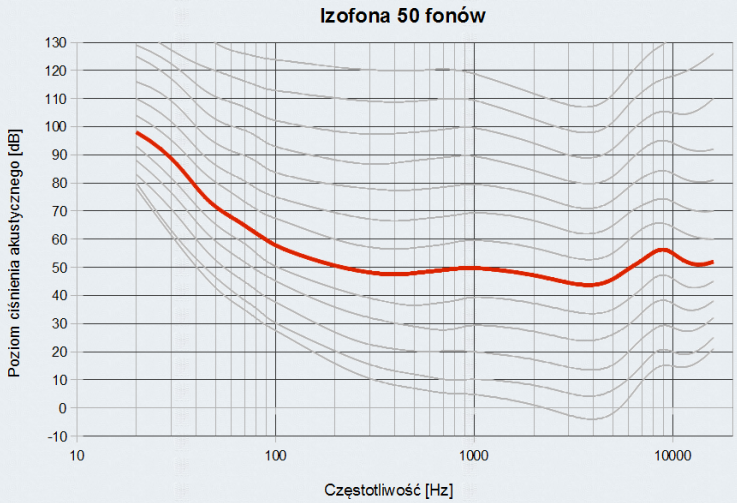


Jednostki poziomu głośności dźwięku

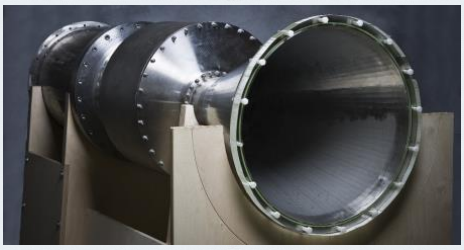
Fon – poziom głośności dowolnego dźwięku liczbowo równy (w mierze decybelowej) poziomowi natężenia tonu o częstotliwości 1 kHz.
Dźwięki o tej samej liczbie fonów wywołują to samo wrażenie głośności.
Fony nie podlegają arytmetycznemu sumowaniu przy obliczaniu całkowitego poziomu głośności kilku jednoczesnych dźwięków.

Son – liniowa jednostka głośności dźwięku.
1 son odpowiada głośności tonu o częstotliwości 1 kHz i natężeniu 40 dB, jest to więc ekwiwalent 40 fonów dla częstotliwości 1 kHz.
Zależność głośności w sonach od poziomu głośności w fonach jest w przybliżeniu liniowa.
Głośność dźwięku złożonego z kilku dźwięków o danych poziomach ciśnienia akustycznego wyznacza się według algorytmu:
poziom ciśnienia akustycznego [dB] →
poziom głośności [fony] →
głośność [sony] →
sumowanie sonów
Najmniejsza zmiana poziomu ciśnienia powodująca zmianę wrażenia głośności wynosi ok. 0,2 dB dla tonu 1 kHz.

son	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048
fon	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150

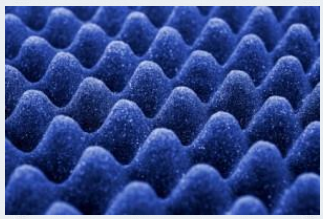


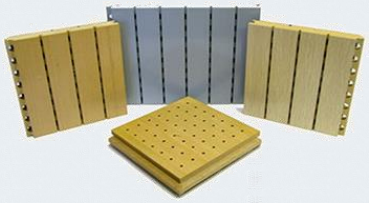
Poziomy głośności wybranych źródeł dźwięku

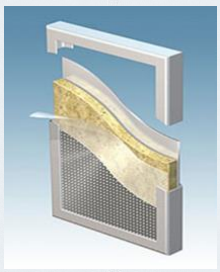


Pochłanianie energii fal dźwiękowych (0 – całkowite odbicie 1 – całkowite pochłonięcie)

material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
dywan	0,01	0,02	0,06	0,15	0,25	0,45
beton (surowy)	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
beton pomalowany	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
marmur (glazura)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
winyl na betonie	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
parkiet na betonie	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
puste siedzenie teatralne	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
zajęte siedzenie teatralne	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
ściana ceglana	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
drzwi drewniane	0,1	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
szkło (duża szyba)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
szkło (małą szyba)	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
płyta gipsowa	0,14	0,1	0,06	0,05	0,04	0,04
boazeria	0,2	0,18	0,15	0,12	0,1	0,1
draperia (340 g/m2)	0,04	0,05	0,11	0,18	0,3	0,35
draperia (612 g/m2	0,14	0,35	0,53	0,75	0,7	0,6
rozpyline włókna celulozy (16 mm)	0,05	0,16	0,44	0,79	0,9	0,91
rozpyline włókna celulozy (75 mm)	0,7	0,95	1	0,85	0,85	0,9
powierzchnia wody lub lodu	0,008	0,008	0,013	0,015	0,02	0,025







Akustolokacja jest możliwa dzięki zjawiskom
powodującym zmianę kierunku ruchu falowego

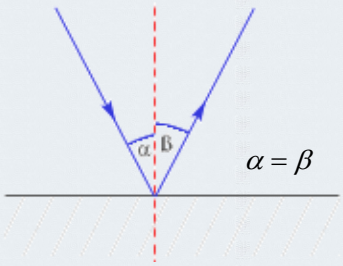
Paradoksalnie zjawiska te często nakładają poważne ograniczenia
na osiągi urządzeń lokacyjnych

Zasada Fermata

Fala biegnąca z jednego punktu do drugiego przebywa drogę, na której przebycie trzeba w porównaniu z innymi sąsiednimi drogami minimum lub maksimum czasu. Zasada ta prowadzi do wniosku, że fala w ośrodkach jednorodnych rozchodzi się po liniach prostych, a także podlega odbiciom i załamaniom.

$$\frac{ds}{dx} = 0$$

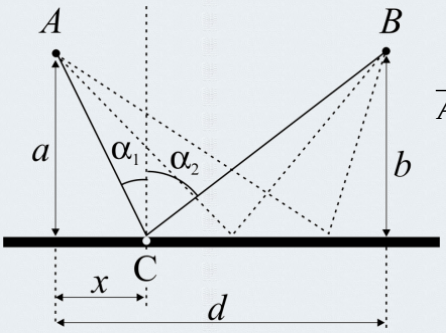
Prawo odbicia



$\alpha = \beta$

Przy odbiciu fali od ośrodka o wyższej sztywności następuje zmiana fazy na przeciwną

tor propagacji każdej fali spełnia zasadę Fermata



$$\overline{ACB} = s = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

$$\frac{dt}{dx} = 0 \rightarrow \frac{ds}{dx} = 0$$

$$\frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

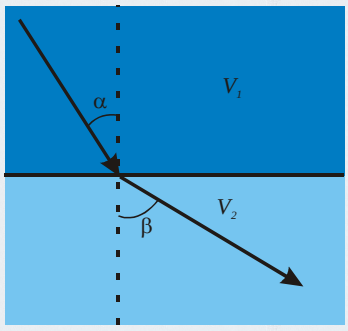
Fale rozchodzą się po liniach prostych ale tylko w ośrodku jednorodnym

$$\sin\alpha_1 = \sin\alpha_2$$

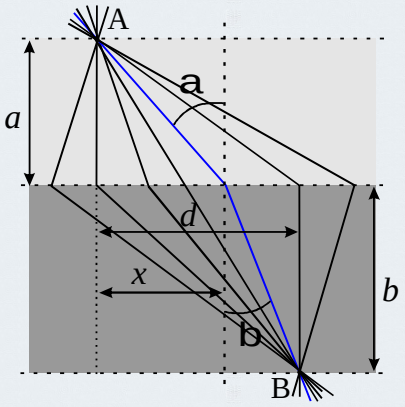
Prawo załamania (Snelliusa)

Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania, zwany współczynnikiem załamania *n* ośrodka drugiego względem pierwszego, jest równy stosunkowi prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku pierwszym do prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku drugim. Promień fali padającej, promień fali załamanej i prosta prostopadła (normalna) do granicy ośrodków leżą w jednej płaszczyźnie.
Zmiana kierunku rozchodzenia się fali nosi nazwę **refrakcji**.

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$



Związek ten wynika z zasady Fermata



$$\overline{AB} = s = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v_2}$$

$$\frac{dt}{dx} = 0$$

z zasady Fermata

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}}$$

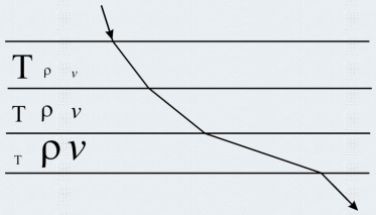
$$\frac{c}{v} \overset{def}{=} n$$

wsp. załamania

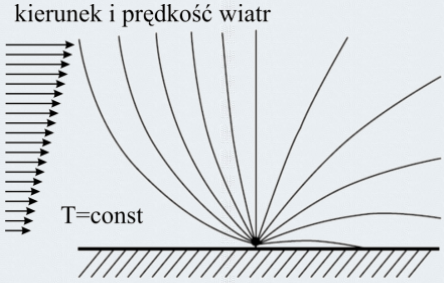
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Powstawanie stref głośnych i cichych

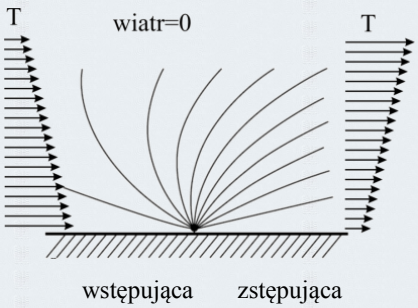
czasu propagacji = ekstremum



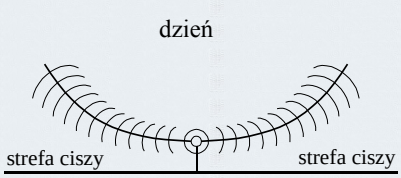
refrakcja wiatrowa

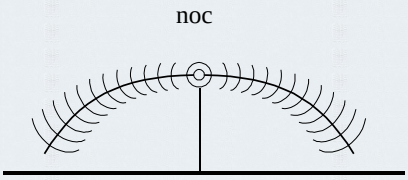


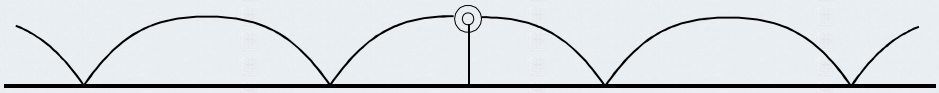
refrakcja temperaturowa



Temperaturowe anomalie refrakcyjne







powstawanie echa na wodzie w nocy

Rezonans akustyczny (mechaniczny)

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+\alpha\frac{dx}{dt}+kx=Fe^{j\omega t}$$

szukane rozw. w postaci $x=Ae^{j\omega t}$

r-nie charakt. $A(-m\omega_0^2+j\alpha\omega_0+k)=F$

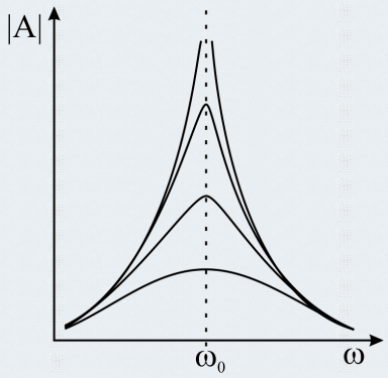
$\omega_0^2=\frac{k}{m}$ $\frac{1}{\tau}=\frac{\alpha}{m}$ $A=\frac{F/m}{\omega_0^2-\omega^2+\frac{j\omega}{\tau}}$

$$|A|=\frac{F/m}{\sqrt{\left(\omega_0^2-\omega^2\right)^2+\frac{\omega^2}{\tau^2}}}$$

arg A – przesunięcie fazowe między oscylacją własną a oscylacją siły wymuszającej

dla dużych wartości τ

$|A|\to\delta(\omega_0)$

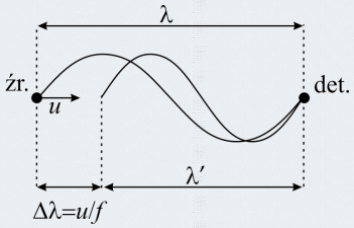


Efekt Dopplera-Ficeau

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

$$f' = \frac{c+v}{\lambda} = \frac{c+v}{c} f = \left(1+\frac{v}{c}\right) f$$

detektor nieruchomy – źródło porusza się z prędkością *u*



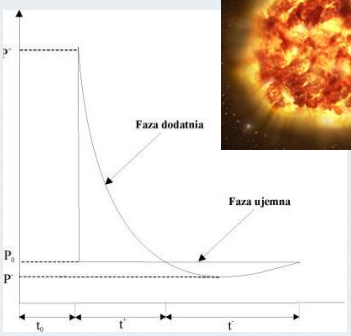
$$f' = \frac{c+v}{c-u} f$$

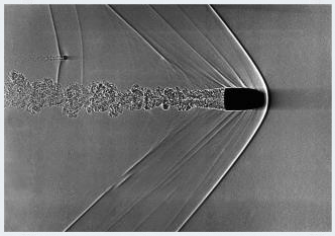
źródło i detektor są w ruchu

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - \Delta\lambda} = \frac{c}{\lambda - \frac{u}{f}} = \frac{c}{c-u} f = \left(\frac{1}{1-\frac{u}{c}}\right) f$$

Fala uderzeniowa

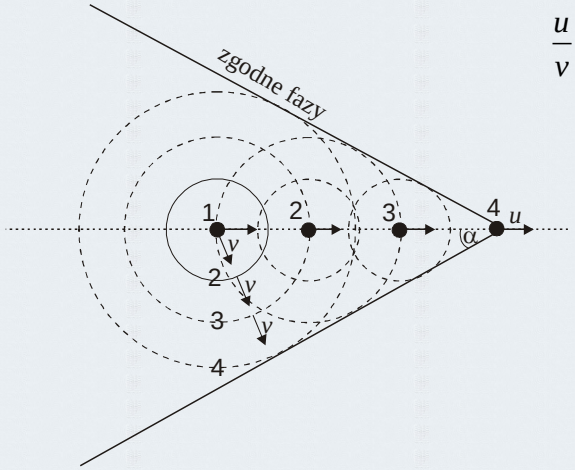
źródło szybsze od fali





bat i broń sejsmiczna

powstawanie fali uderzeniowej



$$\frac{u}{v} = \sin\alpha$$

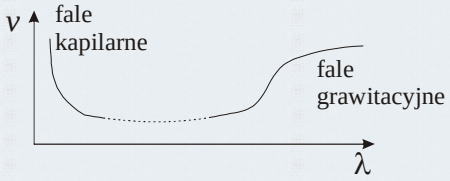
Fale na wodzie

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot th(kh)}{k}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} th \frac{2\pi h}{\lambda}}$$

na wodzie głębokiej $\lambda \ll h \quad th\,\alpha \approx 1$ $\qquad v = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$

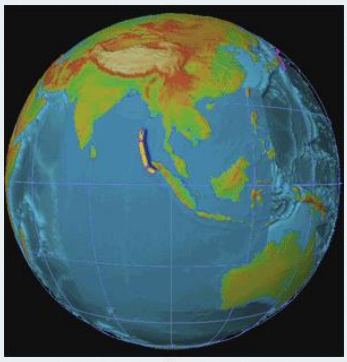
na wodzie płytkiej $\lambda \gg h \quad th\,\alpha \approx \alpha$ $\qquad v = \sqrt{gh}$

zmarszczki na wodzie (fale kapilarne) $\lambda < 10\,\text{cm}$ $\qquad v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}$



Zjawisko TSUNAMI

fale w wodzie płytkiej (sic!) $v = \sqrt{gh}$



10^{15}[J]

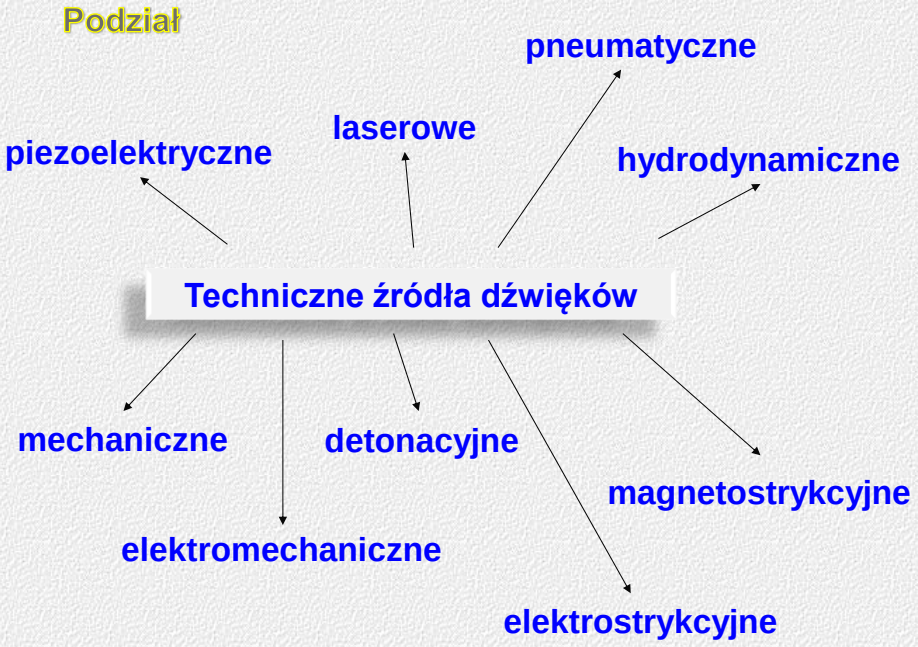
26. 12. 2004 – Ocean Indyjski

h [m]	v [km/h]	λ [km]
5000	800	160
10	36	7

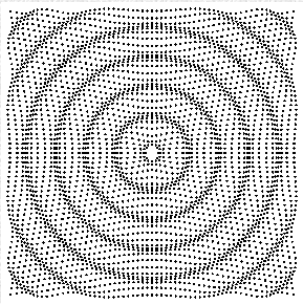
26. 12. 2004 – Ocean Indyjski

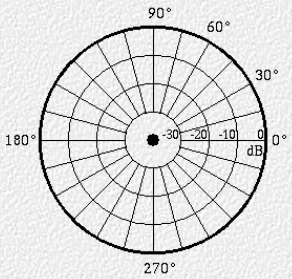
Techniczne źródła dźwięku

Podział

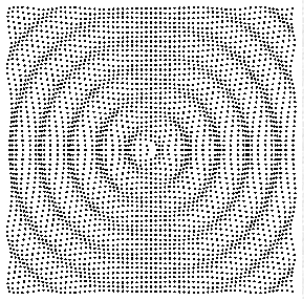


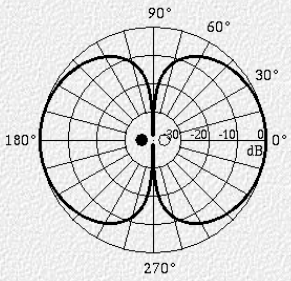
monopol





dipol

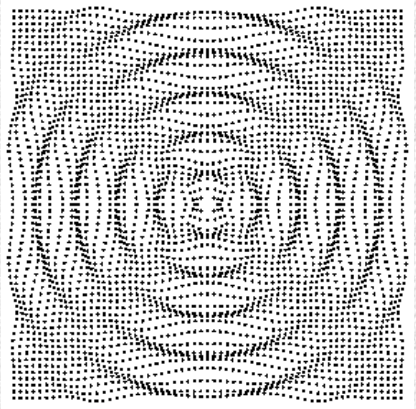


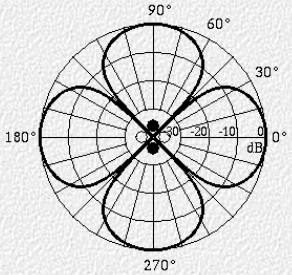


kwadrupol poprzeczny

układ czterech monopoli o parami przeciwnych fazach

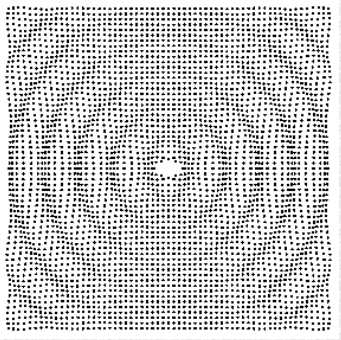
- monopole ulokowane są w narożach kwadratu

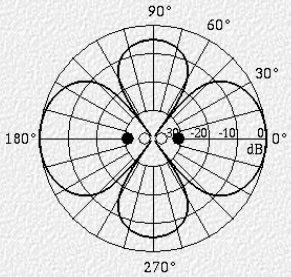




kwadrupol podłużny

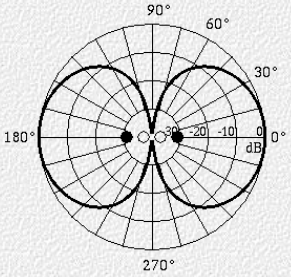
liniowy układ czterech monopoli o parami przeciwnych fazach





charakterystyka

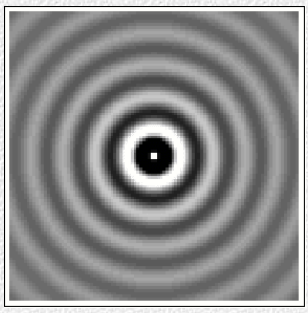
w polu bliskim

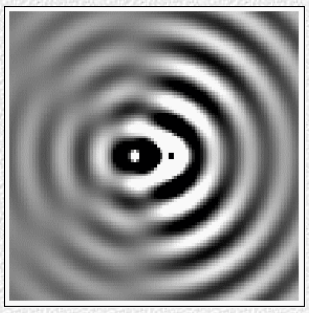


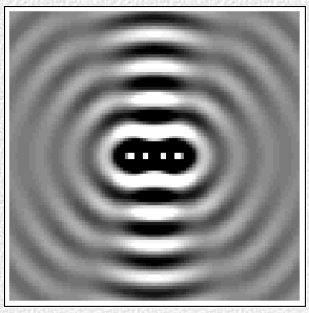
charakterystyka

w polu dalekim

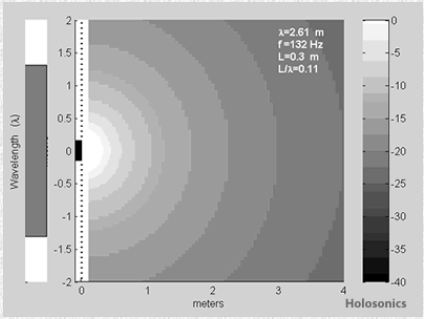
Każdy układ monopoli posiada określoną charakterystykę



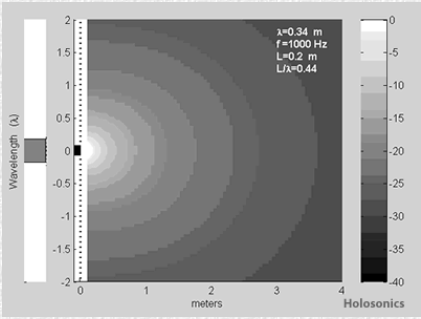




Promieniowanie źródła o stałych rozmiarach – zmienna częstotliwość

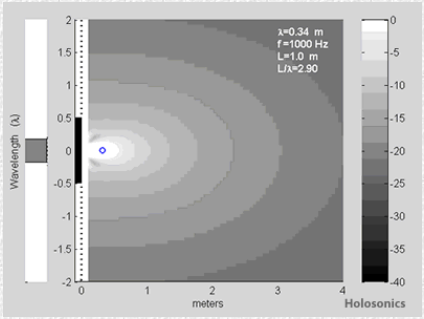


Promieniowanie źródła o stałej częstotliwości – zmienne rozmiary

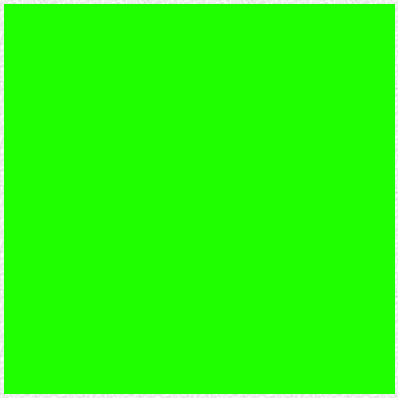


Promieniowanie kilku źródeł o stałej częstotliwości – zmienne fazy

Na niebiesko zaznaczony jest punkt ogniskowania wiązki

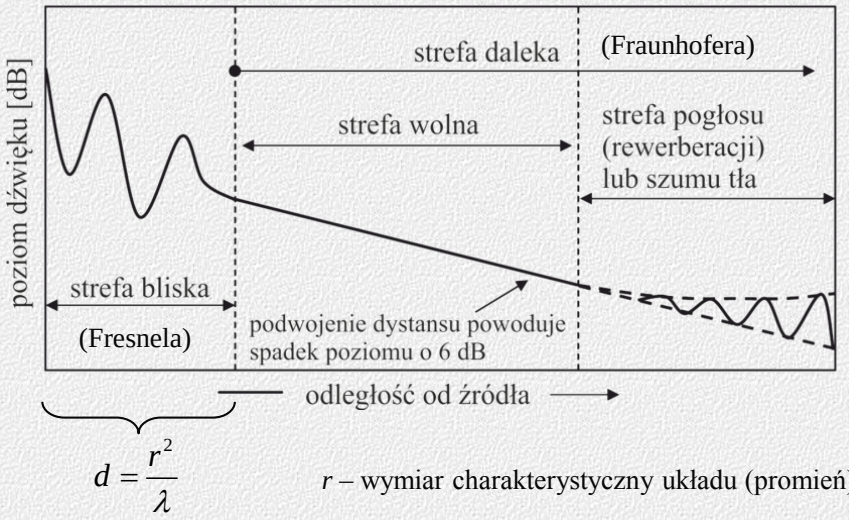


Impuls dźwiękowy generowany przez 5 źródeł o jednakowej fazie



Każde fizyczne źródło dźwięku jest pewnym układem monopoli

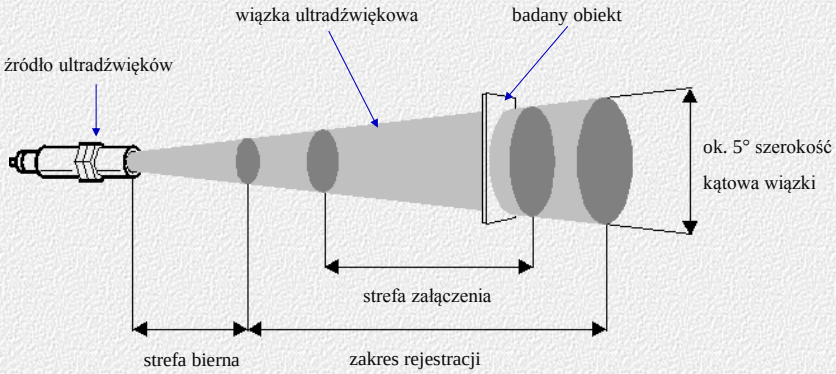
Fala generowana przez taki układ jest wynikiem interferencji fal pochodzących od każdego z monopoli



$$d = \frac{r^2}{\lambda}$$

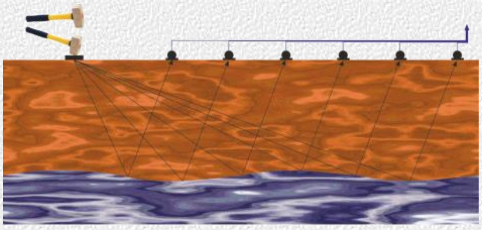
r – wymiar charakterystyczny układu (promień)

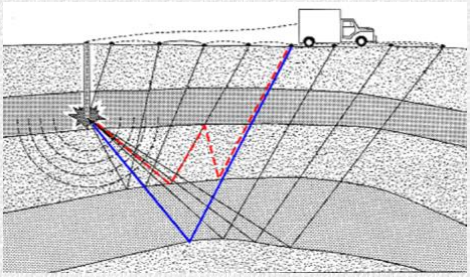
Pomiary wykonuje się zwykle w strefie wolnej

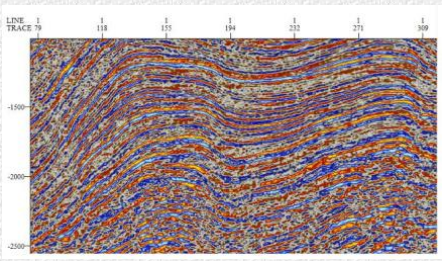


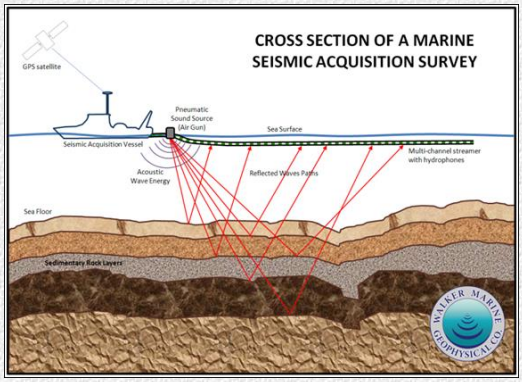
Moce źródeł dźwięku

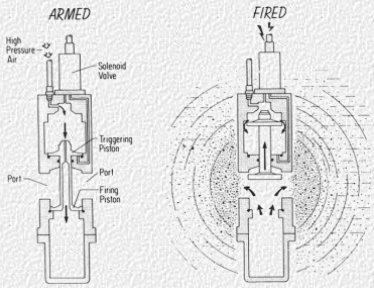
MAŁE	1 [W/cm^2]
ŚREDNIE	1 - 10 [W/cm^2]
DUŻE	10 – 100 [W/cm^2]

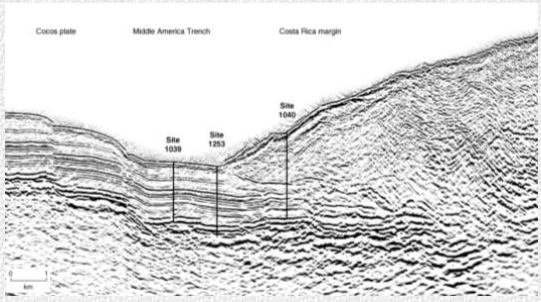




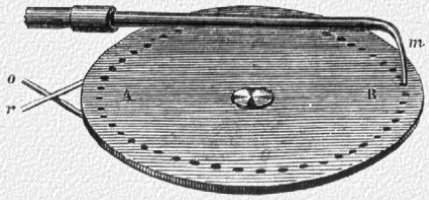






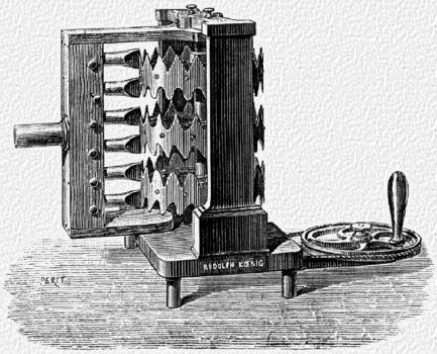


Syreny



Koeniga

Seebecka

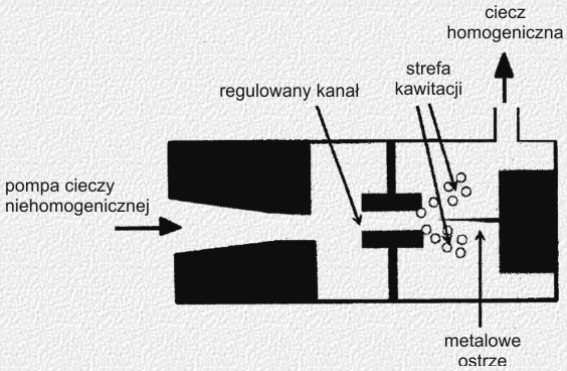


De la Tour

Savarta

Helmholtza

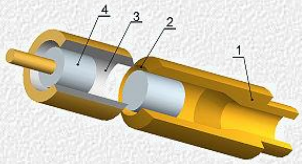
Gwizdek wodny



Służy do ultradźwiękowej homogenizacji cieczy

Piszczałka Galtona

$$f = v_0 \frac{\sqrt{1 + t/273}}{4(l + k)}$$



1 - dysza
2 - wnęka z kołowym ostrzem
3 - rezonator
4 - tłok regulacyjny

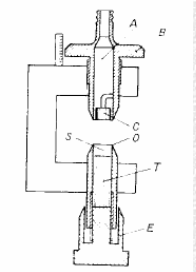
$v_0 = 331800 \quad mm/s$ prędkość dźwięku w powietrzu w temp. 0 °C

t - temperatura

l - głębokość wnęki w mm

k - stała dyszy zależna od ciśnienia powietrza na wlocie

Częstotliwość do 40 kHz, moc od 0,1 do 10 W



Rezonator Helmholtza

Dźwięk otrzymuje się wdmuchując powietrze do szyjki o przekroju S i długości L prowadzącej do zamkniętego naczynia o objętości V.

Jeśli w szyjce przesunąć powietrze o Δx to wewnątrz (jeśli proces jest adiabatyczny) ciśnienie zmieni się o wartość:

$$\Delta p = -\frac{\kappa p}{V}\Delta V = -\frac{\kappa p}{V} S\Delta x$$

Siła działająca zwrotnie na powietrze w szyjce $F = \Delta p S = -\frac{\kappa p}{V} S^2 \Delta x$

stąd równanie ruchu $ma = \rho L S \frac{\partial^2 \Delta x}{\partial t^2} = -\frac{\kappa p}{V} S^2 \Delta x$

i rozwiązanie w postaci $\omega^2 = \frac{\kappa p}{\rho}\frac{S}{VL}$

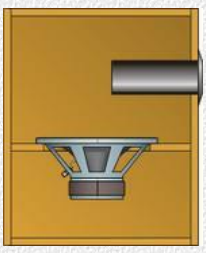
w powietrzu prędkość dźwięku zależy od gęstości

$$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} \quad \rightarrow \quad f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{VL}}$$

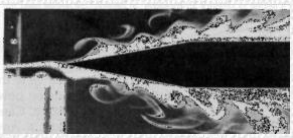
Np. dla 1-litrowej butelki z polem przekroju szyjki S = 3 cm^2 o długości L = 5 cm częstotliwość rezonansowa wynosi ok. 130 Hz, co odpowiada długości fali 2,6 m.

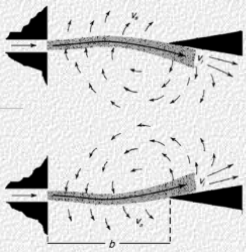
Długość fali znacznie przekracza rozmiary butelki!

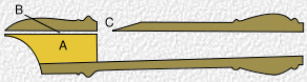
liczne interesujące zastosowania



piszczałki





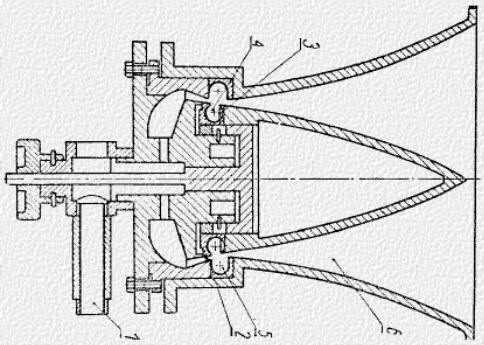


$$f = \frac{v}{4(l + 0{,}3d)}$$

v – prędkość dźwięku w ośrodku

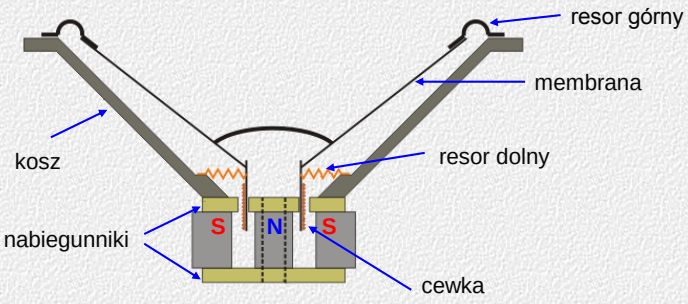
l – długość komory rezonansowej

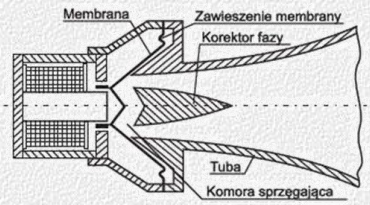
d – średnica komory rezonansowej



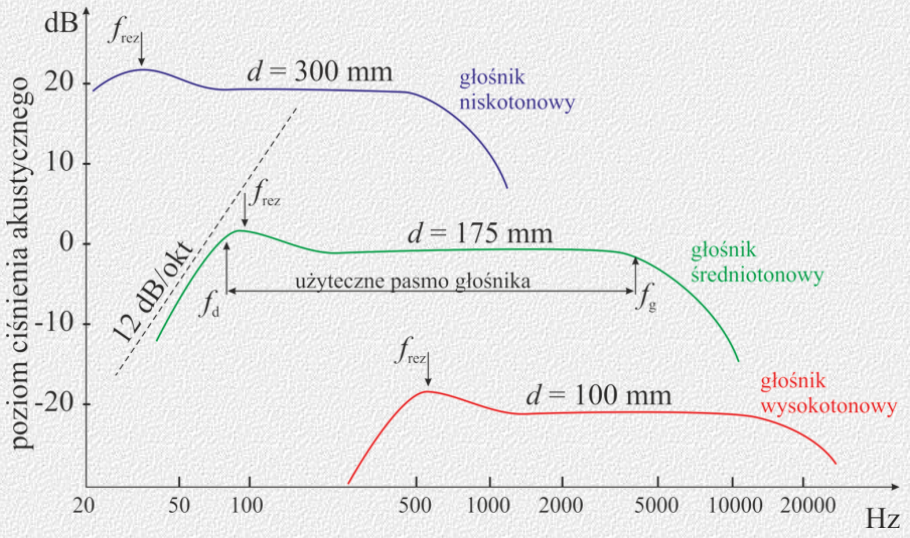
Generator Hartmenna

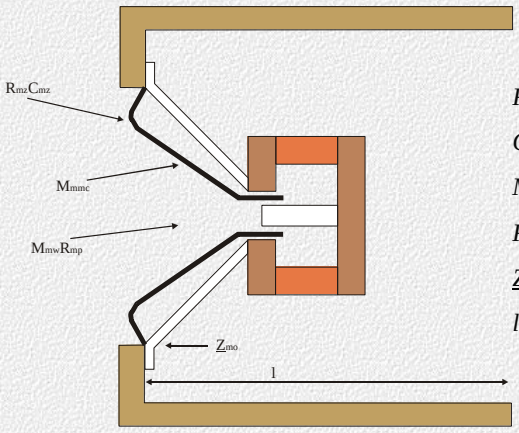
Przetworniki magnetoelektryczne





Charakterystyki częstotliwościowe głośników





R_m – rezystancja mechaniczna membrany

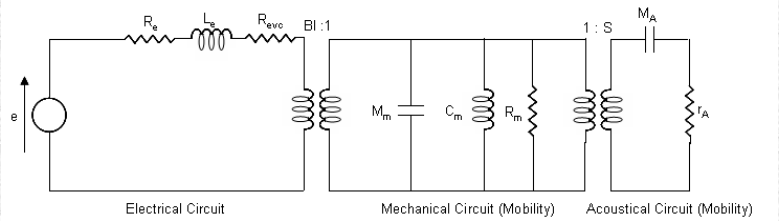
C_m – podatność mechaniczna membrany

M_m – masa mechaniczna membrany

R_{mp} – rezystancja mechaniczna

$\underline{Z}_m$ – impedancja mechaniczna

l – głębokość obudowy



Parametry głośnika

częstotliwość rezonansowa

VAS - objętość ekwiwalentna - objętość zastępcza obliczana na podstawie podatności zawieszenia i powierzchni membrany, dla głośników o średnicy 20 cm VAS = 40 .. 120

Efektywność - miara ciśnienia akustycznego w odległości jednego metra od głośnika

Efektywność mocowa - efektywność dla 1 W mocy dostarczanej do głośnika

Efektywność napięciowa - efektywność dla napięcia 2,83 V doprowadzonego do głośnika

Dla głośnika 8 Ω efektywności napięciowa i mocowa są równe, dla głośnika 4 Ω efektywność napięciowa jest większa o 3dB od efektywności mocowej.

Głośnik o mocy 100 W i efektywności 87 dB wytworzy takie samo natężenie dźwięku jak głośnik o mocy 50 W i efektywności 90 dB.

parametry Thiele'a – Smalla

Q_{ts} - dobroć całkowita

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Q_{ms} - dobroć mechaniczna

Q_{es} - dobroć elektryczna

S_d - powierzchnia membrany

B_l - siła która działa na cewkę głośnika

B - indukcja magnetyczna w szczelinie

L - indukcyjność cewki głośnika

X_{max} - maksymalne liniowe wychylenie membrany

P_e - moc znamionowa jaką głośnik może odbierać w sposób ciągły

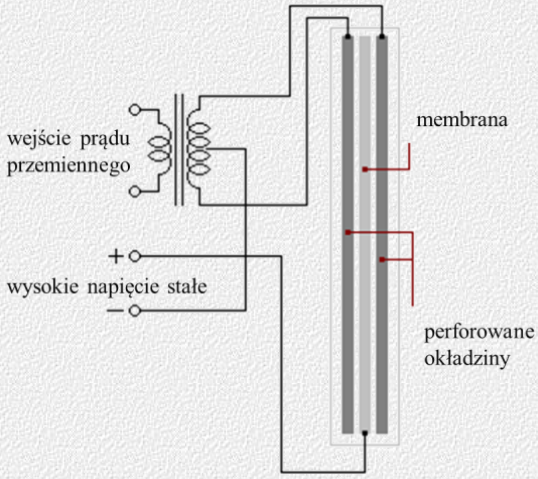
test DIN45-573 włączany na 1 min, wyłączany na okres 2 min test IEC 268-5 sygnał 100 godz.

moc znamionowa zależy od normy, wg której była mierzona

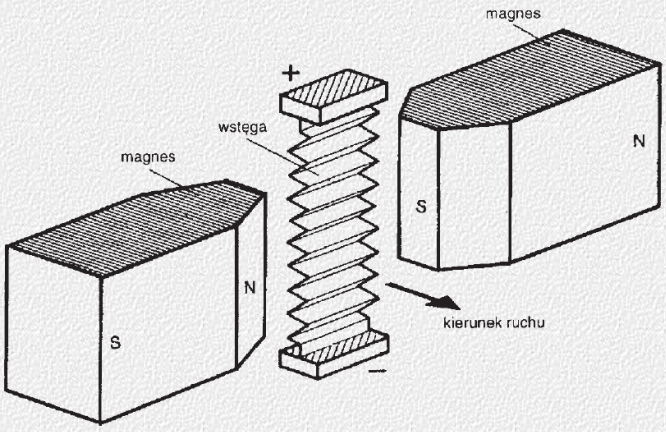
R_e - rezystancja cewki głośnika

M_{ms} - masa całego układu drgającego

Przetworniki elektrostatyczne

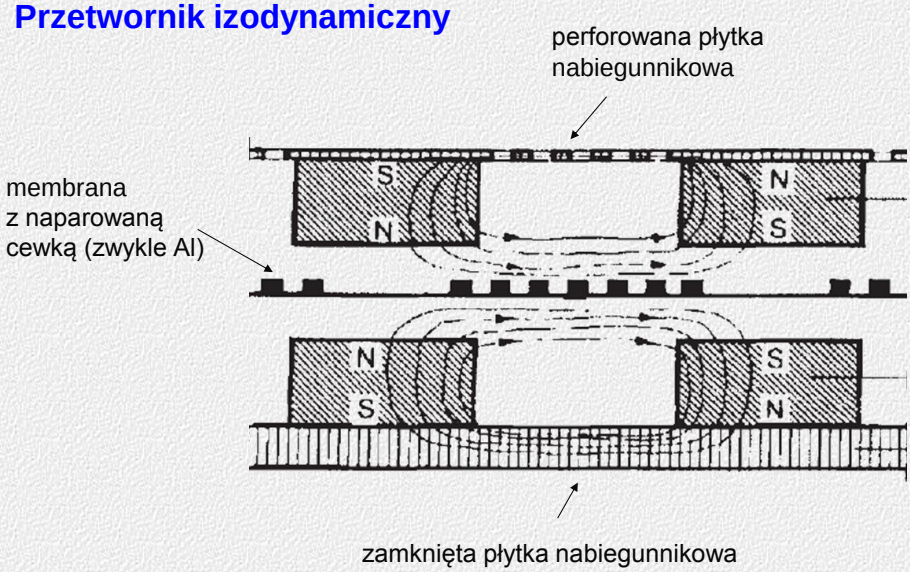


Głośnik wstęgowy



Niewielka amplituda drgań wysoka stałość impedancji

Przetwornik izodynamiczny



Niewielka amplituda drgań wysoka stałość impedancji

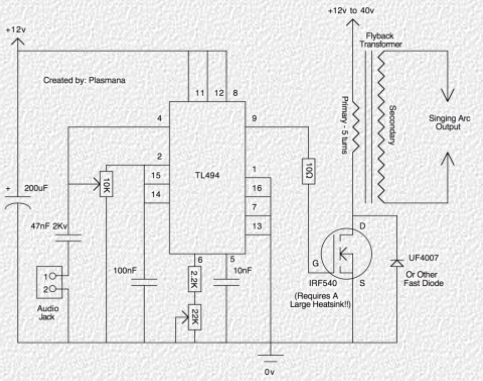
Przetwornik plazmowy (jonowy)

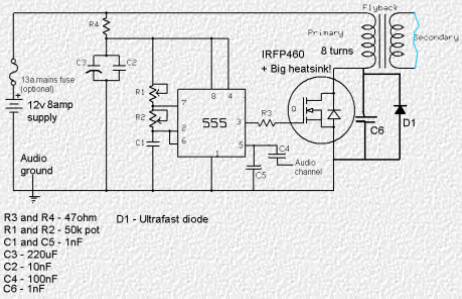
Kwazitemperatura plazmy zależna jest od prądu (zależność Benetta).

$$2Nk(T_{el} + T_{jon}) = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2$$

W przetworniku jonowym zmiany temperatury powodują zmiany ciśnienia i generowanie fal dźwiękowych.

przetwornik plazmowy dość łatwo wykonać samodzielnie

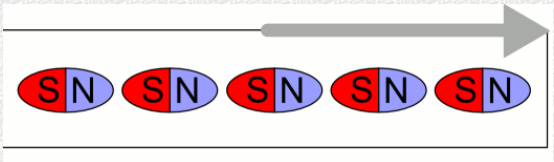




dobrze odtwarza tony wysokie,
- ultradźwięki do ok. 100 kHz

konieczne wysokie napięcie
wydzielany ozon
niska stabilność pracy

Magnetostrykcja

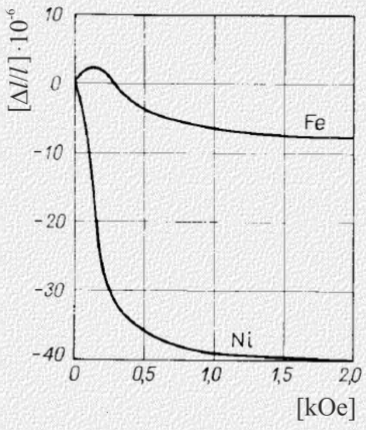


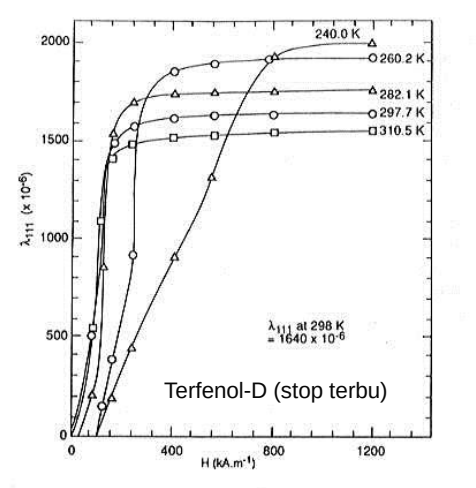
Odkrycie Joule'a. Zmiana rozmiarów ferromagnetyków pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Istnieje zjawisko odwrotne zwane efektem Villariego

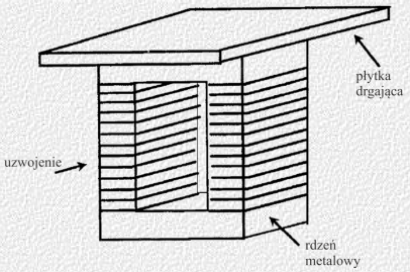
$$\frac{\Delta l}{l} = k_l B^2$$

k_l – współczynnik magnetostrykcji

B – indukcja magnetyczna

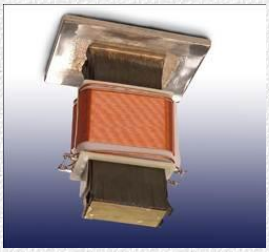


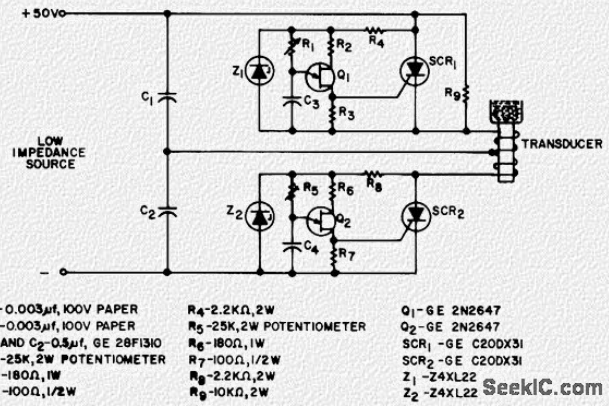




Osiąga się częstotliwości do ok. 100 kHz – dwukrotność częstotliwości prądu wzbudzającego i bardzo wysokie wartości mocy akustycznej.

różne wykonania

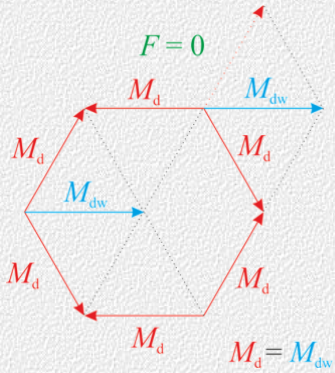




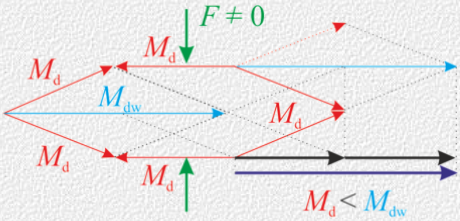
C3 - 0.003μf, 100V PAPER
C4 - 0.003μf, 100V PAPER
C1 AND C2 - 0.5μf, GE 28F1310
R1 - 25K, 2W POTENTIOMETER
R2 - 180Ω, 1W
R3 - 100Ω, 1/2W
R4 - 2.2KΩ, 2W
R5 - 25K, 2W POTENTIOMETER
R6 - 180Ω, 1W
R7 - 100Ω, 1/2W
R8 - 2.2KΩ, 2W
R9 - 10KΩ, 2W
Q1 - GE 2N2647
Q2 - GE 2N2647
SCR1 - GE C20DX31
SCR2 - GE C20DX31
Z1 - Z4XL22
Z2 - Z4XL22

SeekIC.com

Piezoelektryczność

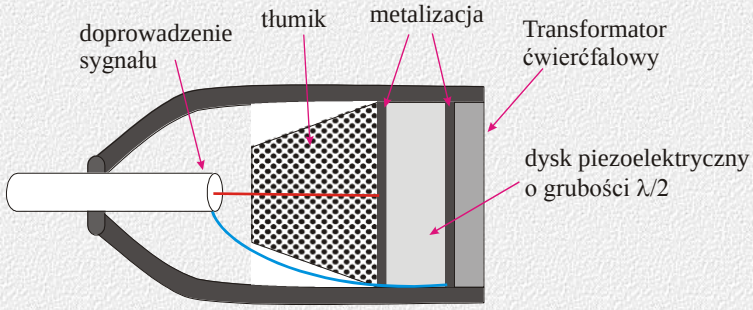


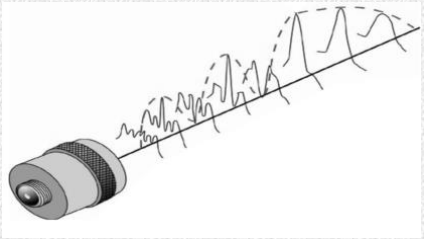
Całkowita kompensacja elektrycznych momentów dipolowych

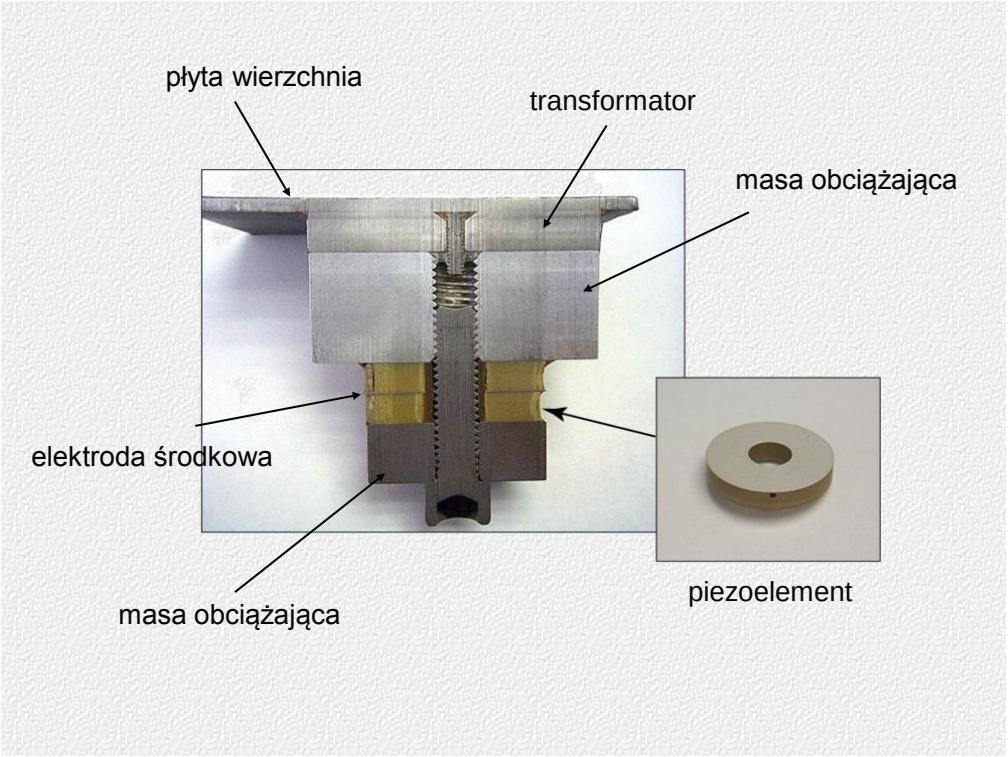


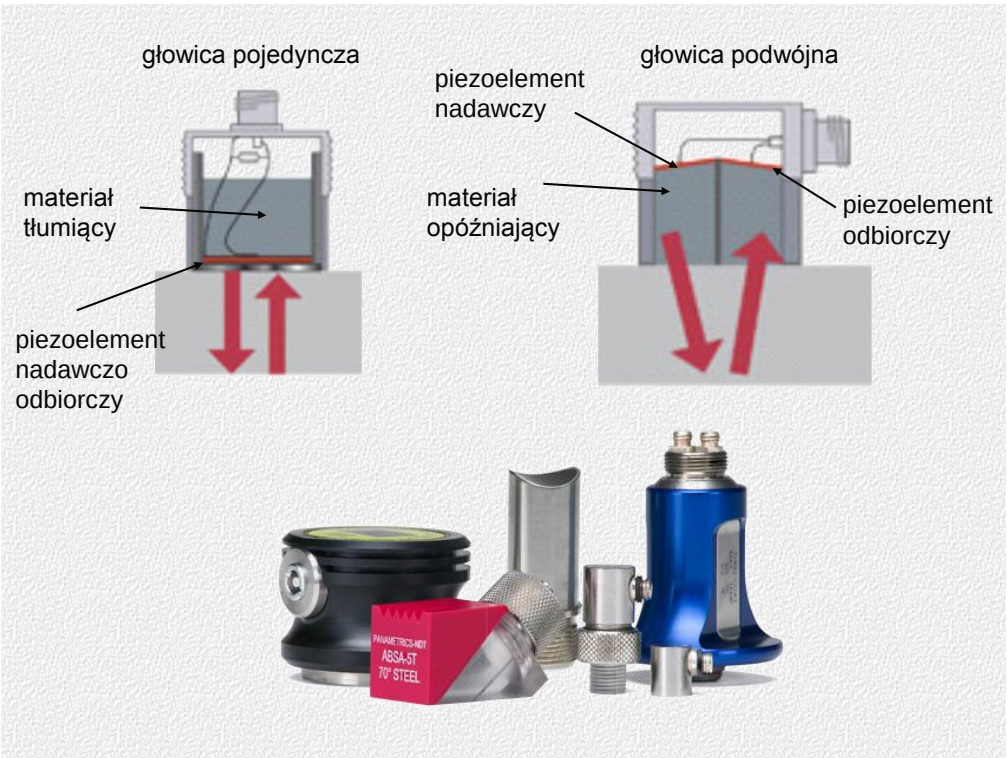
Brak całkowitej kompensacji elektrycznych momentów dipolowych

Kierunkowanie energii

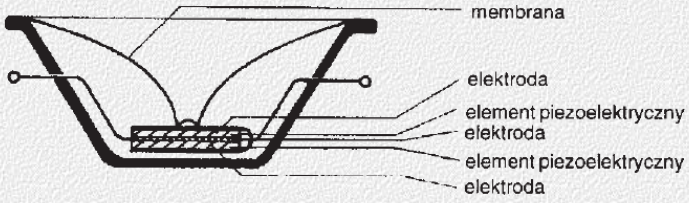




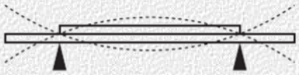

płyta wierzchnia
transformator
masa obciążająca
elektroda środkowa
masa obciążająca
piezoelement


głowica pojedyncza
materiał tłumiący
piezoelement nadawczo odbiorczy
głowica podwójna
piezoelement nadawczy
materiał opóźniający
piezoelement odbiorczy
PANAMETRICS-NDT
ABSA-5T
70° STEEL

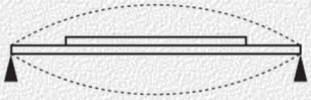
głośnik piezoelektryczny z membraną tubową



Płaskie membrany piezoelektryczne

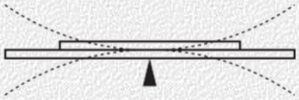


$\alpha \approx 0,412$



$\alpha \approx 0,233$

$$f_0 \approx \frac{\alpha h}{r^2} v$$

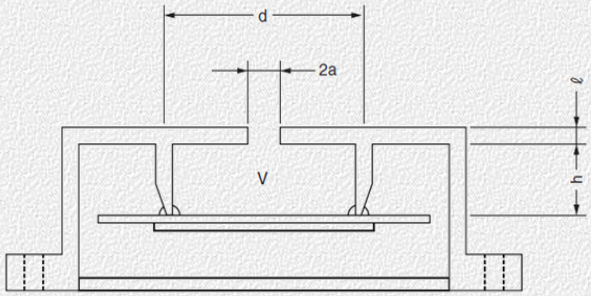


$\alpha \approx 0,172$

h – grubość przetwornika

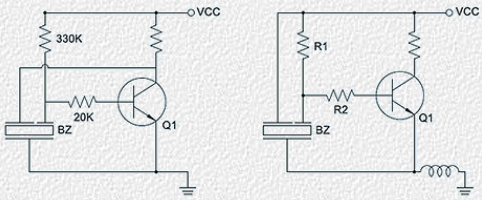
r – promień przetwornika

Płaska membrana piezoelektryczna w komorze rezonansowej



$$f_0 = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{4a^2}{d^2 h(l+1,3a)}} \qquad \text{[Hz, cm/s, cm]}$$

Oscylator samodrgający



V_{cc}= 1,5 – 12 V

I_{max} = 8 mA przy 6.0VDC

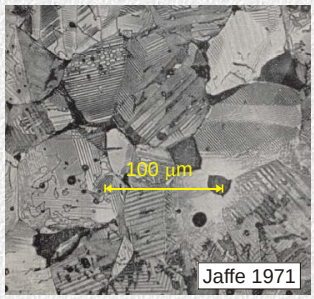
P_{akust} = 80 dB przy 6,0V / 10 cm

f_0 = 4 ±0.5 kHz

T_{pracy} = -20 do +70 °C

Elektrostrykcja

Ferroelektryki charakteryzują się strukturą domenową, tj. posiadają obszary gdzie elementarne momenty dipolowe są ustawione zgodnie. Dlatego poniżej pewnej temperatury (tzw. Temperatury Curie), gdy ruchy termiczne nie burzą tego uporządkowania, zachowują się one podobnie jak ferromagnetyki. Zjawisko to wykryto po raz pierwszy w soli Seignetta. Najbardziej rozpowszechnionym obecnie ferro-elektrykiem jest $BaTiO_3$.



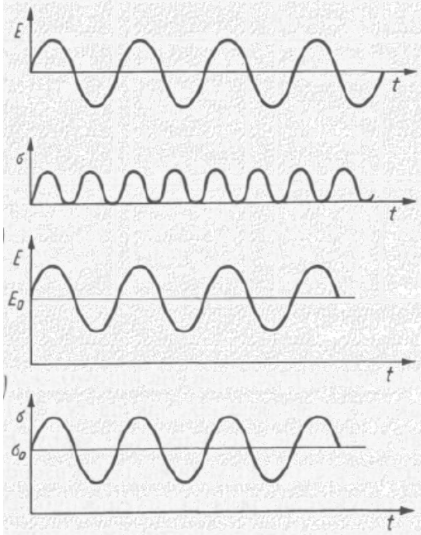
Elektrostrykcja jest efektem polegającym na zmianie rozmiarów kryształu pod wpływem pola elektrycznego. Odwrócenie kierunku pola nie skutkuje odwróceniem deformacji. Zmiana rozmiarów jest zwykle niewielka i spowodowana reorientacją molekuł.

Współczynnik deformacji (elektyrostrykcyjny) jest tensorem 4-tej walencji:

$$S_{ij} = Q_{ijkl} \times P_k \times P_l$$

P_i są wektorami polaryzacji

Zjawisko elektrostrykcji jest parzyste



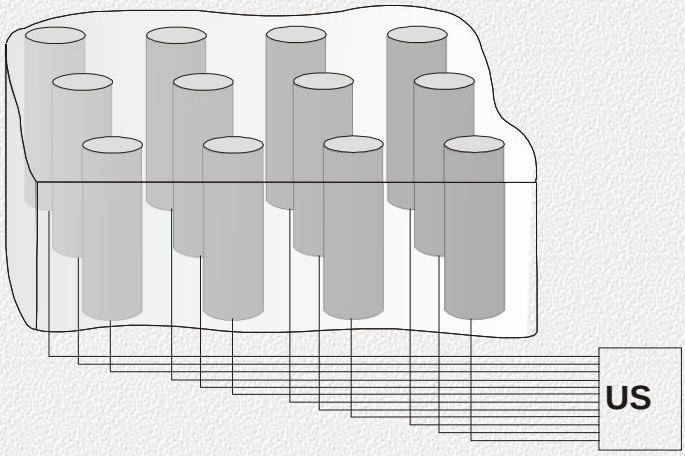
zmiany pola elektrycznego z częstotliwością = ω

zmiany odkształceń z częstotliwością = 2ω

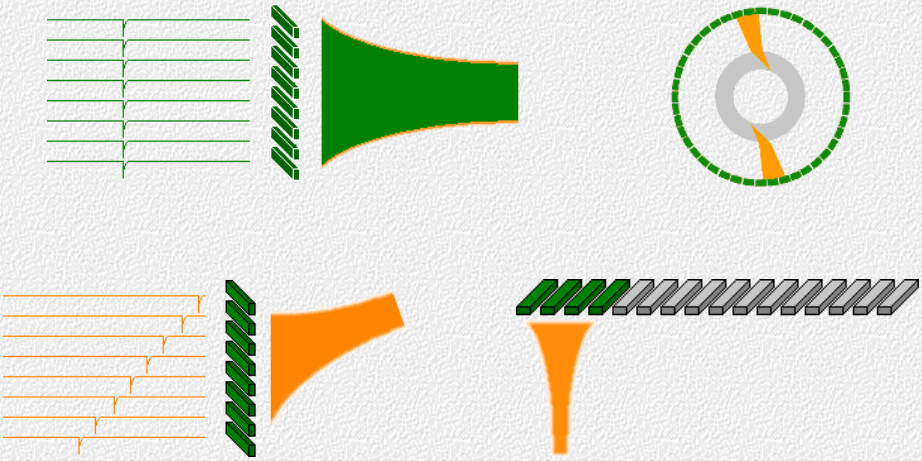
zmiany pola po wprowadzeniu wstępnej polaryzacji

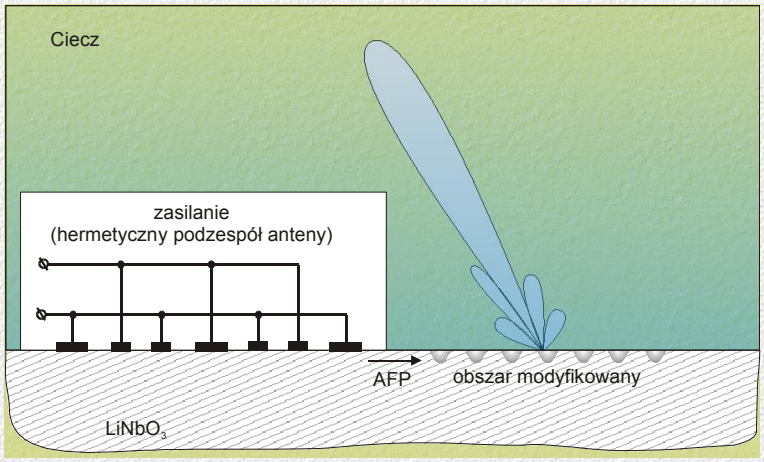
zmiany odkształceń po spolaryzowaniu (pseudo-piezoelektryczność)

szyki fazowane

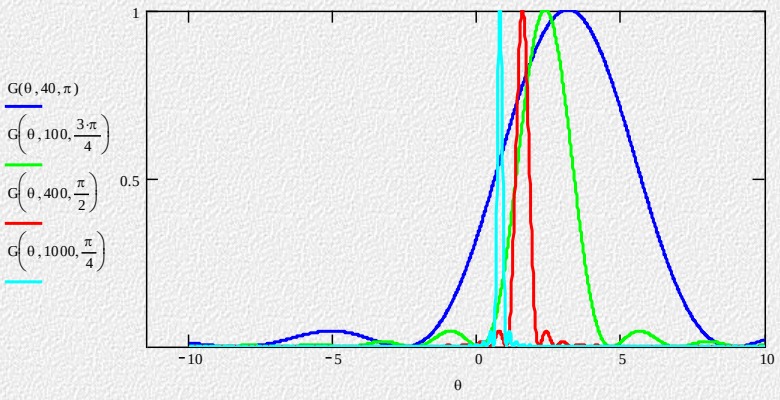


Formowanie wiązki

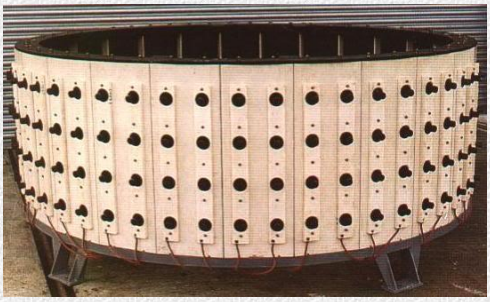


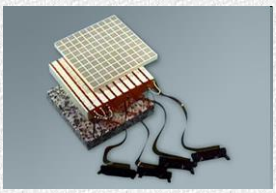


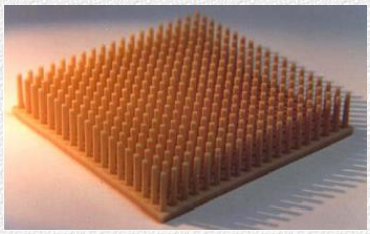
$$G(\theta, N, \theta o) := \frac{\sin\left[N\cdot\pi\cdot\frac{\delta min}{\lambda}\cdot\left(\sin\left(\theta\cdot\frac{\pi}{180}\right)-\sin\left(\theta o\cdot\frac{\pi}{180}\right)\right)\right]^2}{N^2\cdot\sin\left[\pi\cdot\frac{\delta min}{\lambda}\cdot\left(\sin\left(\theta\cdot\frac{\pi}{180}\right)-\sin\left(\theta o\cdot\frac{\pi}{180}\right)\right)\right]^2}$$

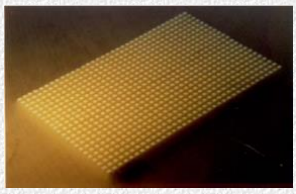


szyki przetworników









Przykład szyku bocznego

6x4 elementy

apertura: 150 °, 0.5 m

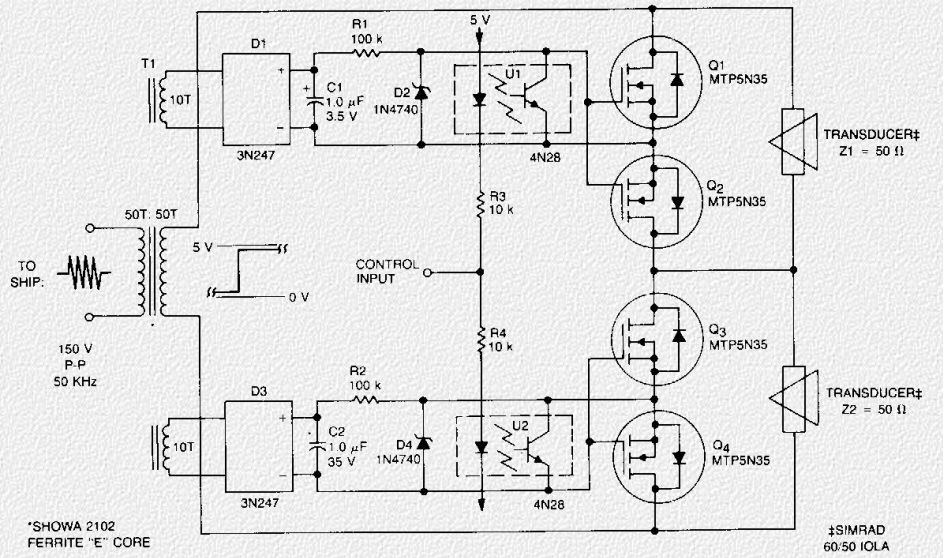
3 dB szerokość wiązki w pionie ±11°

częstotliwość 8-16 kHz

pasmo 8 kHz (~ 67%)

dynamika 137 ± 3 dB // 1µPa

Przykład układu sterowania



Zjawiska sprzężone

odpowiedź w postaci zmiany	wymuszenie			
	siła	ciepło	E statyczne	H statyczne
rozmiaru lub kształtu	sprężystość	rozszerzalność cieplna	piezoelektryczność odwrotna	piezomagnetyzm odwrotny
			elektrostrykcja (odwrotność piroelektryczności)	magnetostrykcja (odwrotność magnetosprężystości)
temperatury	piezokaloryczność	pojemność cieplna	elektrokaloryczność (odwrotność piroelektryczności)	magnetokaloryczność (odwrotność piromagnetyzmu)
polaryzacji elektrycznej	piezoelektryczność prosta	piroelektryczność (odwrotność elektrokaloryczności)	polaryzacja elektryczna	nie obserwowany
	elektrosprężystość (odwrotność elektrostrykcji)			
namagnesowania	piezomagnetyzm prosty	piromagnetyzm (odwrotność magnetokaloryczności)	nie obserwowany	namagnesowanie
	magnetosprężystość (odwrotność magnetostrykcji)			

porównanie przetworników najczęściej stosowanych w akustolokacji

magnetostrykcyjne

ograniczenie dolnej częstotliwości granicznej do ok. 30 kHz (maksymalne odkształcenia zależne od rozmiarów)

częstotliwości subharmoniczne są słyszalne – przetworniki bywają hałaśliwe – dla 40 kHz (prąd 20 kHz) pierwsza subharmoniczna ma częst. 10 kHz (poziom na szczęście ok. -85 dB w stosunku do częstotliwości środkowej)

krótsza żywotność generatora (wysokie prądy)

długie czasy przestrajania (trudności w generacji krótkich impulsów LFM)

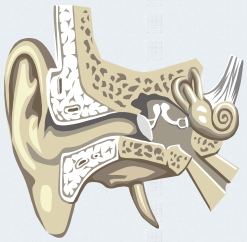
duże straty - sprawność rzędu 40%

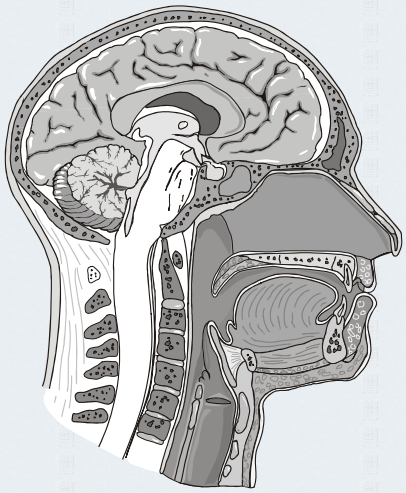
piezoelektryczne (obecnie - praktycznie bezkonkurencyjne)

efekt starzenia (łatwy do kompensacji)

straty energii zwykle niższe niż 5%

Detekcja fal akustycznych





Różne podziały detektorów

ze względu na moce fal
- małych mocy
- dużych mocy

ze względu na odwracalność
- odwracalne
- nieodwracalne

ze względu wykorzystywane mechanizmy fizyczne
- mechaniczne
- magnetodynamiczne
- elektrodynamiczne
- strykcyjne
- piezoelektryczne
- termiczne
- optyczne

ze względu sposób transformacji energii fal
- generatywne
- parametryczne

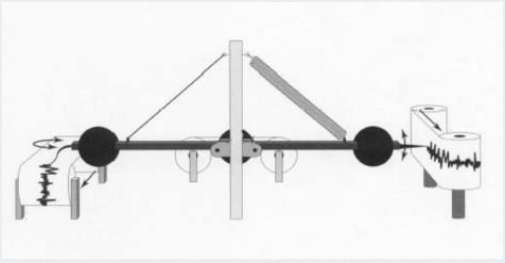
Częstotliwości najniższe - sejsmometria

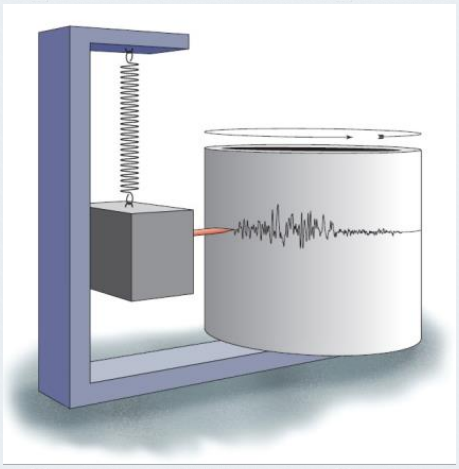
Źródła zdeterminowane
celowe detonacje i wystrzały
wibratory i impulsatory mechaniczne
specjalne głośniki

Źródła pseudolosowe
drgania urządzeń technicznych
drgania komunikacyjne
napełnianie zbiorników

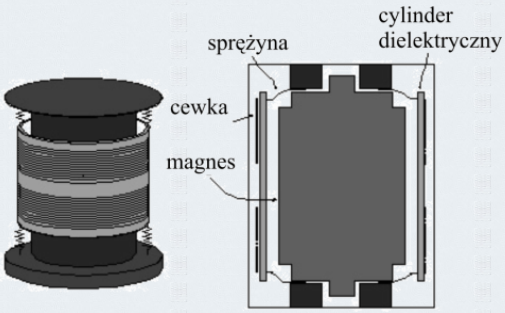
Źródła losowe
sejsmika Ziemi
eksploatacja złóż

metody pomiaru
- mechaniczne
- elektromechaniczne
- optoelektroniczne
- akustoelektroniczne

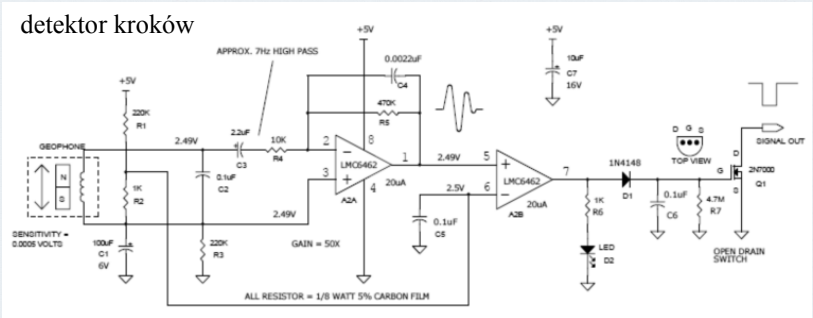




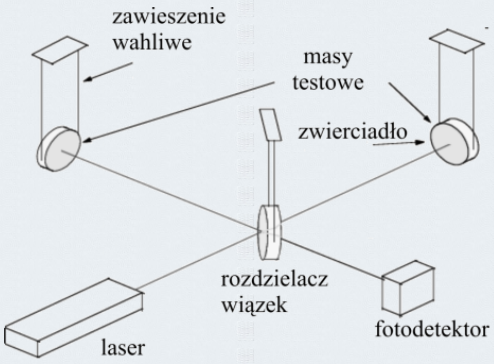
Geofony - metody elektromechaniczne

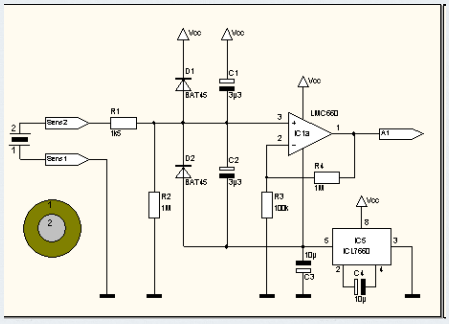


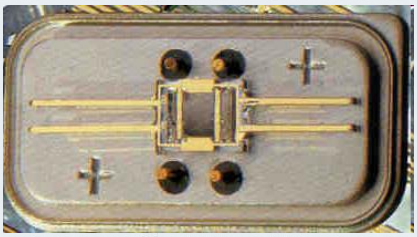
detektor kroków

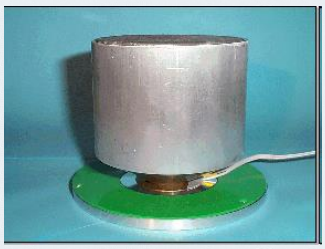


Metody opto- i akustoelektroniczne

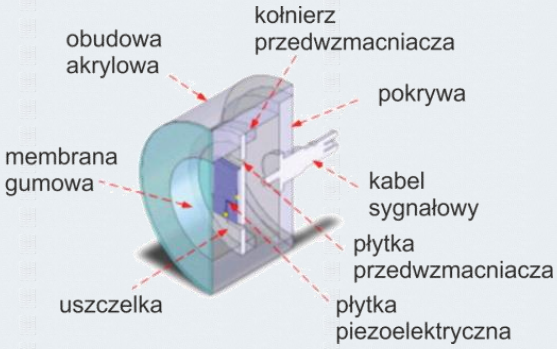




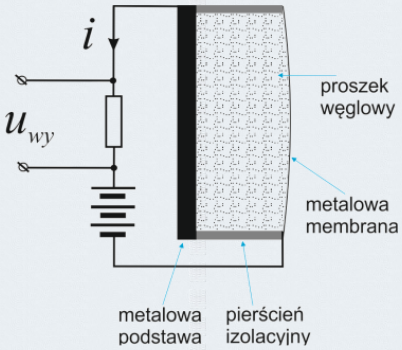




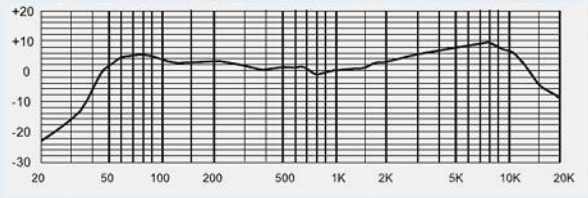
Hydrofony

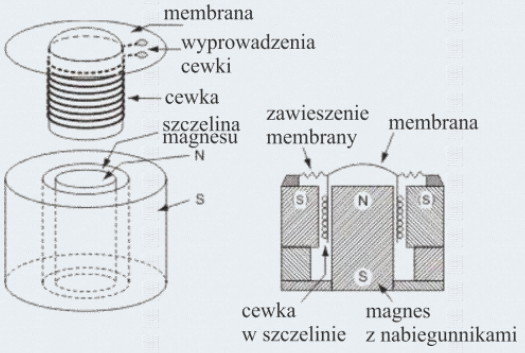


Mikrofony węglowe

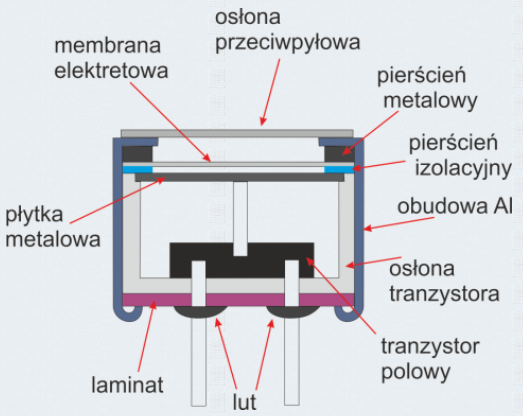


MIKROFONY magnetoelektryczne (dynamiczne)



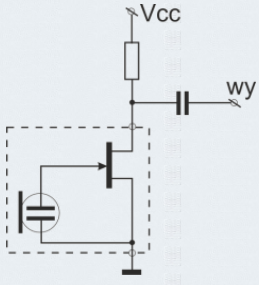


MIKROFONY pojemnościowe i elektretowe



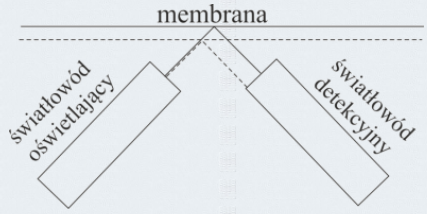
$$V = \frac{qd}{\varepsilon A}$$

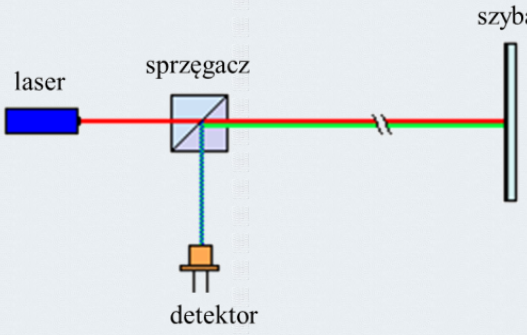
zwykły dielektryk elektret



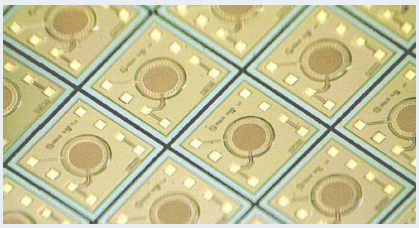
typ	KEC-1042PBL elektretowy
kierunkowość	kwazi-izotropowy
czułość	-42 ±3 dBA przy f=1kHz, 1Pa, 0 dBA=1V/Pa
redukcja czułości	-3 dBA przy spadku napięcia zasilania o 0.5V
S/N	58 dBA przy f=1KHz, 1Pa
pasmo	20 Hz – 20 KHz
impedancja wyjściowa	2.2 kΩ
napięcie zasilania	2-10 V
pobór prądu	0.5 mA przy 2 V i R_L=2.2 kΩ
zakres temperatur pracy	-20 - +70 ºC
średnica	6 mm
wysokość (bez wyprowadzeń)	1 mm
masa	0,3 g
obudowa	Al

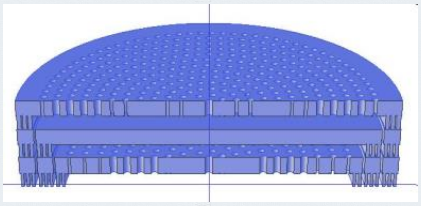
Mikrofony optyczne

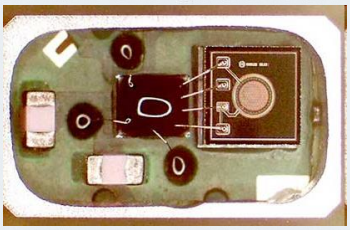




MEMS







dwukierunkowy (kwazi-dookólny)

temp. pracy -40°C +100°C

prąd zasilania 0,5 mA przy napięciu 2V

pasmo 100Hz - 10 kHz

poziom szumów 35 dB

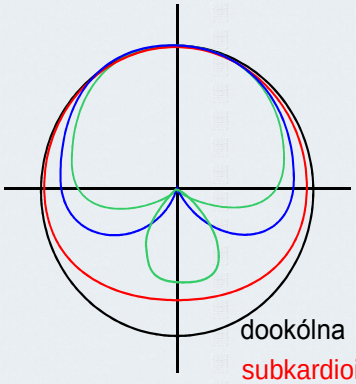
czułość -42 dBA

zakres napięć zailania 1,5 – 5,5 V

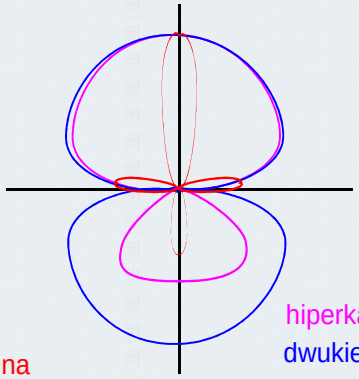
Porównanie podstawowych parametrów wybranych typów mikrofonów

wartości orientacyjne	czułość [mV/µbar]	pasmo [kHz]	impedancja [MΩ]	poziom zniekształceń	równomierność charakterystyki
węglowe	1 –50	0,2 - 3	0,001	wysoki	mała
pojemnościowe	0,5 – 10	0,01 - 20	100	b. Niski	± 3dB
elektretowe	0,5 – 10	0,01 - 20	1000	b. niski	± 3dB
piezoelektryczne	0,2 – 2	> 20	1000	niski	duża
magnetoelektryczne	0,05 – 1	0,03 - 15	0,0001	niski	do 20 dB

Podstawowe rodzaje charakterystyk

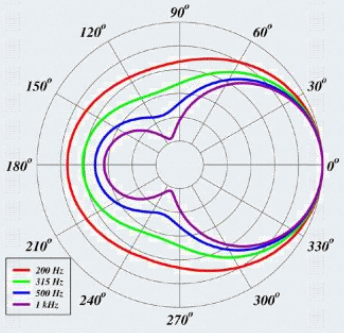


dookólna
subkardioidalna
kardioidalna
superkardioidalna

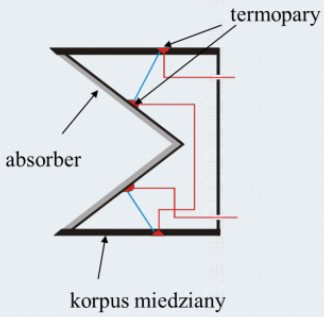


hiperkardioidalna
dwukierunkowa
kierunkowa

Zależność charakterystyki od częstotliwości



Detektory termiczne



Detektory optyczne (wykorzystanie sonoluminescencji) będącej wynikiem kawitacji

KAWITACJA

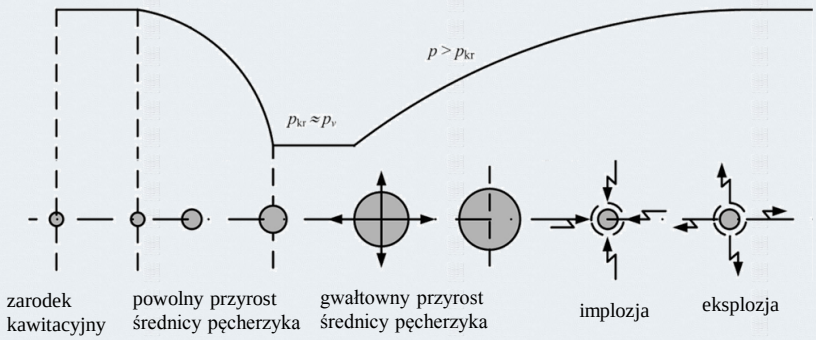
Zjawisko fizyczne wywołane zmiennym polem ciśnienia w cieczy, które wywołuje powstawanie, wzrost i zanik pęcherzyków lub innych obszarów zamkniętych zawierających parę danej cieczy, rozpuszczone w niej gazy lub mieszaninę ciecz-para. Pęcherzyki rosną w obszarze ciśnienia niższego od wartości krytycznej, a następnie gwałtownie zmniejszają się (implozja) w obszarze ciśnienia większego od wartości krytycznej.

Trzy stadia kawitacji

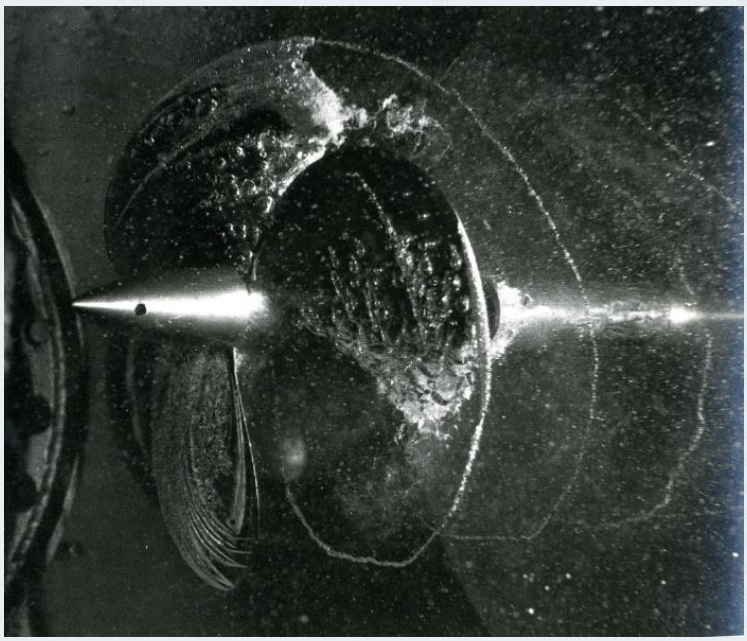
- kawitacja początkowa (pęcherzykowa) - powstawanie pierwszych pęcherzyków kawitacyjnych w cieczy - słaby szum akustyczny

- kawitacja rozwinięta - z pęcherzyków tworzy się obłok kawitacyjny - głośny szum kawitacyjny (zmiana charakterystyk przepływowych, wydajności, mocy i sprawności urządzeń oraz ich niszczenie)

- kawitacja silnie rozwinięta - (superkawitacja) - powstawanie dużych obłoków kawitacyjnych rozciągających się daleko poza miejsce ich powstania. W miejscu superkawitacji szum kawitacyjny ulega osłabieniu. Zjawisko to może być wykorzystane do napędu super szybkich okrętów podwodnych.



Zarodek kawitacyjny (pęcherzyk pary cieczy lub rozpuszczonego w niej gazu) o średnicy rzędu 1-100 μm zwiększa się wskutek spadku ciśnienia, a do jego wnętrza dyfundują rozpuszczone w cieczy gazy.
Po spadku ciśnienia do wartości krytycznej następuje szybki wzrost pęcherzyka w wyniku parowania cieczy na jego powierzchni.
Po powrocie zewnętrznego ciśnienia do pierwotnej wartości w parowo-gazowym pęcherzyku następuje gwałtowna kondensacja pary, co powoduje jego implozję.
W puste miejsce poimplozyjne napływa ciecz z prędkością sięgającą kilkuset metrów na sekundę, powodując kompresję pozostałych w pęcherzyku gazów, które silnie sprężone (kilkaset megapaskali) ulegają eksplozji. W określonej fazie eksplozji na skutek spadku ciśnienia następuje ponowne parowanie cieczy na powierzchni rosnącego pęcherzyka i jego zapadanie się prowadzące do kondensacji pary i kolejnej ekspansji. Zjawisko to powtarza się wielokrotnie (nawet kilkaset razy) przesuwając obszar kawitacji poza jej źródło.



Pulsacje kulistego pęcherzyka parowo-gazowego opisuje równanie Rayleigha, z którego wynika niska odporność wody na kawitację.
Podatność kawitacyjna rośnie wraz ze wzrostem liczby zarodków kawitacyjnych, temperatury oraz spadkiem napięcia powierzchniowego.

czas zaniku pęcherzyka

$$t = 0,91468\, R_o \sqrt{\frac{\rho}{p}}$$

ciśnienie implozji

$$p_{\text{imp}} = c\sqrt{\frac{2}{3}\rho\, p\left(\frac{R_o^3}{R_o^3 - 1}\right)} \sim 10^2 \div 10^3 \quad [\text{MPa}]$$

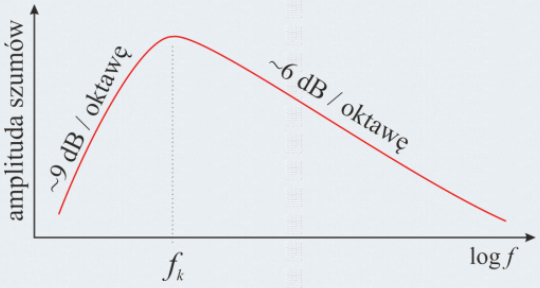
c –prędkość rozchodzenia się dźwięku w cieczy

Kawitacja generuje fale akustyczne o częstotliwości od 0,2 do 3 MHz

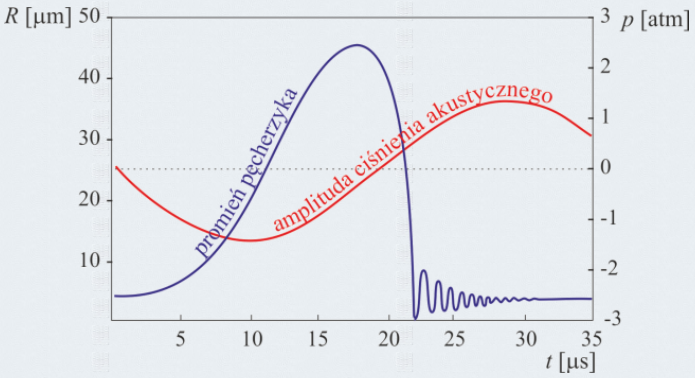
Moc akustyczna źródła kawitacyjnego jest proporcjonalna do ciśnienia implozji p i objętościowej prędkości tworzenia się pęcherzyków kawitacyjnych.
Widmo szumów (drgań) kawitacyjnych ma charakter szerokopasmowy z częstotliwością maksimum równą:

$$f_k = \frac{1}{2a_0}\sqrt{\frac{p}{\rho}}$$

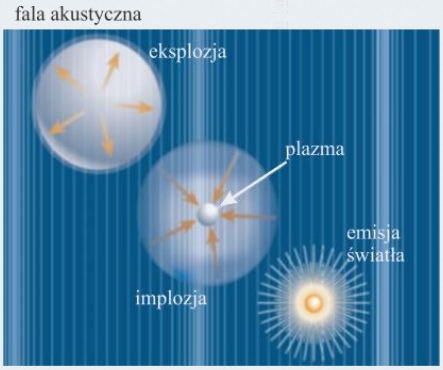
a_0 – promień pęcherzyka w chwili implozji
p – ciśnienie implozji
ρ – gęstość cieczy

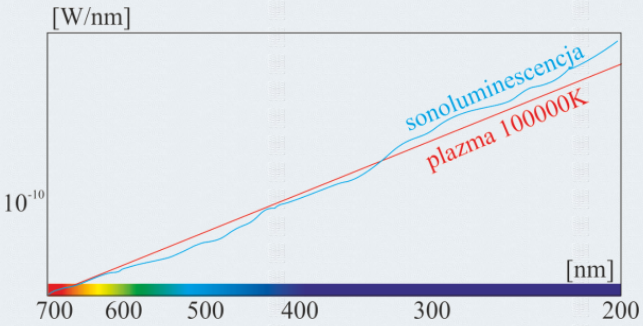


Kawitację może też wywołać fala dźwiękowa



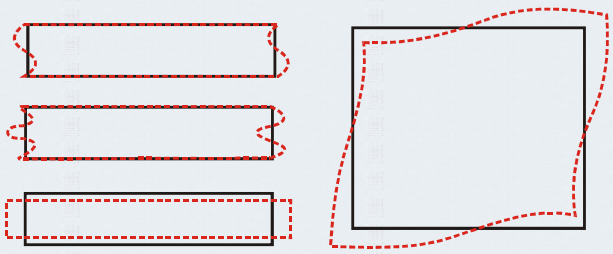
Implozja kawitacyjna powoduje wzrost temperatury wewnątrz pęcherzyka do wartości setek tysięcy K. Powoduje to silną jonizację części gazu zawartego w pęcherzyku i powstanie plazmy. Rekombinacja elektronów i jonów w strefie normalnego ciśnienia powoduje emisję światła, którą można wykryć metodami optycznymi.
Generowany jest głównie nadfiolet, zaś widmo jest zbliżone do widma plazmy o temperaturze 10^5 K.

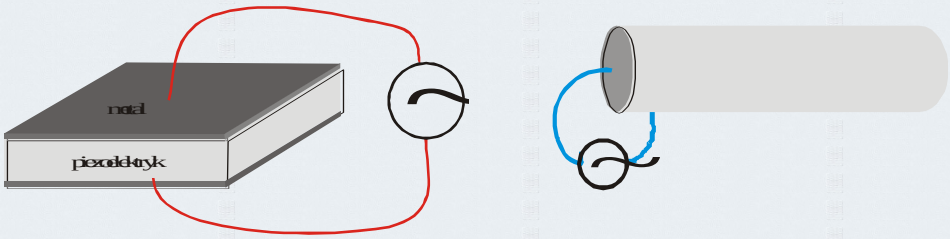




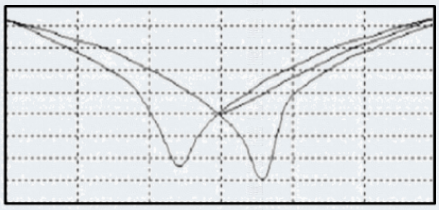
Przetworniki piezoelektryczne i elektrostrykcyjne

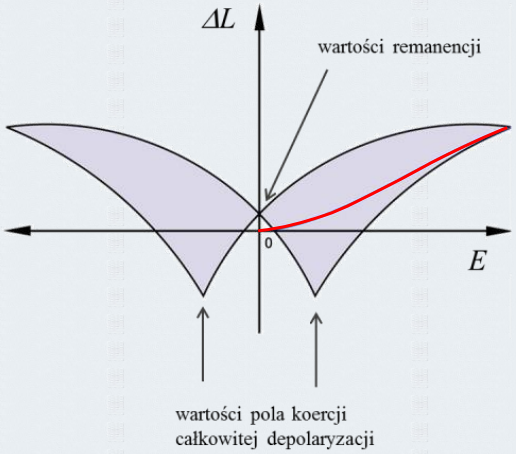
Płytka piezoelektryczna pod wpływem pola elektrycznego ulega deformacji na wiele sposobów





Histereza piezoelektryka



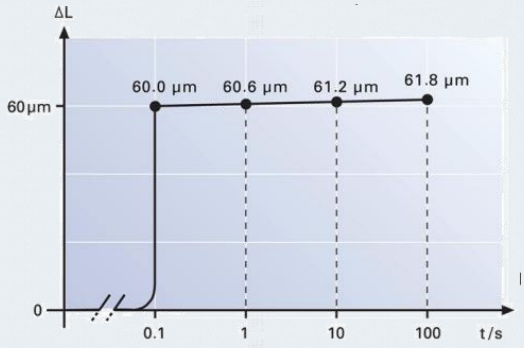


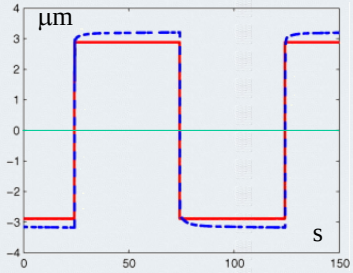
Pole pełnej histerezy jest równe energii potrzebnej na pełne przeelektryzowanie piezoelektryka.

Im więcej potrzeba energii na przeelektryzowanie tym „twardsza” jest ceramika

Rzeczywiste histerezy nie są symetryczne. Rzeczywiste wartości remanencji są bliskie 0.

Zjawisko pełzania (creep)





$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{t=0,1}\left[1+\gamma \log\left(\frac{t}{0,1}\right)\right]$$

γ wsp. pełzania - rzędu 0,001 ... 0,002

Podstawowe wielkości opisujące piezoelektryk

odkształcenie $$S_k = d_{ij} E_l$$

macierz modułów piezoelektrycznych dla kwarcu $$\hat{d} = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left[\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{N}}\right] = \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V}}\right]$$

$$S_1 = d_{11}E_1 \qquad S_2 = -d_{11}E_1 \qquad S_3 = 0$$

$$S_4 = d_{14}E_1 \qquad S_5 = -d_{14}E_2 \qquad S_6 = -2d_{11}E_2$$

naprężenie $$T_k = e_{ij} E_l$$

macierz stałych piezoelektrycznych $$\hat{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Vm}}\right]$$

$$T_1 = e_{31}E_3 \qquad T_2 = e_{31}E_3 \qquad T_3 = e_{33}E_3$$

$$T_4 = e_{15}E_2 \qquad T_5 = e_{15}E_1 \qquad S_6 = 0$$

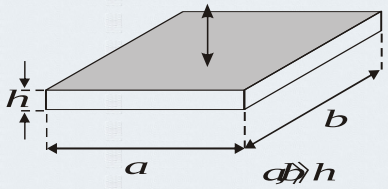
$$g_{ij} = \frac{1}{e_{ij}} \quad \left[\frac{\mathrm{Vm}}{\mathrm{N}}\right]$$

Przykładowe wartości

	$BaTiO_3$	PZT twarda	PZT miękka	$LiNbO_3$	$PbTiO_3$
k^2	0,38	0,57	0,61	0,035	-
d_{31}	$-79\cdot10^{-12}$	$-120\cdot10^{-12}$	$-175\cdot10^{-12}$	$-0{,}9\cdot10^{-12}$	$-7{,}4\cdot10^{-12}$
d_{33}	$190\cdot10^{-12}$	$185\cdot10^{-12}$	$375\cdot10^{-12}$	$6\cdot10^{-12}$	$47\cdot10^{-12}$
g_{31}	$-5\cdot10^{-3}$	$-10\cdot10^{-3}$	$-11\cdot10^{-3}$	$-4\cdot10^{-3}$	$-4\cdot10^{-3}$
g_{33}	$11\cdot10^{-3}$	$25\cdot10^{-3}$	$25\cdot10^{-3}$	$33\cdot10^{-3}$	$26\cdot10^{-3}$
ε_{33}^T	1900	1300	1760	29	203
tgδ	7	0,4	1,8	-	-
T_C	130	390	390	1210	494

Podstawowe sposoby drgań płytek piezoelektrycznych (Kazis)

drgania grubościowe podłużne

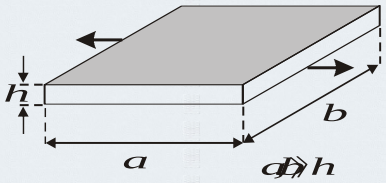


$$f_0 = \frac{x_n}{2h}\sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}}$$

x_n – nieparzyste pierwiastki równania $k_{33}^2 tg\frac{\pi}{2}x = \frac{\pi}{2}x$

$$k_{33} = \frac{\varepsilon_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^S C_{33}^D}} \qquad v_f = \sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}}$$

drgania ścinające

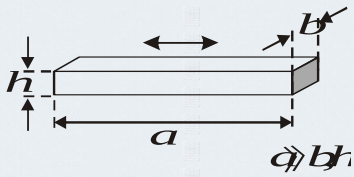


$$f_0 = \frac{x_n}{2h}\sqrt{\frac{C_{44}^D}{\rho}}$$

x_n – nieparzyste pierwiastki równania $\quad k_{15}^2 tg\frac{\pi}{2}x = \frac{\pi}{2}x$

$$k_{15} = \frac{e_{15}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^S C_{44}^D}} \qquad v_f = \sqrt{\frac{C_{44}^D}{\rho}}$$

drgania wzdłużne (elektrody na końcach belki)

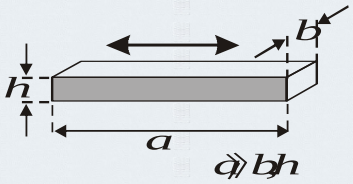


$$f_0 = \frac{1}{2h\sqrt{S_{33}^D \rho}} x_n$$

x_n – nieparzyste pierwiastki równania $\quad k_{33}^2 tg\frac{\pi}{2}x = \frac{\pi}{2}x$

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T S_{33}^E}} \qquad v_f = \frac{1}{\sqrt{\rho S_{22}^D}}$$

drgania wzdłużne (elektrody boczne)

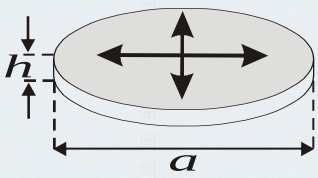


$$f_0 = \frac{n}{2a}\frac{1}{\sqrt{\rho S_{11}^2}}$$

n – nieparzyste

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E}} \qquad v_f = \frac{1}{\sqrt{\rho S_{11}^E}}$$

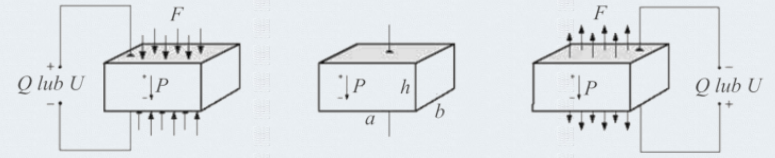
drgania radialne



$$f_0 = \frac{\xi}{2\pi a}\frac{1}{\sqrt{\rho S_{11}^E\left(1-\sigma_p^E\right)}}$$

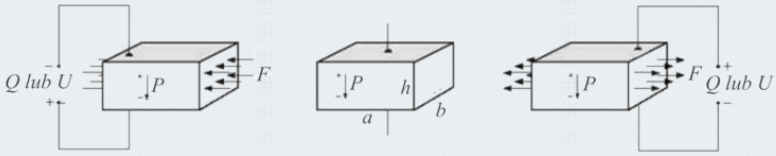
$$k_p = \frac{d_{21}\sqrt{2}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T\left(S_{11}^E + S_{12}^E\right)}} \qquad v_f = \frac{1}{\sqrt{\rho S_{11}^E\left[1-\left(\sigma_p^E\right)^2\right]}}$$

Zależności przybliżone



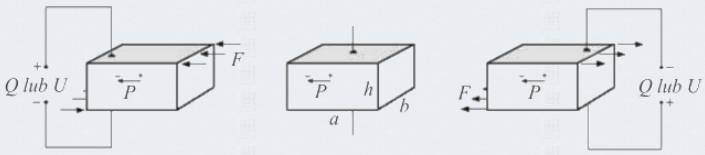
$$Q = Fd_{33}$$

$$\frac{U}{h} = \frac{Fg_{33}}{ab}$$



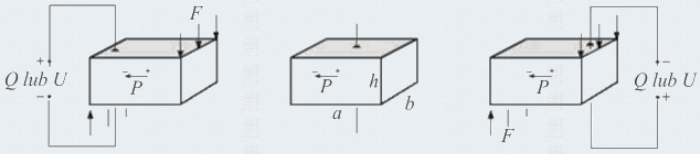
$$\frac{Q}{ab} = \frac{Fd_{31}}{bh}$$

$$\frac{U}{h} = \frac{Fg_{31}}{bh}$$



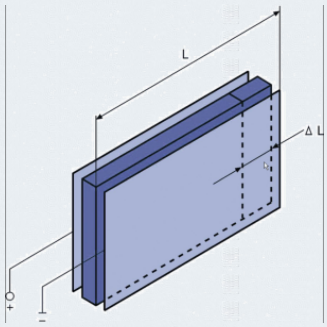
$$Q = Fd_{15}$$

$$\frac{U}{T} = \frac{Fg_{15}}{ab}$$



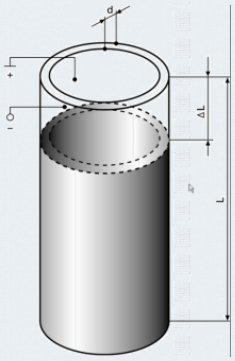
$$\frac{Q}{ab} = \frac{Fd_{15}}{bh}$$

$$\frac{U}{h} = \frac{Fg_{15}}{bh}$$



$$\triangle L \approx d_{31} L \frac{U}{d}$$

L – długość
d – grubość
U – napięcie pobudzające



$$\triangle L \approx d_{31} L \frac{U}{d}$$

$$\triangle r \approx d_{31} r \frac{U}{d}$$

r – średnica
d – grubość ścianki

$$\triangle d \approx d_{33} U$$

równanie ruchu dla płytki z cienkimi elektrodami ma postać:

$$\frac{m}{\alpha^2}\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{r}{\alpha^2}\frac{di}{dt} + \frac{k}{\alpha^2} i = U_0 \omega \cos \omega t$$

$i = \frac{dq}{dt}$ prąd płynący przez płytkę

$q = \alpha d_{11} U$ generowany ładunek , d_{ii} moduł piezoelektryczny

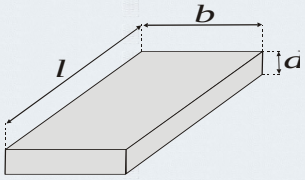
odkształcenie

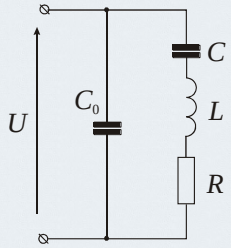
$U = U_0 \sin \omega t$

$\alpha = \frac{F}{U}$ współczynnik przekształcenia elektromechanicznego (transdukcji)

m, r, k - parametry płytki związane z masą, tłumieniem drgań oraz pojemnością elektryczną

Dla płytki piezoelektrycznej z cienkimi elektrodami metalowymi można podać następujący elektryczny schemat zastępczy:





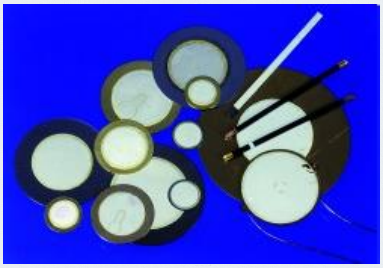
$$\alpha \sim \frac{bl}{dd_{11}} \qquad L = \frac{m}{\alpha^2} \qquad R = \frac{r}{\alpha^2} \qquad C = \frac{\alpha^2}{k}$$

Ilościową miarą skuteczności przetwornika jest współczynnik sprzężenia elektromechanicznego

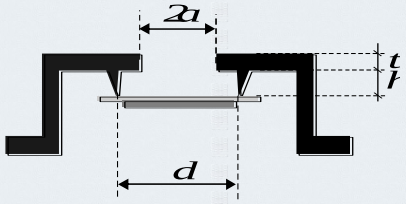
$$K = \frac{energia\ mechaniczna}{energia\ elektryczna}$$ dla fal podłużnych $$K^l = d_{11}\sqrt{\frac{C_{11}}{\varepsilon_0}}$$

ε_0 – przenikalność elektryczna płytki nieruchomej

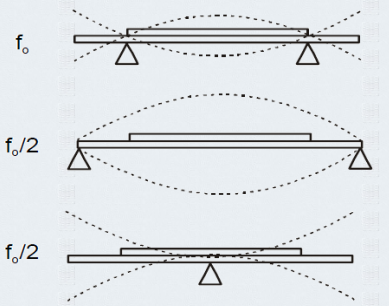
Przetworniki mogą mieć różne kształty



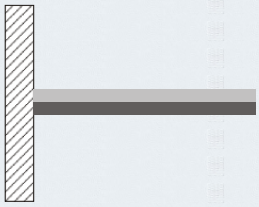
Membrany piezoelektryczne



$$f_0 = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{4a^2}{d^2 h(t+1{,}3\cdot a)}}$$



Bimorfy



Przemieszczenie końcówki bimorfu opisuje zależność $\Delta L \approx \frac{3}{4}\left(\frac{l}{g}\right)^2 d_{31} E$

l – długość bimorfu, g – grubość jednego piezoelektryka, d_{31} – składową tensora podatności piezoelektrycznej (modułem piezoelektrycznym), E amplitudą pola elektrycznego

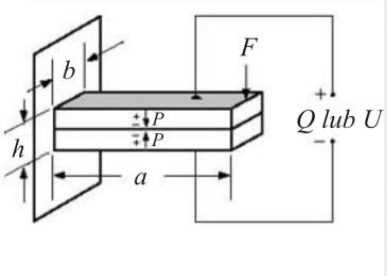
Generowana siła

$$F = \frac{2ga}{l}\frac{d_{31}}{\varepsilon_{11}^E}E$$

a – szerokość bimorfu

częstotliwość rezonansowa $f_0 \approx 0{,}161\frac{2g}{l^2}\sqrt{\frac{1}{\rho\varepsilon_{11}^E}}$

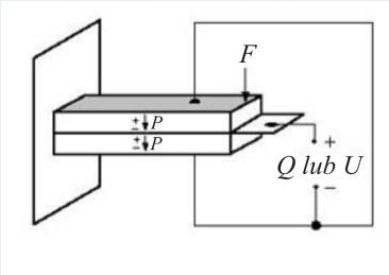
bimorf szeregowy



$$Q = \frac{3Fa^2 d_{31}}{2h^2}$$

$$U = \frac{3Fa^2 g_{31}}{2bh}$$

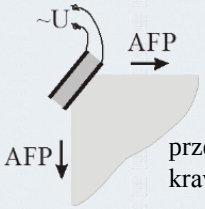
bimorf równoległy



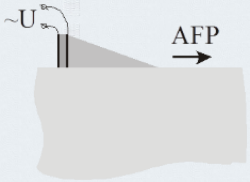
$$Q = \frac{3Fa^2 d_{31}}{h^2}$$

$$U = \frac{3Fag_{31}}{4bh}$$

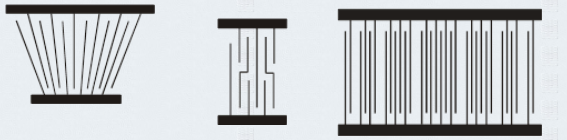
Metody detekcji (i wzbudzania) AFP



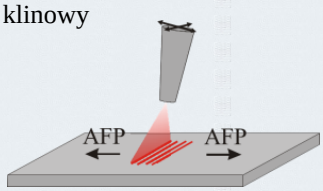
przetwornik krawędziowy



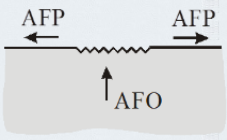
przetwornik klinowy



przetworniki międzypalczaste
ang. interdigital transducers (IDT)



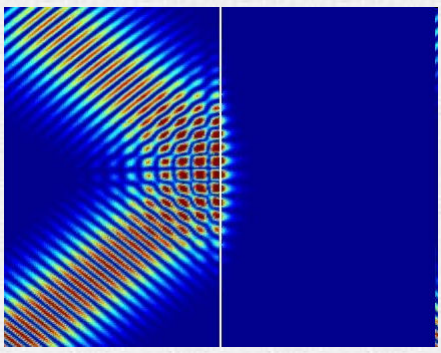
przetwornik laserowy

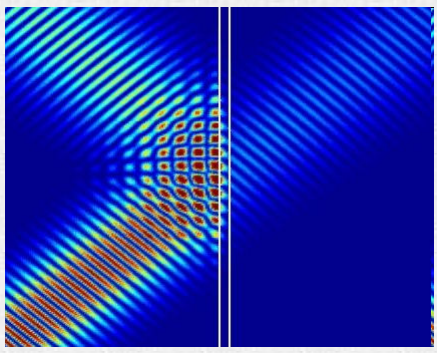


przetwornik rowkowy

Dopasowanie akustyczne

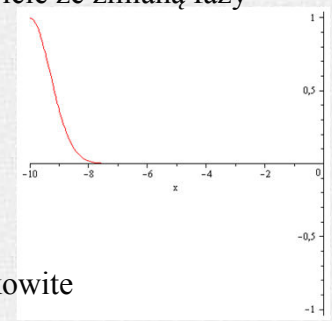
Odbicie fal jest efektem ich interferencji



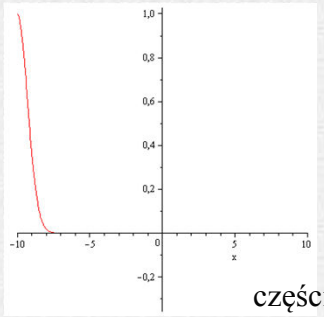


www.igf.fuw.edu.pl

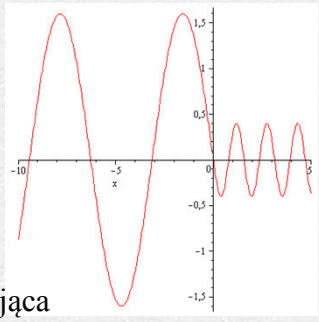
Odbicie ze zmianą fazy



całkowite



częściowe



niezupełna fala stojąca

Akustyczna impedancja ośrodka

Szukamy fali płaskiej $A(x,t) = A_0 \sin(\omega t - kx)$

spełniającej równanie $\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$

$$p = \rho_0 v v_0 \cos(\omega t - kx) \qquad v = \frac{\partial A}{\partial t} = v_0 \cos(\omega t - kx)$$

akustyczny Ohm

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \frac{\rho_0 v v_0 \cos(\omega t - kx)}{v_0 \cos(\omega t - kx)} = \rho_0 v \quad \left[\frac{\mathrm{Ns}}{\mathrm{m}^3} = \frac{kg}{m^2 s}\right] = [\mathrm{rayl}]$$

dla powietrza

$Z_0 = 413$ [rayl] przy $20^{\mathrm{O}}\mathrm{C}$

$Z_0 = 410$ [rayl] przy $25^{\mathrm{O}}\mathrm{C}$

Zjawisko odbicia jest efektem niedopasowania impedancyjnego

Współczynnik odbicia na granicy ośrodków

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\Gamma_{\text{żelazo/powietrze}} \approx \frac{25 \cdot 10^6 - 410}{25 \cdot 10^6 + 410} \approx -0{,}9999672$$

$$\Gamma_{\text{woda/powietrze}} \approx 1$$

$$\Gamma_{\text{powietrze/wata celulozowa}} \approx 0$$

[Mrayl]

aluminum	**8,170**
kadm	12,950
miedź	20,210
gal	14,890
iryd	68,450
żelazo	25,300
ołów	7,810
siarczek ołowiu	15,600
lit	1,500
niobian litu	19,071
molibden	34,360
nikiel	26,680
niob	17,910
pallad	24,730
platyna	36,040
potas	0,867
srebro	16,690
siarka	3,860
tantal	33,700
uran	37,100

Słuszność tej zależności można uzasadnić korzystając jednocześnie z zasad zachowania pędu i energii

$$\begin{cases} m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \end{cases}$$

u_i – prędkości cząstek przed zderzeniem

v_i – prędkości cząstek po zderzeniu

$$v_1 = \frac{u_1(m_1 - m_2) + 2m_2 u_2}{m_1 + m_2} \qquad v_2 = \frac{u_2(m_2 - m_1) + 2m_1 u_1}{m_1 + m_2}$$

Jeśli zderzenie następuje z nieruchomą przeszkodą $u_2 = 0$

prędkość fali odbitej $v_1 = \frac{u_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$

prędkość fali przechodzącej (transmitowanej) $v_2 = \frac{2m_1 u_1}{m_1 + m_2}$

Końcowa prędkość cząstki odbitej od przeszkody o nieskończenie wielkiej masie

$$v_R = \lim_{m_2 \to \infty} \frac{u_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} = \lim_{m_2 \to \infty} \frac{u_1\left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right)}{\frac{m_1}{m_2} + 1} = -u_1$$

prędkościowy współczynnik odbicia

$$\Gamma = \frac{v_1}{u_1} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$

Odbicie w rurze

masa ośrodka w rurze o przekroju S na grubości Δx

$$m_i = \rho_i S \Delta x = \rho_i S v_i \Delta t$$

$$\Gamma = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} = \frac{\rho_1 S v_1 \Delta t - \rho_2 S v_2 \Delta t}{\rho_1 S v_1 \Delta t + \rho_2 S v_2 \Delta t} = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}$$

ostatecznie

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Tuba akustyczna (megafon – Grecy 6 000 B.C.)

ang. bryt. ***loudhailer****, ang. am.* ***bullhorn***

Transformator przekształcający duże ciśnienie i małe prędkości objętościowe u wlotu w małe ciśnienie i duże prędkości objętościowe u wylotu tuby

Zadaniem tuby jest poprawa dopasowania impedancji źródła do impedancji otoczenia oraz ukierunkowanie energii fal

Równanie fali w tubie

$$v^2 \frac{\partial}{\partial x^2}\xi(x,t) + m\frac{\partial}{\partial x}\xi(x,t) - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\xi(x,t) = 0$$

m – wsp. kształtu tuby

Zakłada się rozwiązanie w postaci

$$\xi(x,t) = A(x)e^{j\omega t} \quad \text{gdzie} \quad A(x) = e^{-j\gamma x}$$

Równanie charakterystyczne

$$-\gamma^2 - j\gamma m + \frac{\omega^2}{v^2} = 0$$

$$\gamma_{1,2} = \frac{-jmv \pm \sqrt{4\omega^2 - m^2v^2}}{2v} = \pm\left(-\beta + j\alpha\right)$$

stała fazowa tłumienie

Rozwiązanie ma postać

$$\xi(x,t) = \left[C_1 e^{(-\alpha - j\beta)x} + C_2\, e^{(-\alpha + j\beta)x} \right] e^{j\omega t}$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{m}{2}, \quad \beta = \frac{\sqrt{4\omega^2 + m^2v^2}}{2v}$$

Trzy przypadki:

$$4\omega^2 + m^2v^2 \;\begin{cases} < \\ = 0 \\ > \end{cases}$$

$$4\omega^2 + m^2v^2 < 0$$

β jest urojona – silne tłumienie brak propagacji fali w tubie

$$4\omega^2 + m^2v^2 > 0$$

β jest rzeczywista – możliwa propagacja fali w tubie

Przypadek graniczny $4\omega^2 + m^2v^2 = 0$ pozwala wyznaczyć

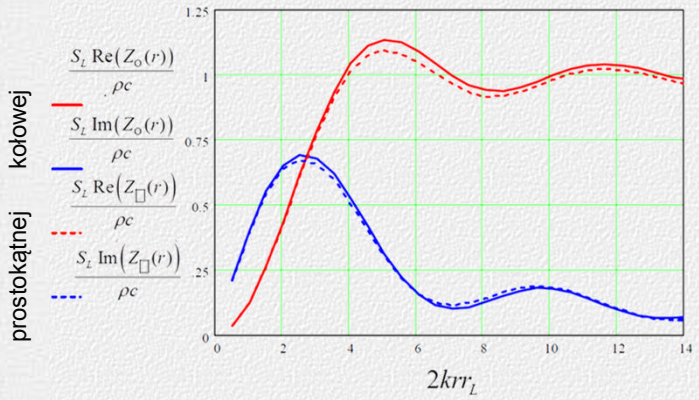
częstotliwość graniczną $f_g = \frac{mv}{4\pi}$ oraz powierzchnię wylotu tuby

eksponencjalnej o kształcie $S(x) = S_0\, \mathrm{e}^{mx}$ $S_0 = S(0)$

Po uwzględnieniu wyrażenia na częstotliwość graniczną

$$S(x) = S_0 \exp\left(\frac{4\pi f_g}{v} x\right)$$

Impedancja akustyczna tuby: $Z(r) = \frac{p(r,t)}{u(r,t)} = \frac{j\rho v k r}{1 + jkr}, \quad k = \frac{\omega}{v}$



Dla małych wartości $2\ k\ r_L$ część urojona impedancji akustycznej jest wysoka z powodu obciążenia masowego działającego ze strony powietrza u wylotu tuby – fale są w większości odbijane od zakończenia tuby

W miarę wzrostu $2\ k\ r_L$ rośnie też część rzeczywista impedancji i wzrasta współczynnik transmisji do otoczenia.

Część rzeczywista tłumi fale stojące w tubie. Warunek na wartość częstotliwości, przy której fale akustyczne zaczynają być efektywnie promieniowane na zewnątrz odpowiada sytuacji, w której

$$2kr_L = 2$$

Przy częstotliwości spełniającej ten warunek poziom ciśnienia dźwięku generowany przez część rzeczywistą impedancji spada o 6 dB poniżej maksimum

$$\frac{S_L \operatorname{Re}(Z(r))}{\rho v} = 0,5 \quad \rightarrow \quad 20\log(0,5) = -6 \ [\text{dB}]$$

Korzystając z tego warunku oraz wyrażenia na pole przekroju tuby można wyznaczyć jej przekrój na końcu

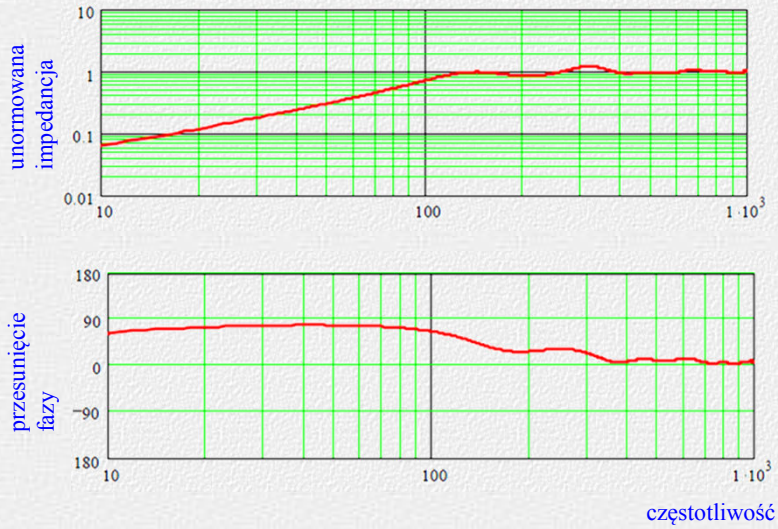
$$S_L = \frac{1}{\pi}\left(\frac{v}{2f_c}\right)^2$$

Jeśli znane jest S_0 to można także wyznaczyć długość tuby

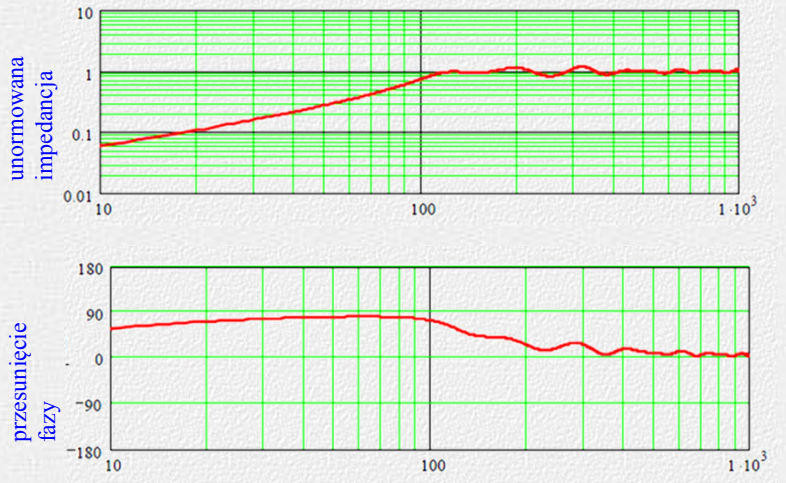
Dla 100 Hz $\quad m = 3{,}65\ \left[\mathrm{m}^{-1}\right] \qquad S_L = 0{,}94\ \left[\mathrm{m}^2\right]$

Tuba nr	S_0	S_L/S_0	L
1	0,19	5	0,44
2	0,09	10	0,63
3	0,05	20	0,82
4	0,02	40	1,01

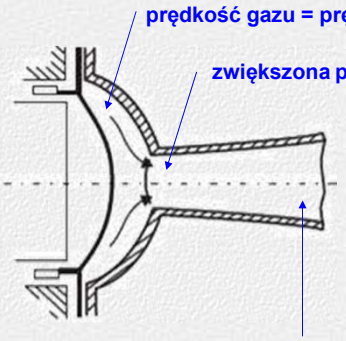
Tuba nr	S_0	S_L/S_0	L
1	0,19	5	0,44



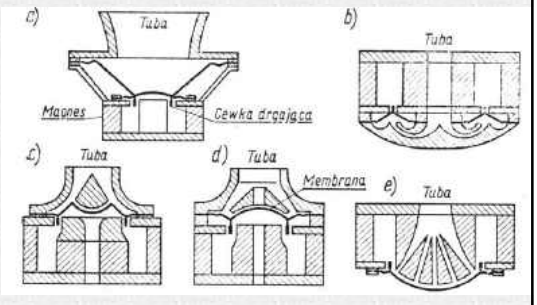
Tuba nr	S_0	S_L/S_0	L
4	0,024	40	1,01



prędkość gazu w komorze sprzęgającej i tubie



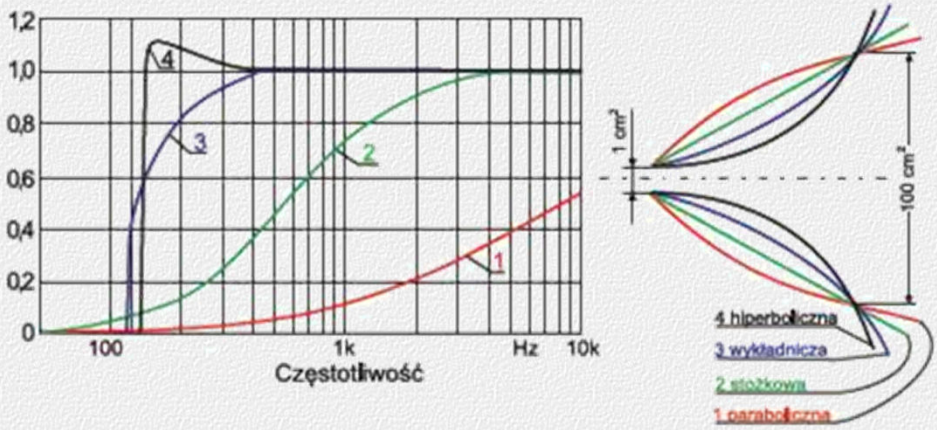
komory sprzęgające mogą mieć różne kształty



Całą objętość (masa) gazu zamkniętego w komorze sprzęgającej musi przedostać się przez rurę o dużo mniejszym przekroju – zwiększenie prędkości (oraz ciśnienia)

Impedancja falowa tub u wylotu

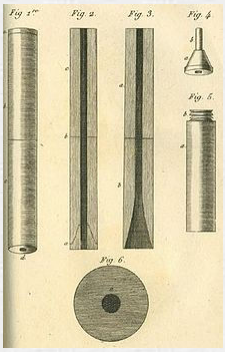
unormowana do impedancji falowej powietrza

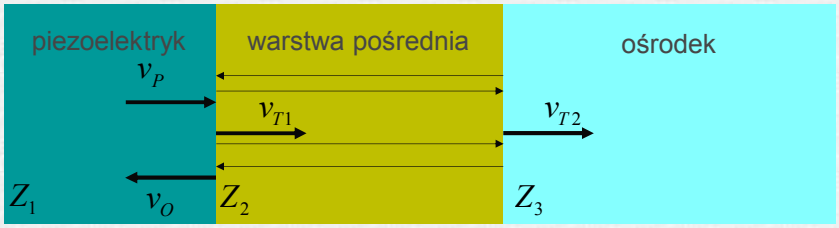


Tuba jest odwracalna

Stetoskop (fonendoskop) στήθος – wnętrze σκοπή - oglądać

René Laennec 1816





$$v_{T1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} v_P \qquad v_O = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} v_P$$

dla grubości warstwy równej λ/4 $\quad T_1 T_2 \sum_{n=0}^{\infty} (O_1 O_2)^n = \frac{T_1 T_2}{1 - O_1 O_2} \qquad O_1 O_2 < 1$

$$T_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \qquad T_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3} \qquad O_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad O_2 = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$$

współczynnik transmisji energii

$$\gamma_T = \frac{T_1 T_2}{1 - O_1 O_2} \frac{Z_3}{Z_1}$$

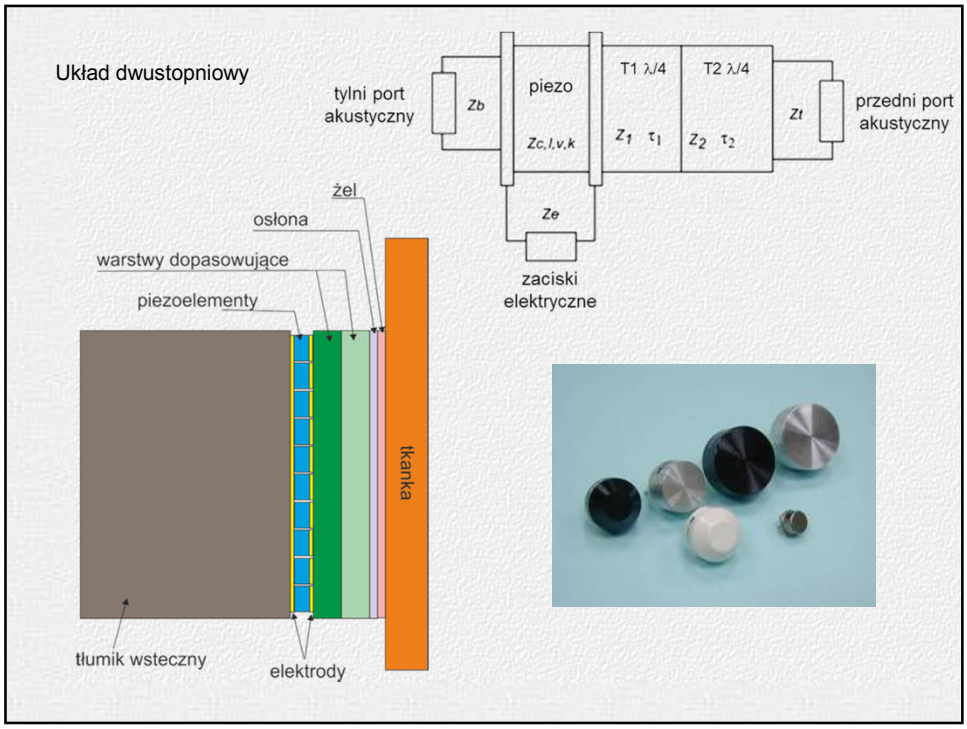
osiąga maksimum przy

$$\gamma_T\big|_{\max} \rightarrow Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$$

Warstwa taka jest nazywana transformatorem ćwierćfalowym

Wyrażenie to można uogólnić na n warstw; i - ta warstwa będzie miała impedancję:

$$Z_T^{(i)} = \sqrt[n+1]{Z_{we}^{n-j+1} Z_{wy}^{j}}$$



dla piezoelektryka

$$Z_P \approx 35 \text{ [Mrayl]}$$

dla powietrza przy 25 °C

$$Z_A \approx 410 \text{ [rayl]}$$

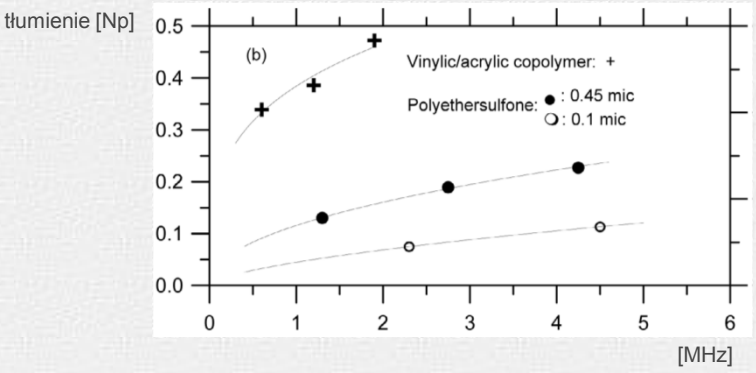
$$Z_T \approx \sqrt{410 \cdot 35} = 0{,}12 \text{ [Mrayl]}$$

polieterosulfon 0,13
nylon 0,16
polipropylen 0,08
mieszanka estrów celulozy 0,15

impedancja akustyczna zależy od struktury danego polimeru

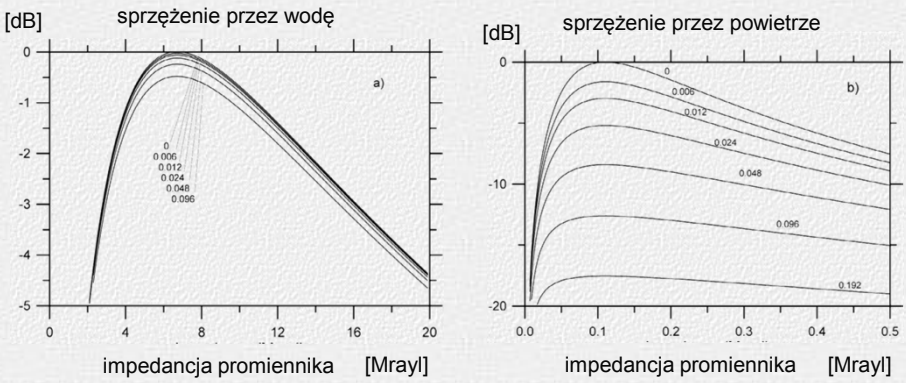
Dobór warstwy sprzęgającej nie jest łatwy

różne ośrodki wprowadzają różne tłumienie



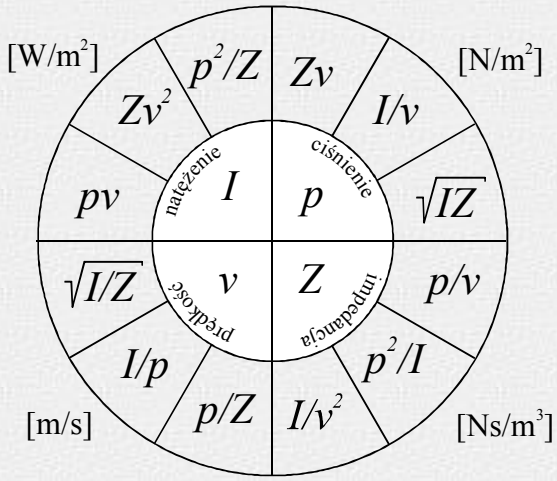
Warstwa musi być dobrana bardzo starannie szczególnie gdy przetwornik pełni też rolę detektora.

Tłumienie można radykalnie zmniejszyć poprzez zastosowanie warstwy sprzęgającej

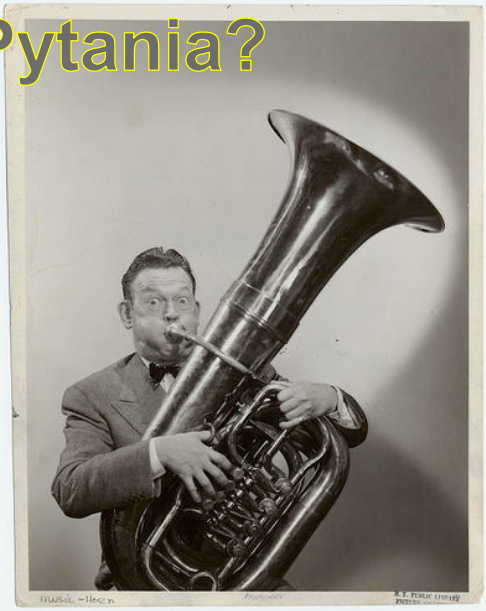


Żele sprzęgające zawierają zwykle ok. 80 % wody oraz dodatki takie jak glikol propylenowy, glicerynę, polimery akrylowe, krzemowe i in.

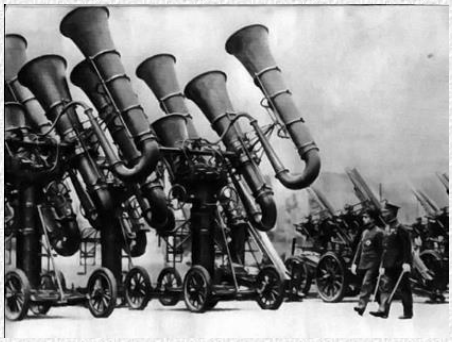
Związki pomiędzy wielkościami akustycznymi

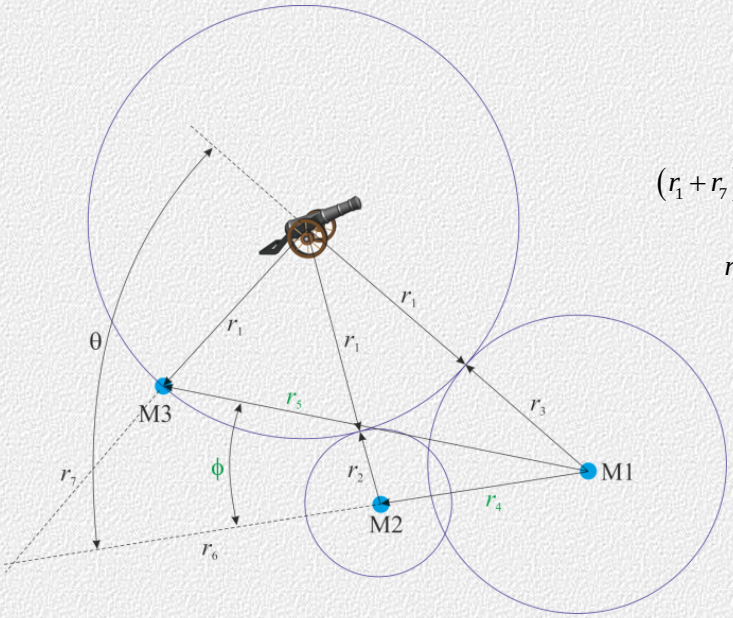


Pytania?



Sonolokacja bierna
szumonamierniki





$$\cos\theta = \frac{r_1 + r_7}{r_4 + r_6}$$

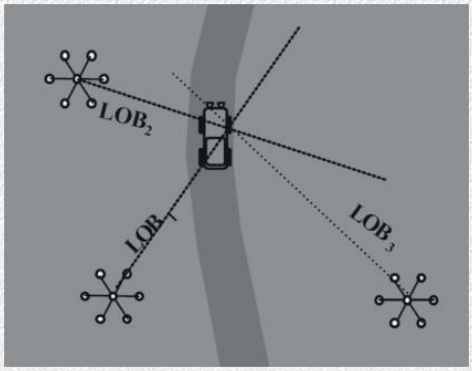
$$\cos(\theta - \phi) = \frac{r_1}{r_5}$$

$$(r_1 + r_7)^2 + (r_1 + r_3)^2 = (r_4 + r_6)^2$$

$$r_4^2 + (r_2 + r_1)^2 = (r_1 + r_3)^2$$

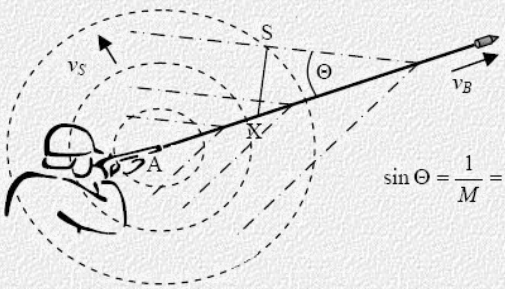
$$r_1^2 + (r_1 + r_3)^2 = r_5^2$$

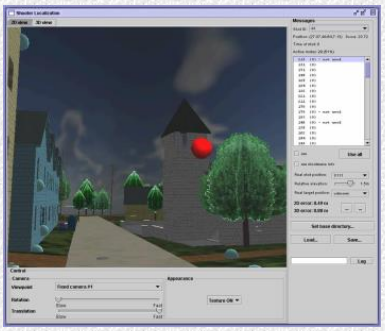
?

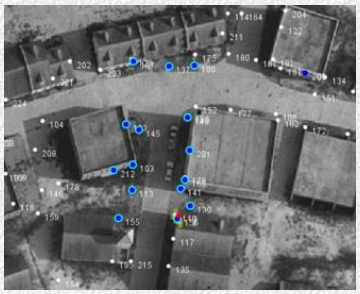


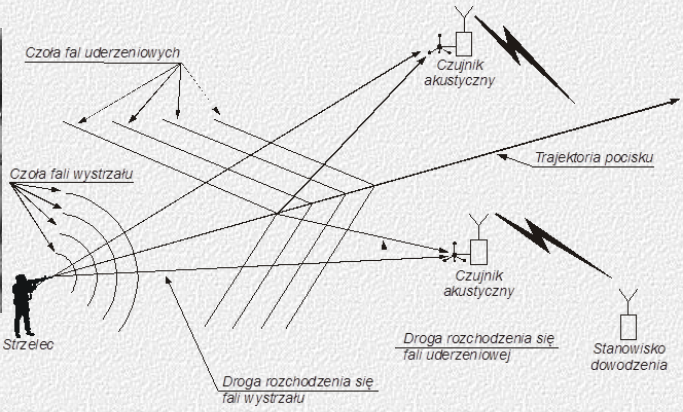
WYKRYWANIE SNAJPERÓW

DARPA Anti-Sniper
NSWC MANPADS

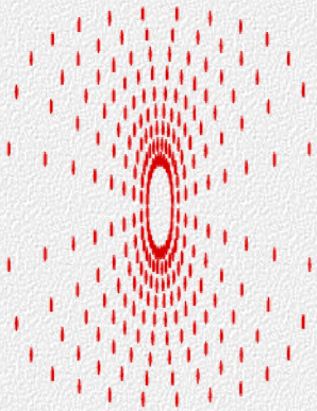


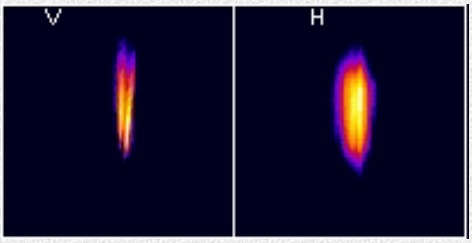




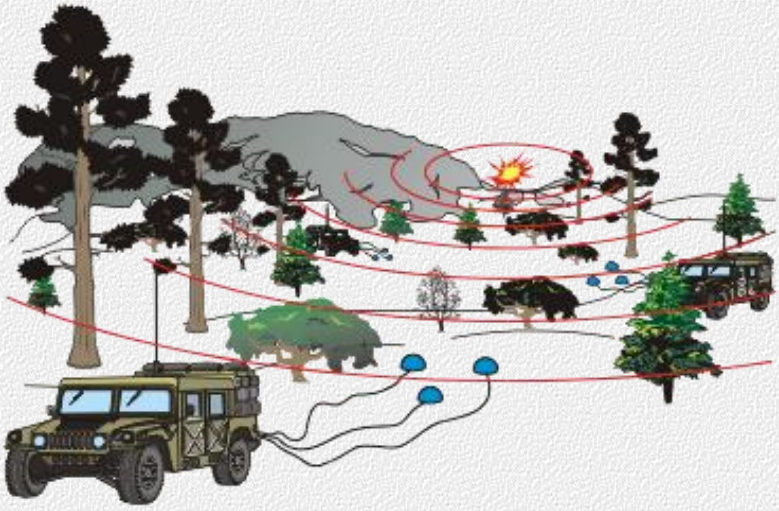


Wykrywanie i rozpoznawanie samolotów

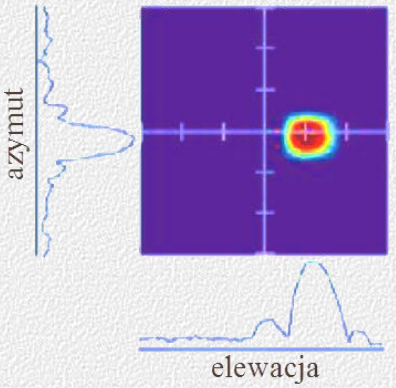




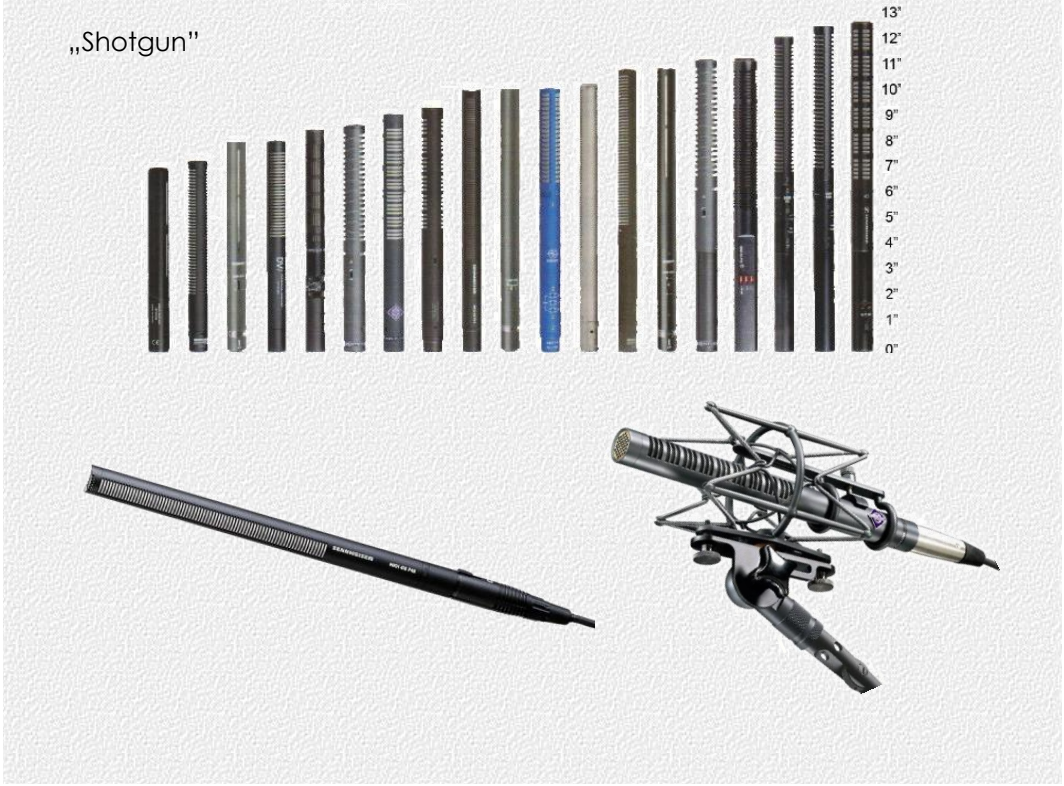
Wykrywanie i rozpoznawanie wybuchów



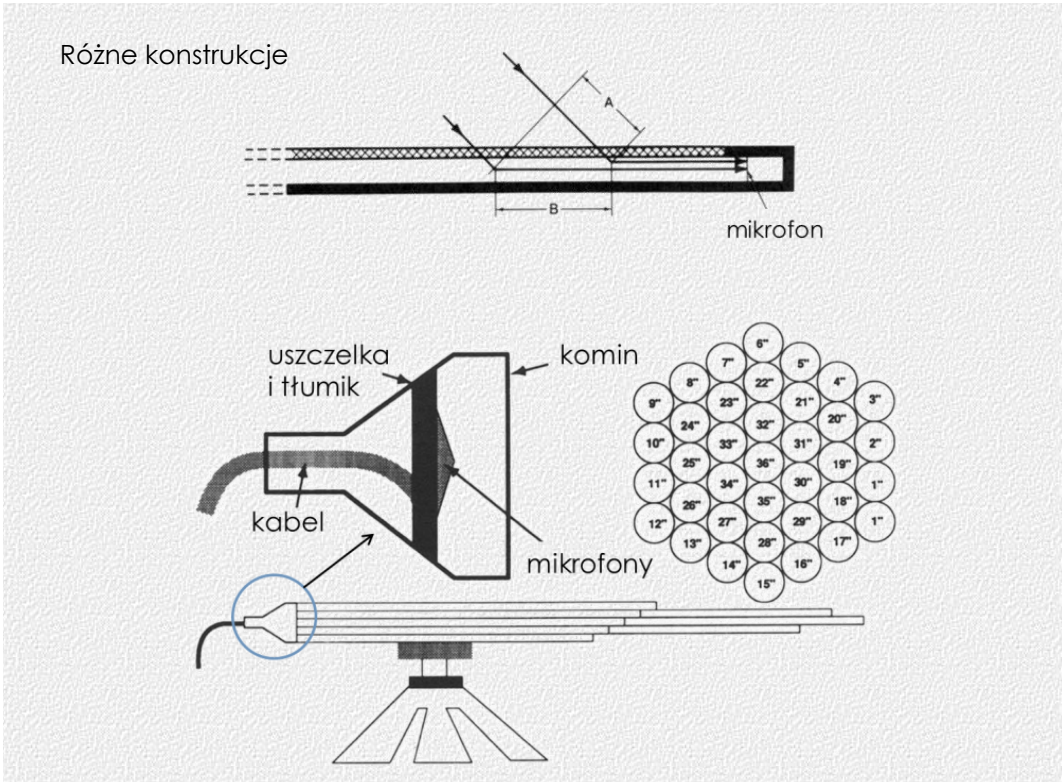
Wykrywanie i rozpoznawanie źródeł dźwięku różnego pochodzenia



„Shotgun"

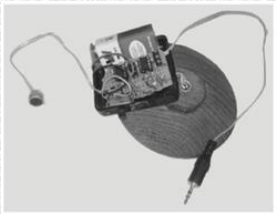


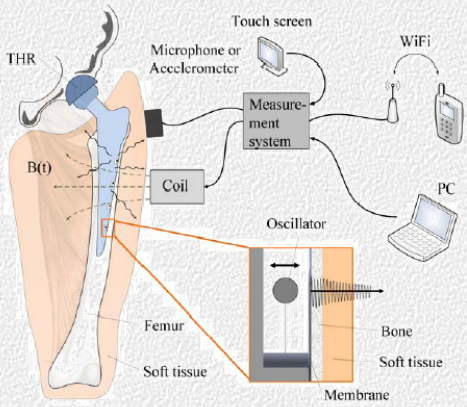
Różne konstrukcje



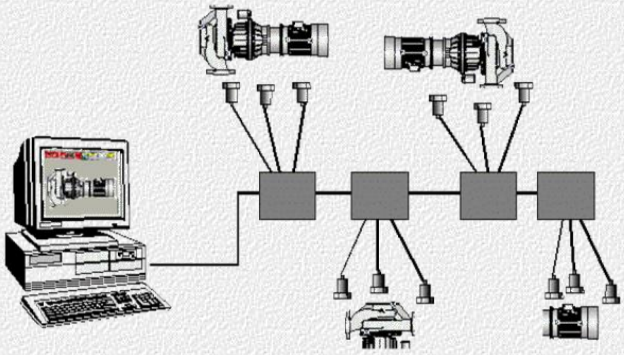
miny

diagnostyka medyczna



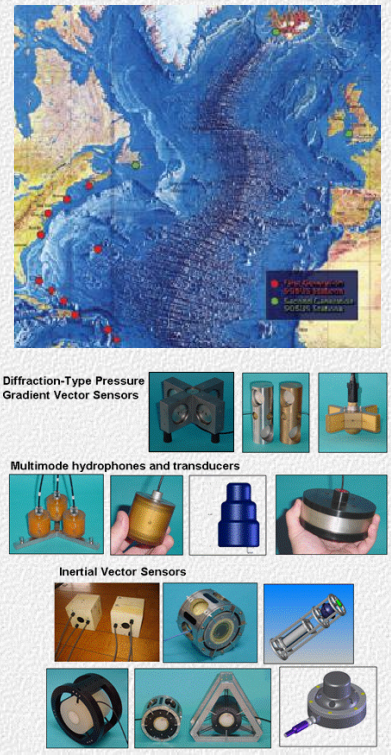


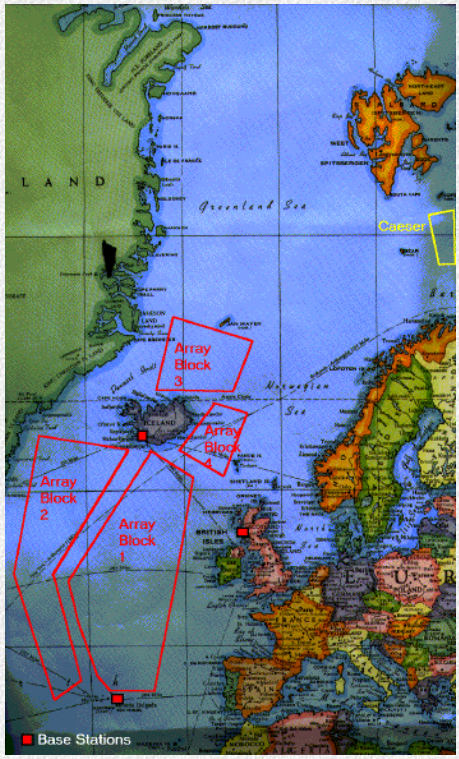
Diagnostyka przemysłowa
Bierne tłumienie hałasu



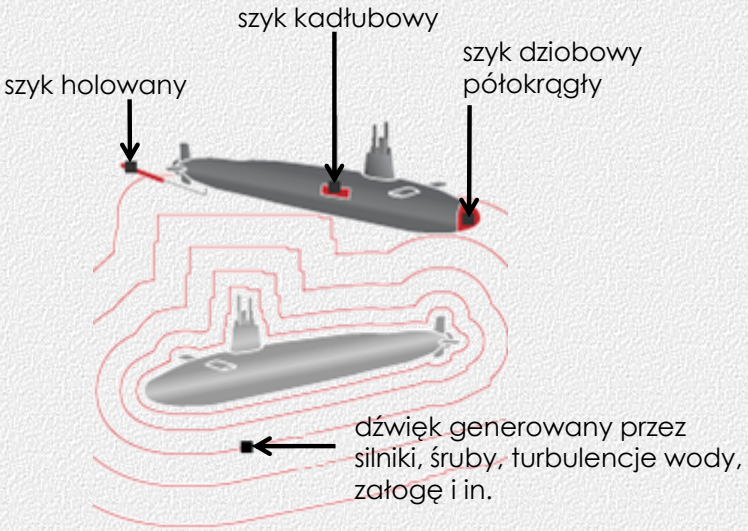
Szumonamiernik
(sonar pasywny)
urządzenie sonolokacyjne służące do wykrywania obiektów poprzez odbiór fal akustycznych wytwarzanych przez te obiekty lub od nich odbitych

SOSUS
Sound Surveillance System
amerykański system pasywnej obserwacji akustycznej wielkich przestrzeni oceanicznych (głównie do wykrywania okrętów podwodnych o napędzie nuklearnym).
SOSUS jest częścią większego systemu o nazwie *Integrated Undersea Surveillance System* (IUSS) i opiera się na sieci sensorów dennych rozmieszczonych w newralgicznych obszarach Atlantyku i Morza Północnego – dogodnych i możliwych przejściach okrętów na otwarte przestrzenie oceaniczne w kierunku wybrzeży Stanów Zjednoczonych, a także półkolem wzdłuż wybrzeży USA.
Po raz pierwszy zlokalizowano radziecki okręt podwodny za pomocą sieci SOSUS 26 czerwca 1962 r.
Z biegiem lat system był ustawicznie unowocześniany i rozszerzano jego zakres. Po zakończeniu zimnej wojny, jest częściowo używany także do celów cywilnych – głównie do badań nad wielkimi ssakami morskimi a także do monitorowania zmian klimatycznych Ziemi.

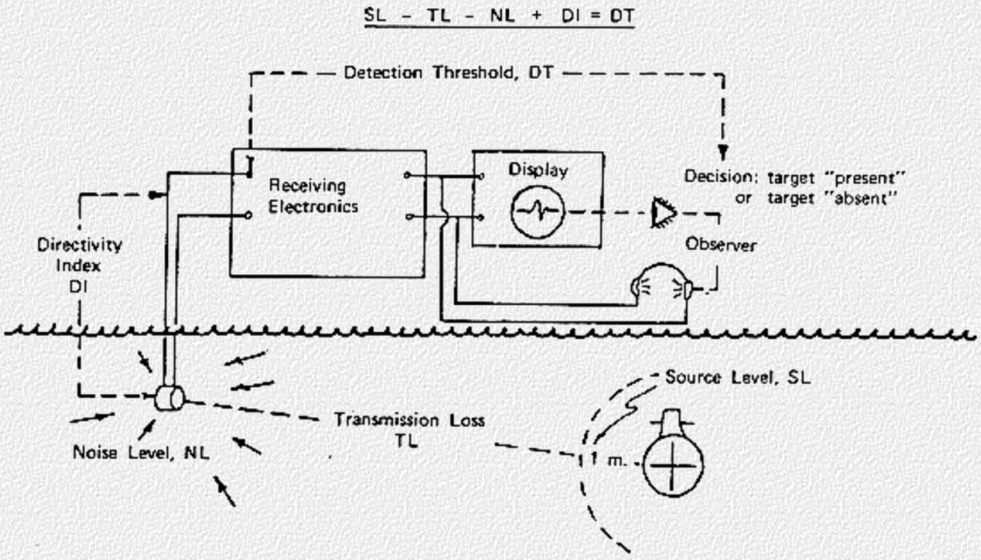




Sonary pasywne okrętu podwodnego



Równanie sonaru pasywnego (szumonamiernika)



$$SL - TL - NL + DI = DT$$

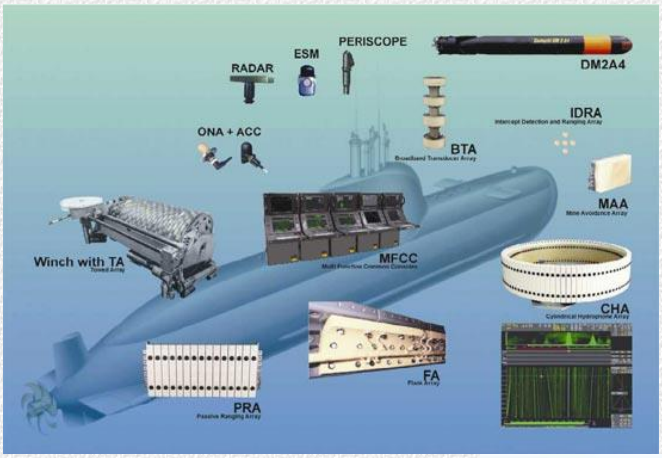
SL – poziom dźwięku w kierunku szumonamiernika w stosunku do określonego poziomu odniesienia (np. 20 μPa czyli 10^{-12} W/m^2, lub 1 Pa) w odległości 1 m od źródła

TL – straty transmisyjne (natężenie źródła/natężenie przy odbiorniku)

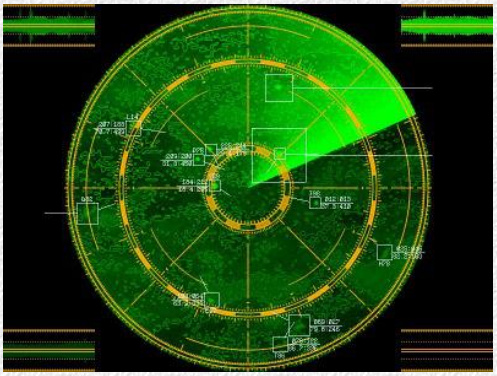
NL – poziom szumów

DI – indeks kierunkowości liczony w stosunku do poziomu generowanego przez źródło izotropowe

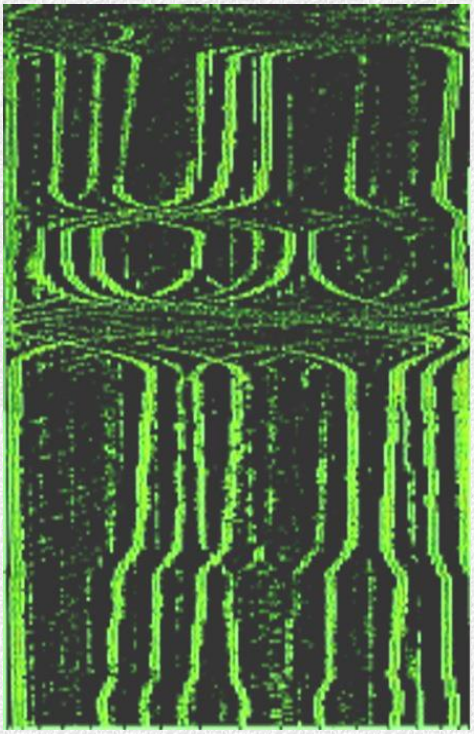
DT – próg detekcji poziom, poniżej którego przyjmuje się brak celu



Sonary aktywne i pasywne to często te same struktury przetworników



czas



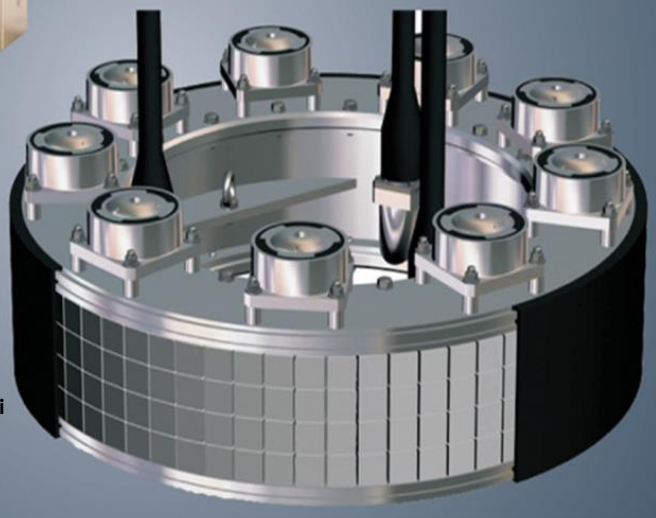
kąt

USS Toledo

Packet-E/NK

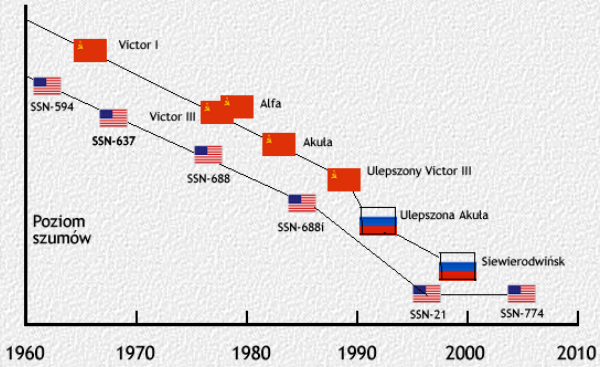
Pasywno-aktywny system sonarowy do detekcji i klasyfikacji atakujących torped oraz sygnałów sonarowych

Sonar aktywny włącza się automatycznie po wykryciu ataku przez sonar pasywny



System zawiera
dwa boczne szyki płaskie ± 45 °
wymiary : 780 x 310 x 170 mm
masa: 127 kg
szyk cylindryczny ± 135 ° (opcja)
wymiary: Ø 846 x 287 mm
masa: 352 kg
szafa DSP:
wymiary: 1500 x 500 x 465 mm
masa: 140 kg
Skrzynki przyłączy z przełącznikami nadawanie/odbiór
konsola operatorska
wymiary: 1422 × 602 × 998 mm
masa: 124 kg

Przeciwdziałanie



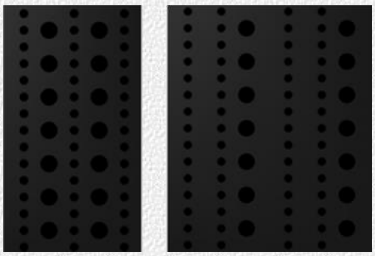
Porównanie poziomu szumów okrętów

Typ *Seawolf* był drugim amerykańskim typem okrętów podwodnych, na których zastosowano zewnętrzną powłokę anechoiczną (*ang. anechoic coatings*) noszącą nazwę *Special Hull Treatments.*
T tłumi ona dźwięki z wnętrza okrętu oraz pochłania dużą część fali dźwiękowej pochodzącej z sonarów aktywnych przeciwnika, pozostałą zaś cześć tej fali w dużym stopniu rozprasza.
Powłoka ta po raz pierwszy znalazła zastosowanie na okręcie typu *688i*

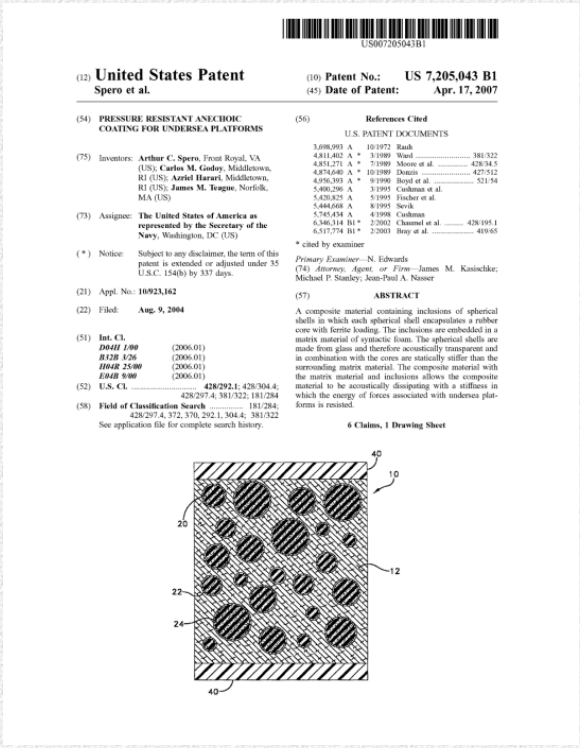
Special Hull Treatments

Geneza tej technologii sięga czasów II wojny światowej gdzie była znana pod nazwą Alberich. *Była to* około czteromilimetrowa warstwa gumy, która o 15% rozmazywała echo odbicia w zakresie 10–18 kHz.

Rozwój podobnej technologii w ZSRR był jednym z powodów, dla których radzieckie okręty stały się znacznie trudniejsze do wykrycia (sygnatura akustyczna spadła nawet o 20 dB)



przekroje poprzeczne dwóch rozwiązań



US007205043B1

(12) **United States Patent**
Spero et al.

(10) **Patent No.: US 7,205,043 B1**
(45) **Date of Patent: Apr. 17, 2007**

(54) **PRESSURE RESISTANT ANECHOIC COATING FOR UNDERSEA PLATFORMS**

(75) Inventors: **Arthur C. Spero**, Front Royal, VA (US); **Carlos M. Godoy**, Middletown, RI (US); **Azriel Harari**, Middletown, RI (US); **James M. Teague**, Norfolk, MA (US)

(73) Assignee: **The United States of America as represented by the Secretary of the Navy**, Washington, DC (US)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 337 days.

(21) Appl. No.: **10/923,162**

(22) Filed: **Aug. 9, 2004**

(51) **Int. Cl.**
D04H 1/00 (2006.01)
B32B 3/26 (2006.01)
H04R 25/00 (2006.01)
E04B 9/00 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.** **428/292.1**; 428/304.4; 428/297.4; 381/322; 181/284

(58) **Field of Classification Search** 181/284; 428/297.4, 372, 370, 292.1, 304.4; 381/322
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**
U.S. PATENT DOCUMENTS

3,698,993	A	10/1972	Rauh	
4,811,402	A *	3/1989	Ward	381/322
4,851,271	A *	7/1989	Moore et al.	428/34.5
4,874,640	A *	10/1989	Donzis	427/512
4,956,393	A *	9/1990	Boyd et al.	521/54
5,400,296	A	3/1995	Cushman et al.	
5,420,825	A	5/1995	Fischer et al.	
5,444,668	A	8/1995	Sevik	
5,745,434	A	4/1998	Cushman	
6,346,314	B1 *	2/2002	Chaumel et al.	428/195.1
6,517,774	B1 *	2/2003	Bray et al.	419/65

* cited by examiner

Primary Examiner—N. Edwards
(74) *Attorney, Agent, or Firm*—James M. Kasischke; Michael P. Stanley; Jean-Paul A. Nasser

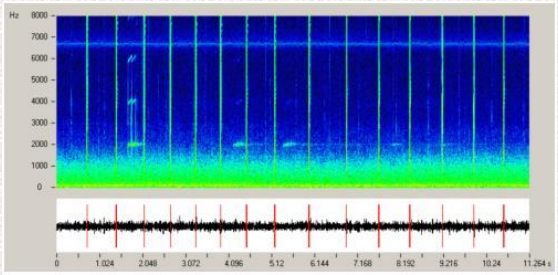
(57) **ABSTRACT**

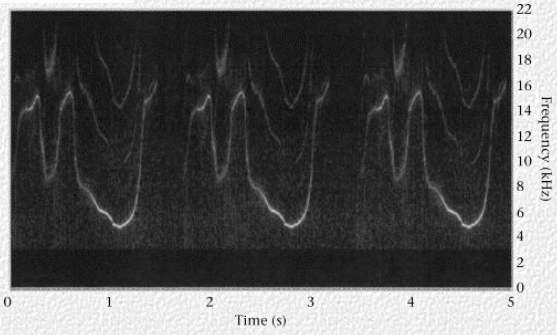
A composite material containing inclusions of spherical shells in which each spherical shell encapsulates a rubber core with ferrite loading. The inclusions are embedded in a matrix material of syntactic foam. The spherical shells are made from glass and therefore acoustically transparent and in combination with the cores are statically stiffer than the surrounding matrix material. The composite material with the matrix material and inclusions allows the composite material to be acoustically dissipating with a stiffness in which the energy of forces associated with undersea platforms is resisted.

6 Claims, 1 Drawing Sheet

Inne zastosowania

Badania ssaków morskich





Detekcja wycieków

przy ciśnieniu 55 barów i wycieku 0,1 kg/s dźwięk generowany przez wyciek jest wykrywalny z odległości do 20 m

generowane są zazwyczaj dźwięki o częstotliwości z zakresu 25-50 kHz

poziom dźwięku zależy od wielkości wycieku

ograniczenia
ciśnienia większe od 10 bar, szumy otoczenia niższe od 90 dB

Wytłumianie dźwięku w powietrzu

Poziom równoważny (ekwiwalentny) hałasu wprowadzany ze względu na niestacjonarność źródeł

$$L_{Aekw} = \frac{q}{0,3} \log \frac{1}{N} \sum_{i-1}^{N} n_i 10^{\frac{0,3L_{Ai}}{q}} \quad [\text{dB}]$$

q – współczynnik empiryczny zależny od rodzaju hałasu
dla h. komunikacyjnego $q = 4$, dla h. przemysłowego $q = 3$

n_i - liczba obserwacji dla poziomu L_{Ai}

N – liczba wszystkich obserwacji

Dopuszczalny (wg PN) poziom hałasu

na terenach zamieszkanych podmiejskich
< 45 dB w dzień < 35 dB w nocy

w centralnych częściach miast o natężeniu ruchu do 2000 pojazdów/godz.
< 55 dB w dzień < 45 dB w nocy

na terenach z zabudową handlową, usługową, biurową
< 60 dB w dzień, < 50 dB w nocy

Hałas w środowisku pracy normuje PN-94/N-1307

L_{Aekw} w okresie ośmiogodzinnej zmiany roboczej < 85dB
w kabinach bezpośredniego sterowania < 75 dB
w kabinach dyspozytorskich < 65 dB
w pomieszczeniach administracyjnych < 55 dB

A tymczasem ...

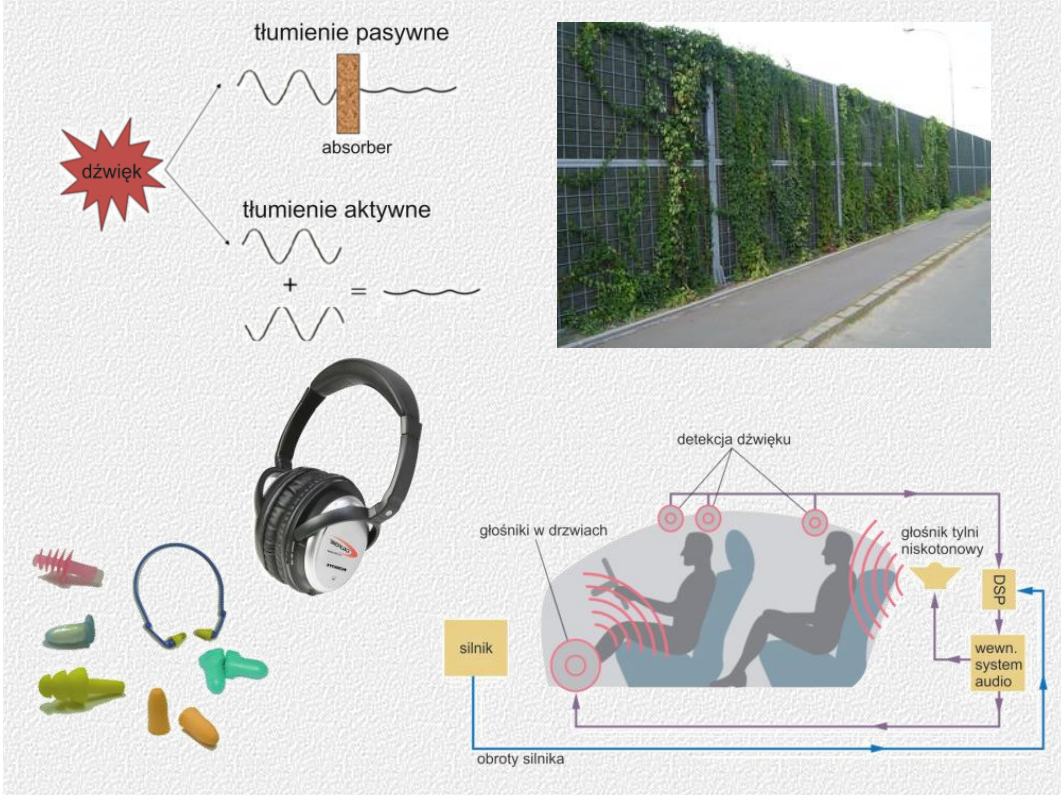
już w 1938 r. średni poziom hałasu w miastach wynosił 68 dB,
1952 r. - 77 dB,
1995 r. - 93 dB.

Poziom dźwięku nie powodujący zagrożenia słuchu 75 dB

Poziom dźwięku powodujący zagrożenie słuchu 115 dB

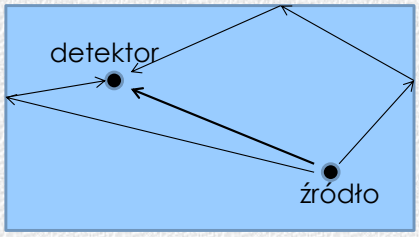
Infradźwięki są odbierane przez błędnik i ich nadmierny poziom powoduje ból głowy, wyraźny dyskomfort, nudności, omdlenia, itp..

Ultradźwięki są odbierane przez całe ciało. Ich nadmierny poziom powoduje zaburzenia w termoregulacji ciała (wzrost temperatury o ok. 0,7 °C, a przy wyższych poziomach hałasu nawet większy.



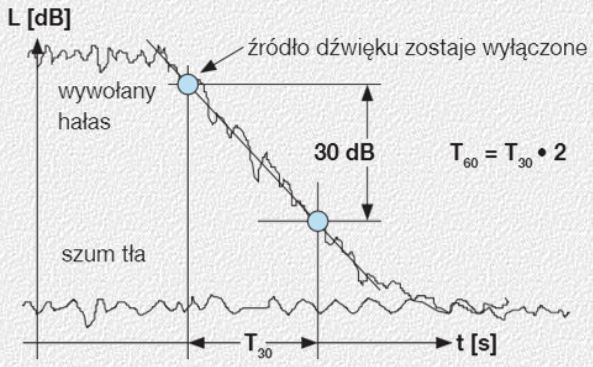
Tłumienie pasywne

absorbery
powierzchnie rozpraszające



czas pogłosu $T = 0{,}163\frac{V}{A}$

V – objętość pomieszczenia, A – ekwiwalentna powierzchnia absorpcji dźwięku



Ekwiwalentna powierzchnia absorpcji dźwięku to całkowita absorpcja dźwięku na danej powierzchni

$$A = \alpha S$$

α – jest stopniem pochłaniania ozn. ułamek lub procent pochłanianej energii dźwięku

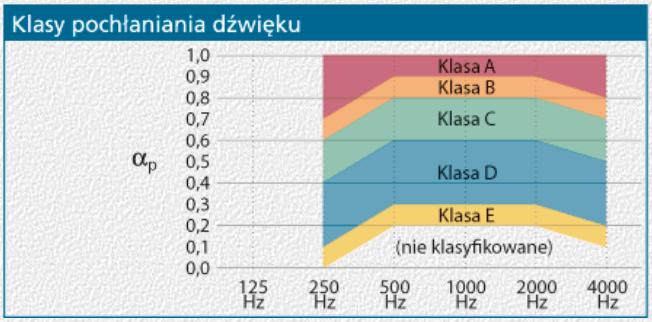
Dla układów złożonych oblicza się ją poprzez sumowanie.

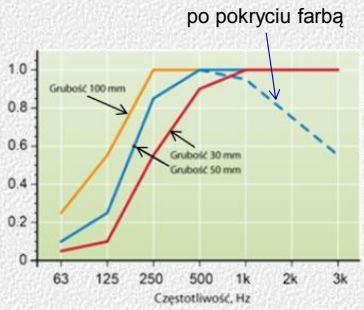
Np. dla pomieszczenia:

$$A_{pomieszczenia} = \alpha_{podogi} S_{podogi} + \alpha_{scian} S_{scian} + \alpha_{sufitu} S_{sufitu} + \alpha_{sprzęt} S_{sprzęt} + \ldots$$

Przy obliczeniach akustycznych stosuje się najczęściej stopnie absorpcji dla 6 wartości oktaw:
125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz

Oktawa to przedział częstotliwości, dla którego górna częstotliwość graniczna jest dwa razy większa od dolnej



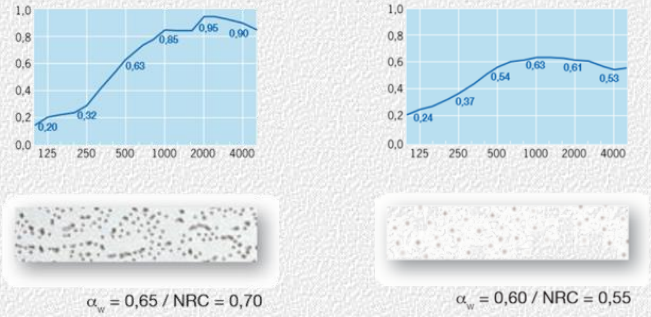


Pasmo oktawowe (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Beton	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
Płyty g-k na ruszcie	0.2	0.15	0.1	0.08	0.05	0.05
Okna	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
50-mm płyta z wełny mineralnej*	0.2	0.65	1.0	1.0	1.0	1.0
100-mm płyta z wełny mineralnej*	0.45	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0

Współczynnik redukcji hałasu NRC (*noise reduction coefficient*) zaokrąglona do pierwszego miejsca po przecinku średnia arytmetyczna stopni pochłaniania dla czterech częstotliwości

$$NRC = \frac{\alpha_{250\,Hz} + \alpha_{500\,Hz} + \alpha_{1000\,Hz} + \alpha_{2000\,Hz}}{4}$$

Izolacyjność akustyczna
Wyrażone w dB lub w % tłumienie dźwięku o określonej częstotliwości przechodzącego przez izolację



α_w = 0,65 / NRC = 0,70

α_w = 0,60 / NRC = 0,55

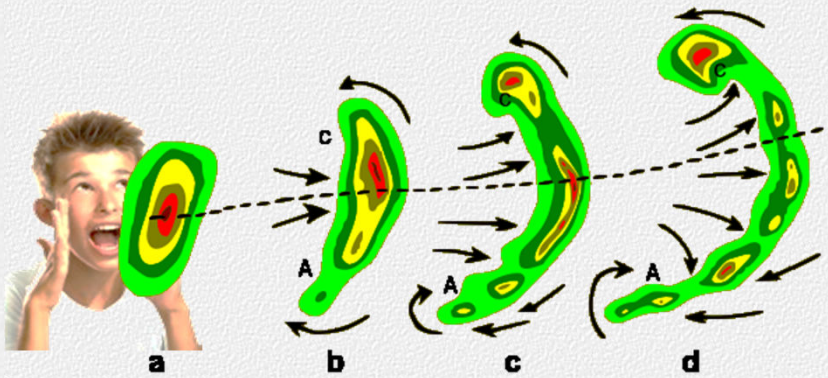
Sonolokacja w gazach

głębokość studni

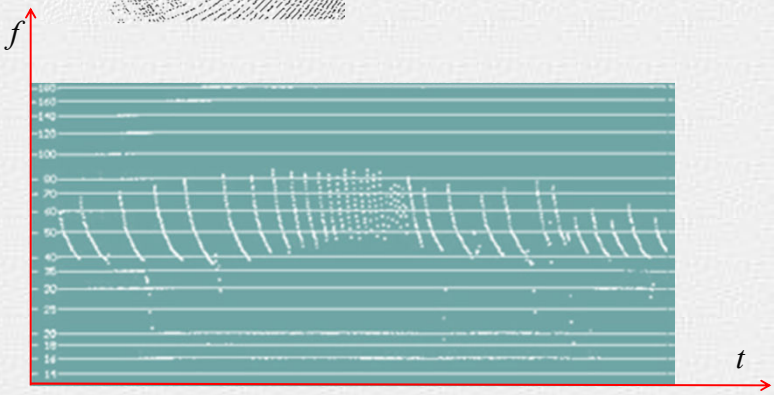
długość tunelu

odległość do lasu

itp..

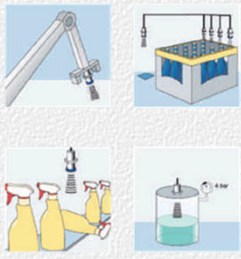


nietoperze	25 – 210 kHz
delfiny	do 280 KHz
ryjówki	20 - 64 kHz
niektóre ptaki (jerzykowate, lelkowate)	4 – 7 kHz



Zastosowania

detekcja ciał obcych w żywności
detekcja położenia, ruchu obiektów
pomiary przepływu, wysokości fal, temperatury
pomiary poziomu zapełnienia zbiorników
detekcja zbliżania



Cechy technicznej sonolokacji gazowej
(w powietrzu aerolokacji)

- osiągane dystanse od 30 mm do ok. 10 m
- osiągane rozdzielczości dochodzą do 0,02 mm
  w zastosowaniach specjalnych są nawet wyższe
- wysoka powtarzalność pomiarów
- szeroki zakres temperatur pracy typ. - 25 do +70 °C
- możliwość pracy w bardzo trudnych warunkach
  (mgła, wysokie zapylenie, gęste środowisko e.m., itp.)
- prostota technologiczna i układowa
- niewielkie rozmiary przetworników

Prędkość dźwięku w suchym powietrzu

$$v = 331{,}5\sqrt{1+\frac{T}{273{,}15}} \quad [\mathrm{m/s}]$$

T - temperatura w °C

Błąd określania dystansu przy zmianie temp. o 1°C

$$\Delta R(R) = 0{,}0068 \cdot R \quad [\mathrm{mm}]$$

- ✓ niewielki wpływ na prędkość fal akustycznych w powietrzu ma wilgotność
- ✓ zmiany ciśnienia praktycznie nie wpływają na prędkość fal akustycznych aż do ok. $6 \cdot 10^5$ Pa

Poziom echa od obiektu odległego o dystans R dla częstotliwości f

$$EL_f(R) = SPL(R_0) - 40 \log (R/R_0) - 2\alpha_f R + TS$$

$SPL(R_0)$ - poziom dźwięku emitera na dystansie odniesienia R_0

α_f – tłumienie na częstotliwości f

$TS=10\log(\sigma)$ – siła celu

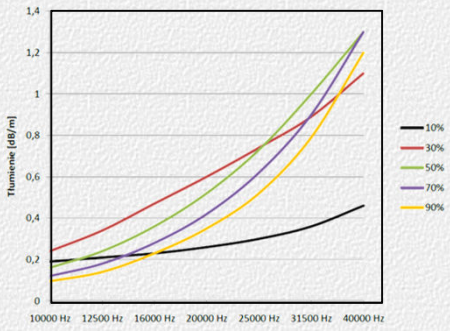
σ – czynna powierzchnia odbicia

teoretyczne wartości TS; $k=2\pi/\lambda$

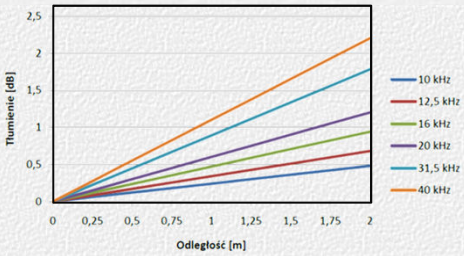
kształt	t	kierunek padania	uwagi
sfera o promieniu r	$r^2/4$	dowolny	kr>1, R>r
nieskończenie długi cylinder	rR/2	normalny do osi	kr>1, R>r
cylinder o długości L	$rL^2/2\lambda$	normalny do osi	kr>1, $R>L^2/\lambda$
elipsoida o rozmiarach a, b, c	$(bc/2a)^2$	normalny do osi gł.	ka, kb, kc>1 R>a, b, c
gładki i wypukły o pow. S	$S/16\pi$	dowolny od przodu	wszystkie wym.>λ

Tłumienie dźwięku w powietrzu w warunkach normalnych (20 °C i 101,325 kPa)

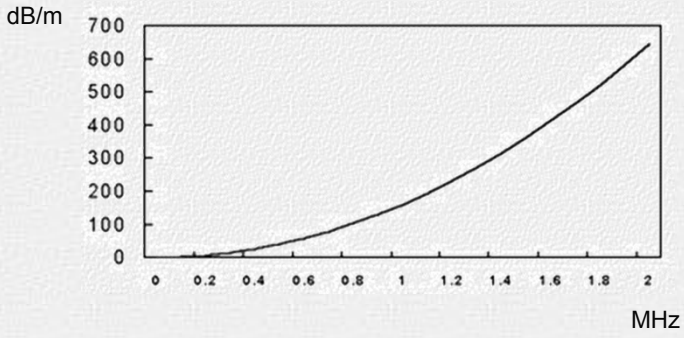
dla różnych poziomów wilgotności względnej



dla różnych częstotliwości przy RH=30%



Tłumienie rośnie ekspotencjalnie wraz z częstotliwością



Zasięgi dla różnych częstotliwości dla progu -60 dB (do 1 μPa)

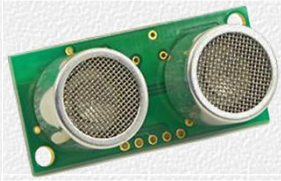
częstotliwość	dystans w [m] do	
[kHz]	płaszczyzny	sfery r = 15 cm
40	9,2	3,0
63	5,5	2,4
100	3,2	1,7
160	2,0	1,2
200	1,6	1,1

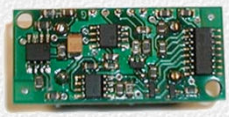
Uwaga:

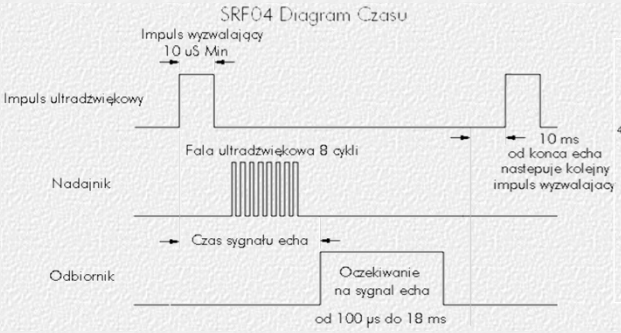
Należy uważać na to do czego odnosi się podawany poziom dźwięku – tutaj 1 μPa (ultradźwięki) w zakresie słyszalnym dla ludzkiego jest to 20 μPa (10^{-12} W/m^2)

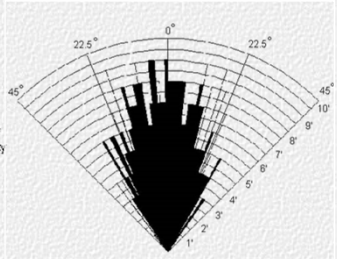
piezoelektryczne przetworniki SRF 04

***Napięcie:* 5 V**
***Prąd typ.* 50 mA**
***Max częstotliwość:* 40 KHz**
***Max zasięg:* 3 m**
***Min zasięg:* 3 cm**



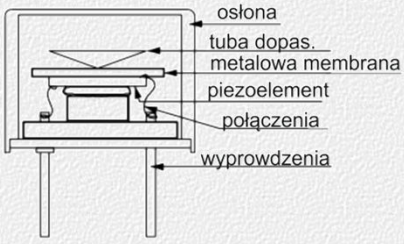




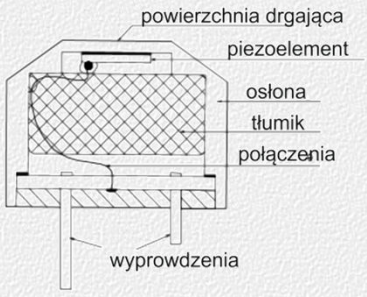


Dwa typy budowy

z otwartą aperturą



z zamkniętą aperturą



P T 40 18

średnica
[mm]
zwykle 10 do 16

otwarta apertura
PC - zamknięta

nadajnik
R – odbiornik
C - uniwersalny

częstotliwość
[kHz]
zwykle 25 i 40

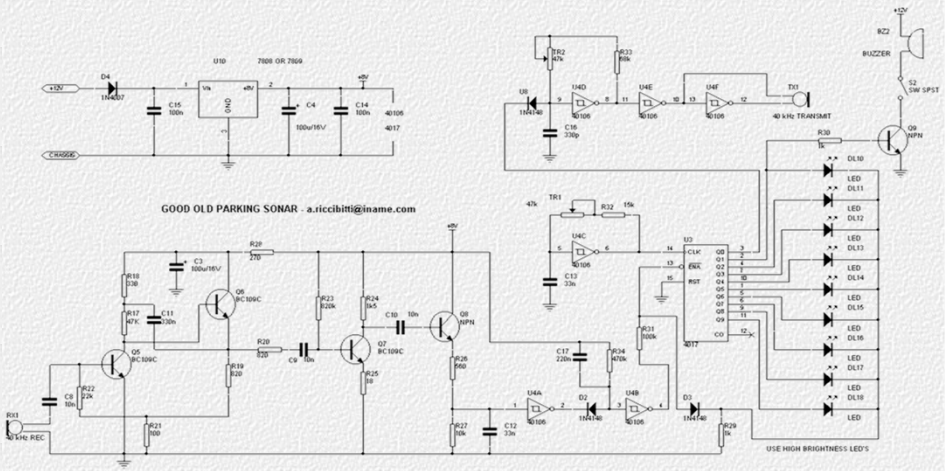
przykładowe parametry przetworników z otwartą aperturą

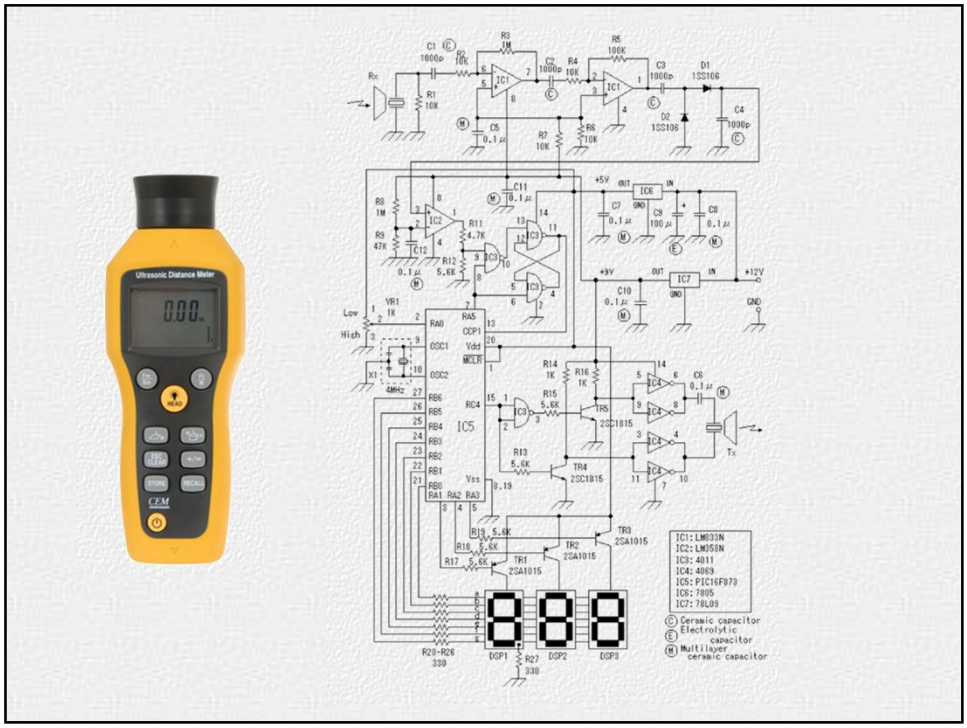
Item: Type	Item: Model	Center Frequency (kHz)	Sound Pressure (dB)	Sensitivity (dB)	−6dB Directivity Typical (deg)	Equivalent Circuit: Cb (pF)	Equivalent Circuit: R (Ω)	Equivalent Circuit: L (mH)	Equivalent Circuit: Ca (pF)	Appearance
Transmitter /Receiver	T/R2516A1	25	>110	>−65	80	Ⓣ 2000	1000	130	130	C
						® 2400	1000	130	130	
	T/R4010A1 ※3	40	122±3	−62.5±3	100	2700	700	80	200	A
	T/R4012A1		>112	>−70	85	2100	1000	80	100	B
	T/R4016A2		>115	>−67	55	2100	800	130	130	C
	T/R4016A1		>115	>−67	55	2100	800	130	130	D
Common use	C4016A1		−	※1>−58	55	2200	1700	140	100	C

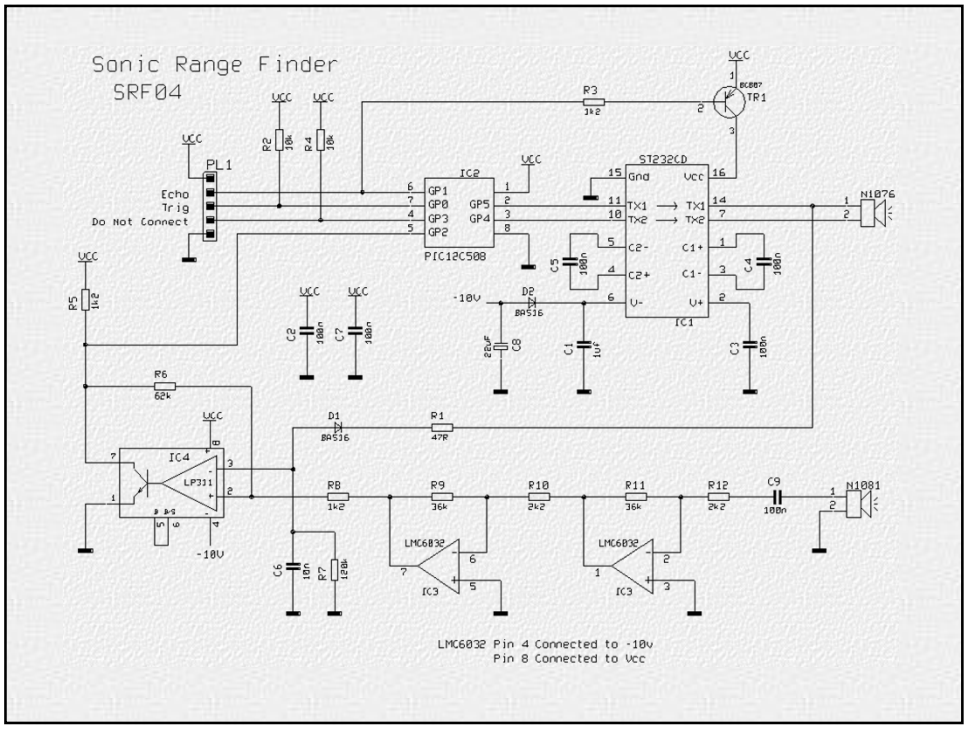
przykładowe parametry przetworników z zamkniętą aperturą

Conical	PC40-18S	40	>100	−80	80	2200	400	130	130	E

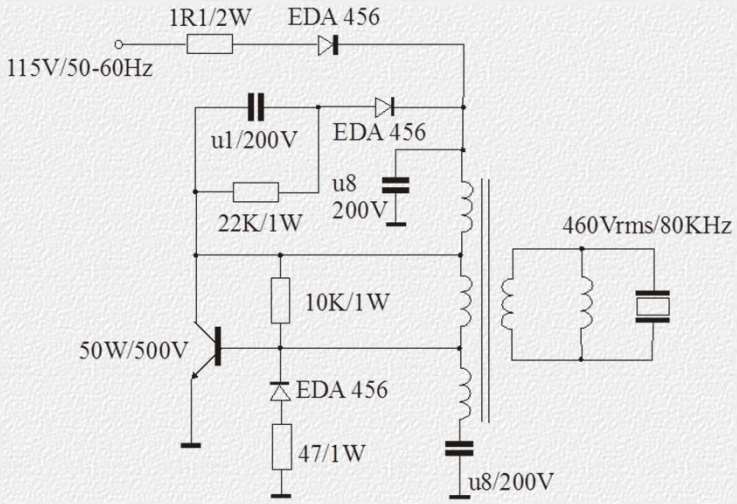
Sonar samochodowy



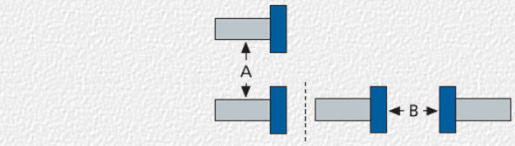

Ultrasonic Distance Meter
IC1: LM833N
IC2: LM358N
IC3: 4011
IC4: 4069
IC5: PIC16F873
IC6: 7805
IC7: 78L09
Ceramic capacitor
Electrolytic capacitor
Multilayer ceramic capacitor


Sonic Range Finder
SRF04
PL1
Echo
Trig
Do Not Connect
PIC12C508
ST232CD
TR1
IC1
IC2
IC3
IC4
D1
D2
N1076
N1081
LMC6032 Pin 4 Connected to -10v
Pin 8 Connected to Vcc

Przykład nadajnika dużej mocy

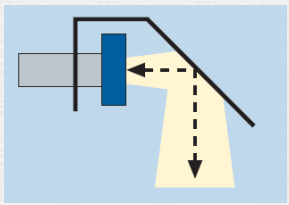


Zasady montażu czujników ultradźwiękowych

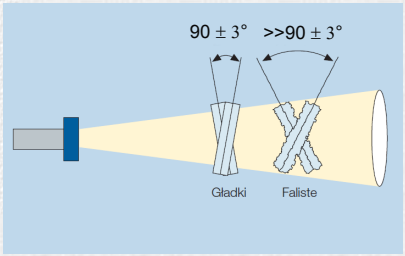


0,2 m	≥10 cm	≥100 cm
0,35 m	≥30 cm	≥170 cm
1,3 m	≥60 cm	≥ 540 cm
3,4 m	≥160 cm	≥1,600 cm
6,0 m	≥260 cm	≥3,000 cm

metoda przekierowania wiązki

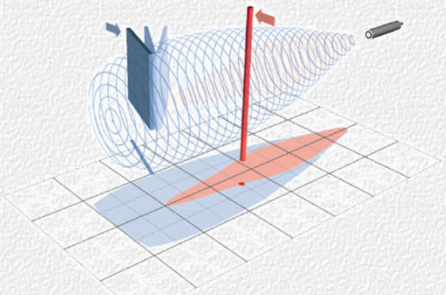


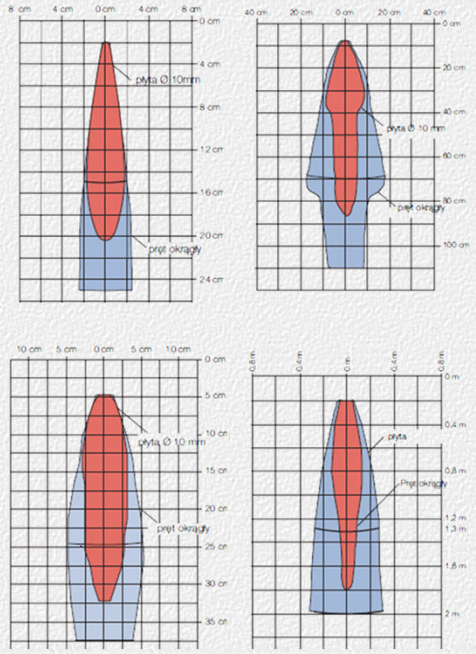
tolerancja ustawienia



Zasięgi dla obiektów

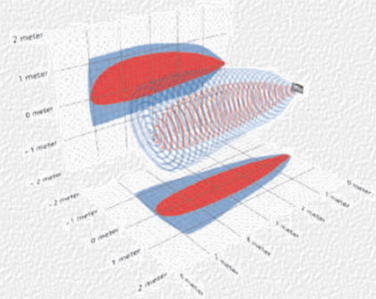
o małej i dużej sile celu

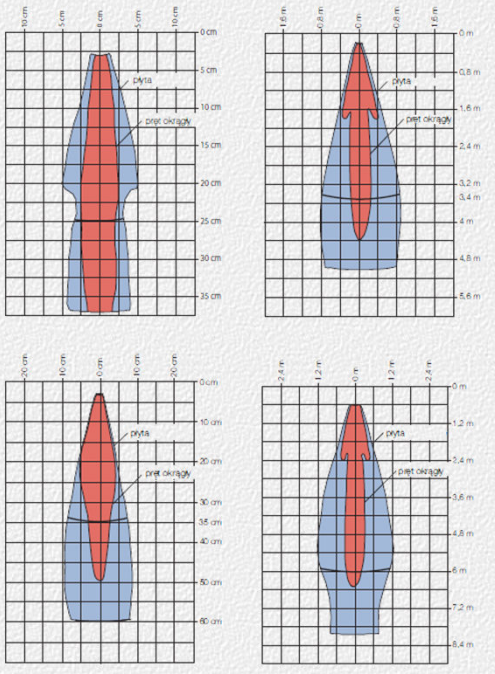




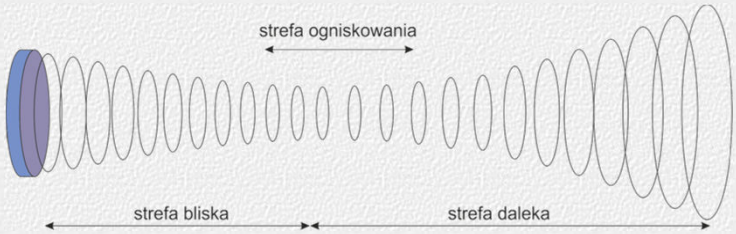
Siłą celu nazywa się wyrażony w decybelach iloraz natężenia fali odbitej od celu w kierunku odbiornika w odległości 1 m od jego środka i natężenia płaskiej fali akustycznej padającej na cel z kierunku nadajnika.

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_i}$$



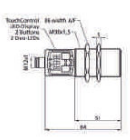
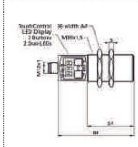
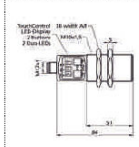
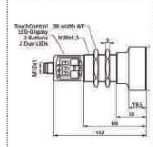
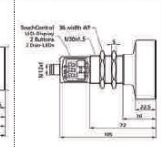


Dobór średnicy przetwornika

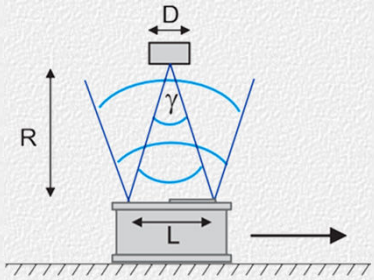


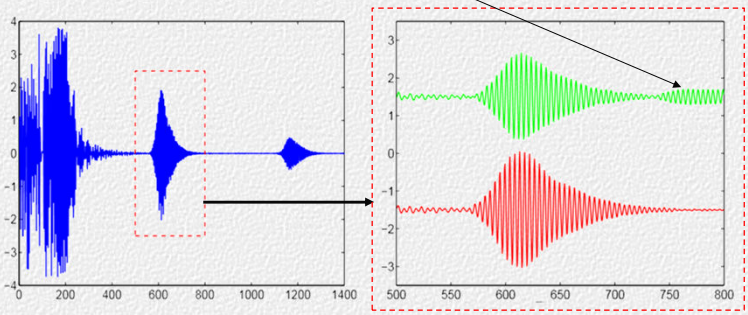
- ze wzrostem częstotliwości lub średnicy rośnie odległość przetwornika do strefy ogniskowania, maleje szerokość strefy dalekiej
- w najwęższym miejscu średnica wiązki jest równa połowie średnicy przetwornika
- w odległości równej dwukrotnej długości strefy bliskiej średnica wiązki jest równa średnicy przetwornika

Przykłady przetworników przemysłowych

Zakres detekcji	30-250 mm	60-350 mm	200-1.300 mm	350-3.400 mm	600-6.000 mm
Obudowa					
Max zakres	350 mm	600 mm	2.000 mm	5.000 mm	8.000 mm
Częstotliwość pracy	320 kHz	400 kHz	200 kHz	120 kHz	80 kHz
Powtarzalność	± 0,15%	± 0,15%	± 0,15%	± 0,15%	± 0,15%
Rozdzielczość	0,025 mm	0,025mm	0,18 mm	0,18 mm	0,18 mm
Napięcie zasilania	9-30 VDC zabezpieczenie przed odwrotną polaryzacją				
Tętnienia napięcia	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%
Prąd bez obciążenia	≤ 55mA	≤ 55mA	≤ 55mA	≤ 55mA	≤ 55mA
Obudowa	mosiężna, niklowana lub stal nierdzewna				
	elementy z tworzywa: PBT, TPU				
Stopień ochrony	IP67	IP67	IP67	IP67	IP67
Złącze elektryczne	Złącze 5-stykowe M12				
Wyświetlacz	3 cyfrowy LED				
	2 trójkolorowe diody LED - wersja TC				
	brak - wersja M				
Metody ustawiania	Przycisk Touch Control lub oprogramowanie LinkControl - wersja TC				
	PIN 5 złącza, oprogramowanie LinkControl - wersja M				
Temperatura pracy	-25° do +70°C	-25° do +70°C	-25° do +70°C	-25° do +70°C	-25° do +70°C
Waga	150g	150g	150g	210g	270g
Czas reakcji	50 ms	70ms	110ms	180ms	240ms
Czas gotowości	<300 ms	<300 ms	<300 ms	<300 ms	<300 ms

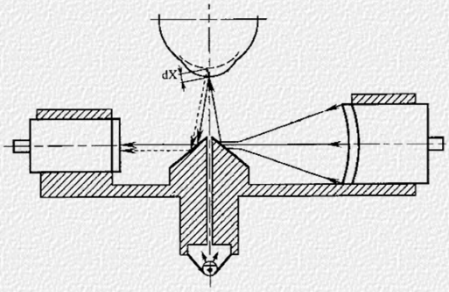
Przykład zastosowania

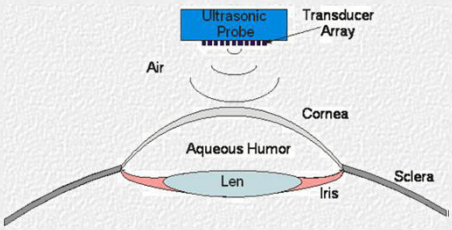




Tonometria ultradźwiękowa

bezkontaktowy pomiar ciśnienia śródgałkowego



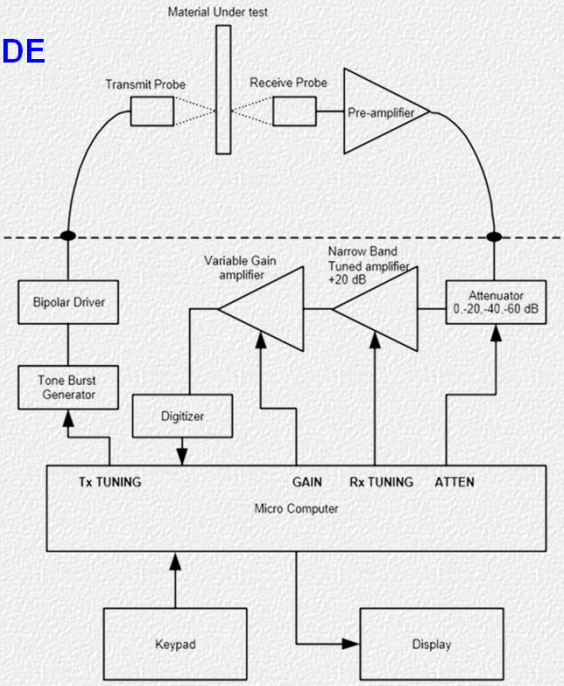


Air-coulped NDT / NDE

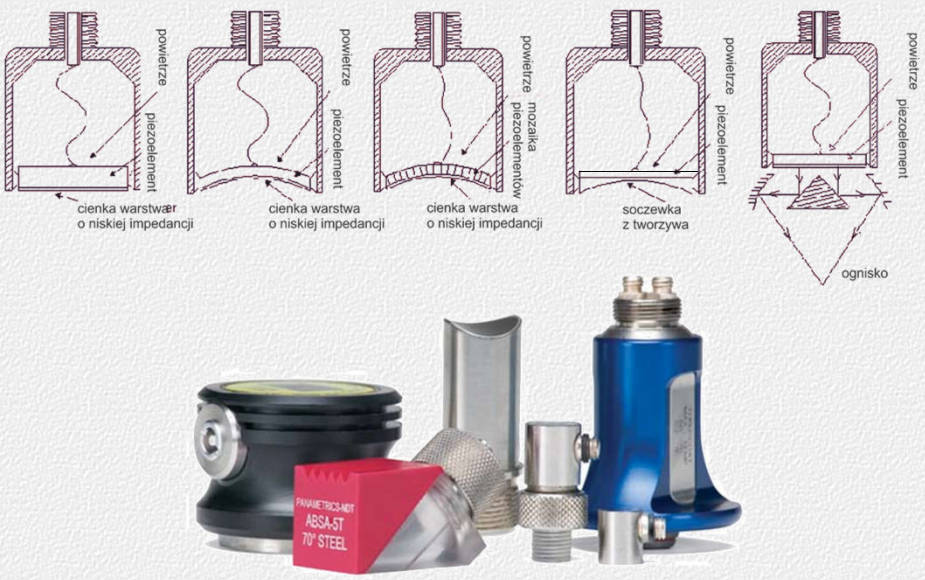
typowe straty 30 dB

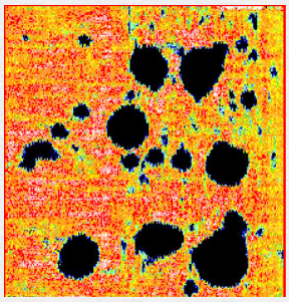
na jedną granicę, co

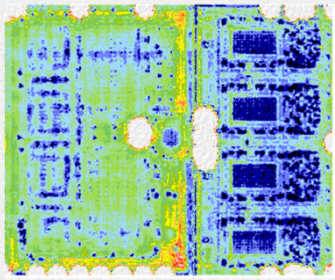
daje nawet 120 dB

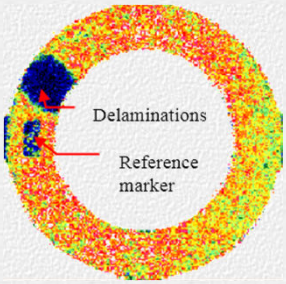


Różne konstrukcje głowic

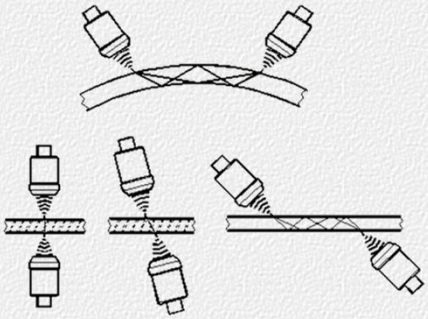


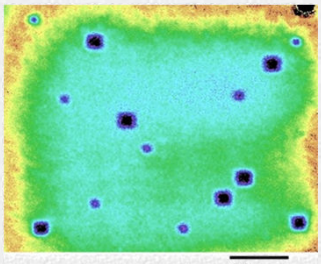


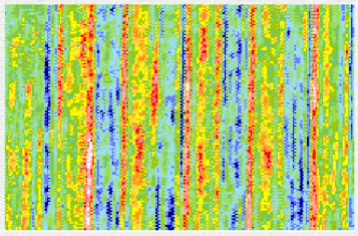


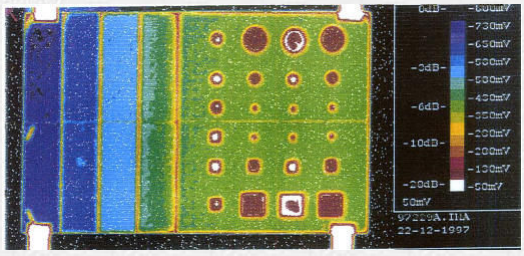


Wykorzystanie fal akustycznych w płycie



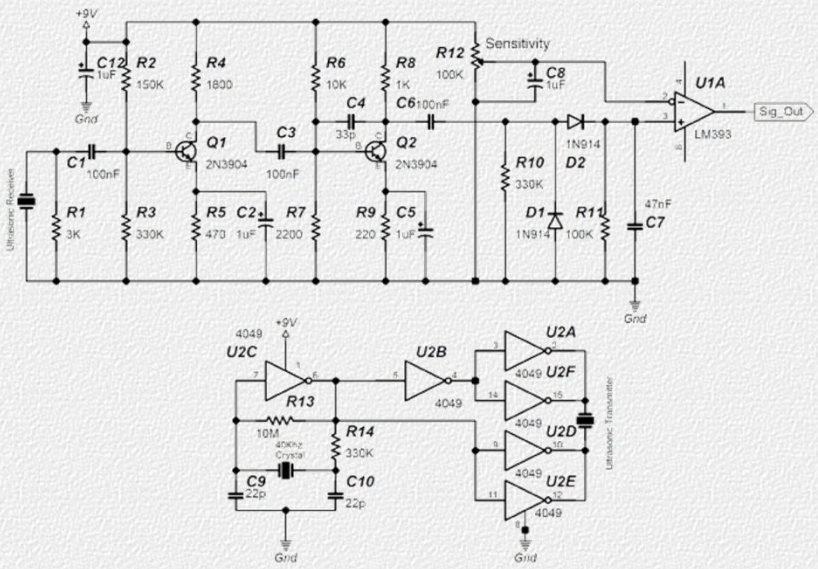






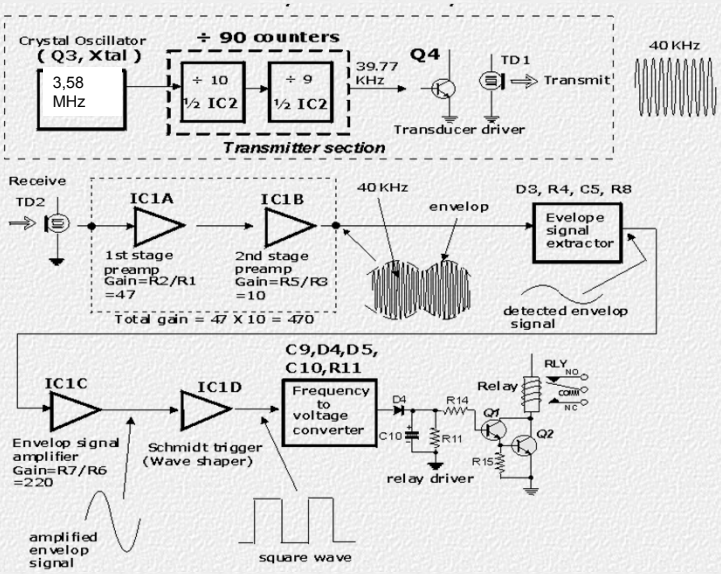
detektory zbliżania

detekcja dudnień

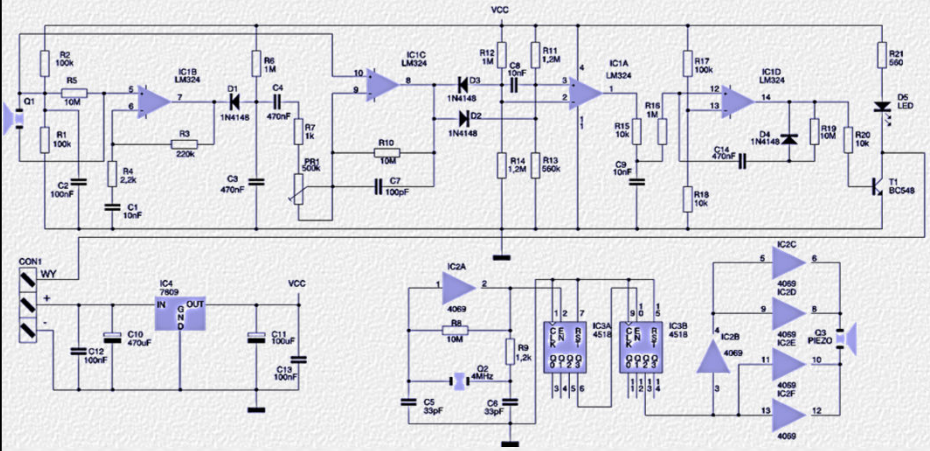


detektory ruchu

detekcja dopplerowska



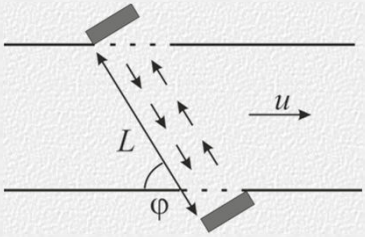
Przykład realizacji



Detekcja przepływu gazu

Neonatologia	Dorośli	Konie
rozdzielczość: < 1 ml/s	rozdzielczość: < 10 ml/s	rozdzielczość: < 80 ml/s
zakres: 500 ml/s	zakres: 18 l/s	zakres: 100 l/s

Zasada pomiaru



czas „w górę”

$$t_u = \frac{L}{c + u \cdot \cos\varphi}$$

czas „w dół”

$$t_d = \frac{L}{c - u \cdot \cos\varphi}$$

$$u = \frac{L}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \frac{t_d - t_u}{t_d \cdot t_u}$$

prędkość przepływu nie zależy od prędkości dźwięku w gazie

SODARY

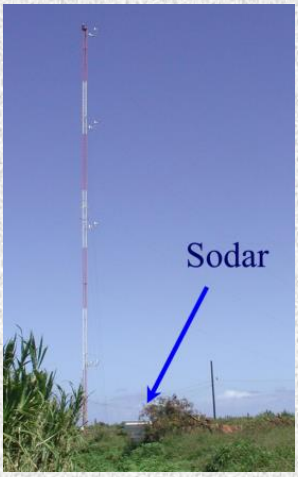
Sonic **D**etection **A**nd **R**anging (SODAR)
(*Sounder / Echosounder / Acoustic Radar*)

Urządzenie akustyczne służące do zdalnego pomiaru rozkładu prędkości wiatru w dolnych warstwach atmosfery

- Propagacja dźwięku w atmosferze badana jest od przeszło 200 lat
- Od ok. 50 lat zjawiska dźwiękowe wykorzystywane są do badań struktury najniższych warstw atmosfery ziemskiej (ZSRR, USA)
- Na przełomie lat `60 i `70 ub. wieku naukowcy z U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration zaprezentowali pierwszy SODAR o zasięgu ok. 1 km

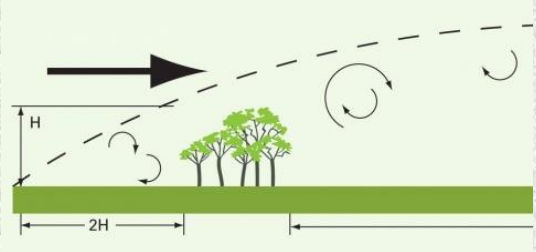
Główne obszary zastosowań

- Meteorologia
- Awiacja
- Energetyka wiatrowa
- Inżynieria budowlana
- Badania fizyczne atmosfery
  (np. propagacja fal elektromagnetycznych)



Podstawy fizyczne

- Przemieszczaniu się mas powietrza i zmianom jego temperatury towarzyszą turbulencje
- Turbulencje są obiektami odbijającymi dźwięk
- Współczynnik odbicia od lokalnych turbulencji jest funkcją lokalnej prędkości wiatru i temperatury
- Częstotliwość dopplerowska akustycznego echa umożliwia określenie składowej radialnej prędkości wiatru
- Tłumienie dźwięku w atmosferze umożliwia przy obecnym stanie techniki pomiar jej stanu do wysokości kilku tysięcy m



Równanie zasięgowe SODARu

P_R – moc odbierana
P_T – moc transmitowana
G – zysk źródeł dźwięku
A_e – zysk detektorów
τ – czas trwania impulsu
c - prędkość dźwięku
v – prędkość wiatru
α – wsp. tłumienia dźwięku w atmosferze
σ_s – przekrój czynny na odbicie
z - wysokość

$$P_R = P_T G A_e \sigma_s \frac{c\tau}{2} \frac{e^{-2\alpha z}}{z^2}$$

$$\sigma_s = \frac{1}{8} \frac{k^4}{\kappa^{11/3}} \cos^2\beta \left[0,033 \frac{C_T^2}{T^2} + 0,76 \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \frac{C_v^2}{\pi v^2} \right]$$

$$\kappa = 2k \sin\frac{\beta}{2}$$ β – kąt odbicia dźwięku od turbulencji

$$C_v^2 = \frac{\overline{[V(x)-V(0)]^2}}{x^{2/3}} \qquad C_T^2 = \frac{\overline{[T(x)-T(0)]^2}}{x^{2/3}}$$

$$\frac{P_R}{P_T} \sim e^{-2\alpha z}$$

Na 100 m dla 4,5 kHz stosunek ten jest rzędu 10^{-14}

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_m$$

α_c – „klasyczna" absorbcja proporcjonalna do f^2 i wynikająca z m in. z lepkości powietrza

α_m – absorbcja molekularna – kolizje cząstek azotu powietrza i wody

W powietrzu suchym przeważa absorpcja „klasyczna" co ogranicza od góry stosowane Częstotliwości pracy SODARów do ok. 10 kHz

Zasięg maleje z częstotliwością

Rozdzielczość częstotliwościowa (prędkości wiatru)

$$\Delta f_v = \frac{1}{\tau}$$

Rozdzielczość wysokościowa

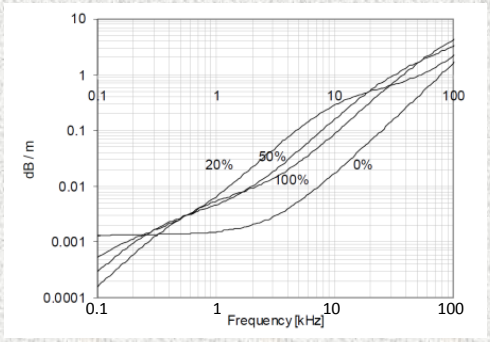
$$\Delta z = \frac{c\tau}{2}$$

Maksymalna wysokość

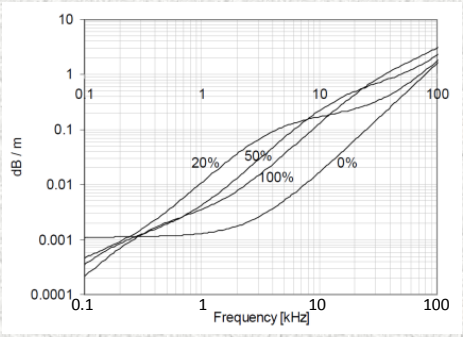
$$z_{\max} = \frac{cT}{2}$$

Tłumienie fali akustycznej w powietrzu dla 10 i 20 °C przy różnych wilgotnościach względnych

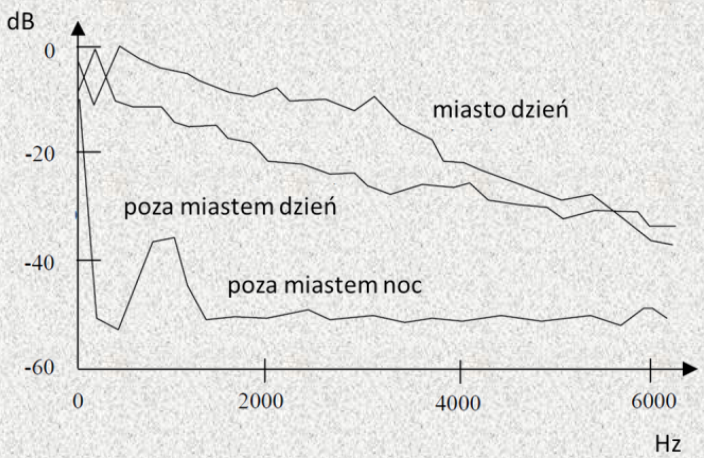
10 °C



20 °C



Dźwiękowy poziom szumów tła zależy od otoczenia



Pomiar prędkości wiatru możliwy jest przy odchylaniu wiązki poprzez

- mechaniczne odchylanie przetworników
- wykorzystanie kilku przetworników o różnych nachyleniach
- elektroniczne odchylanie wiązki w szyku fazowanym przetworników

Dla szyku fazowanego natężenie wiązki wynosi

$$I \approx \left[\frac{sin\left(Nk\frac{d}{2}\sin\theta \right)}{sin\left(k\frac{d}{2}\sin\theta \right)} \right]^2$$

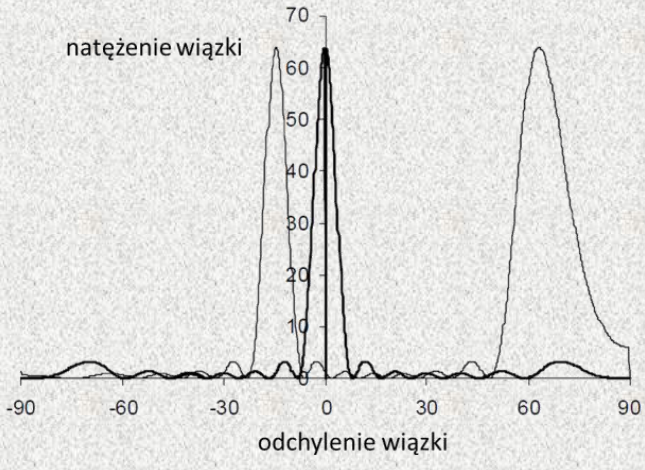
N – liczba przetworników w szyku liniowym
d – odległość między środkami przetworników
k – liczba falowa

Odchylenia wahają się zazwyczaj w zakresie 16-30°

Praktyczny limit odchylenia wiązki

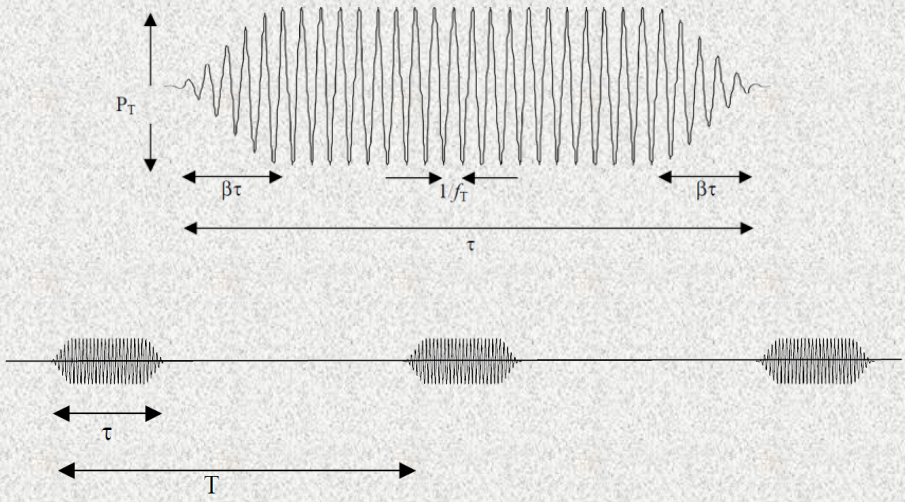
$$\Delta\theta \leq \frac{\pi}{2dk}$$

Przykład 8 przetworników rozmieszczonych co 0,95 λ na częstotliwości 4,5 kHz



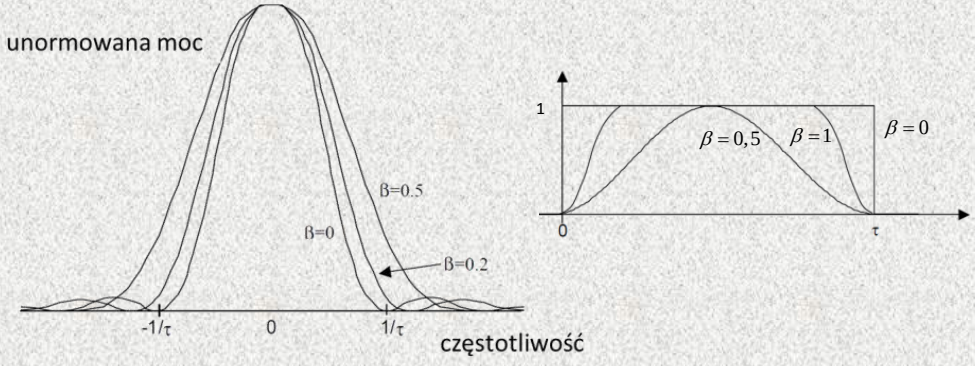
Sygnałami najczęściej stosowanymi w SODARach są paczki monoczęstotliwościowe o określonym czasie narastania i opadania amplitudy

$$\frac{P_R}{P_T} \sim \tau$$

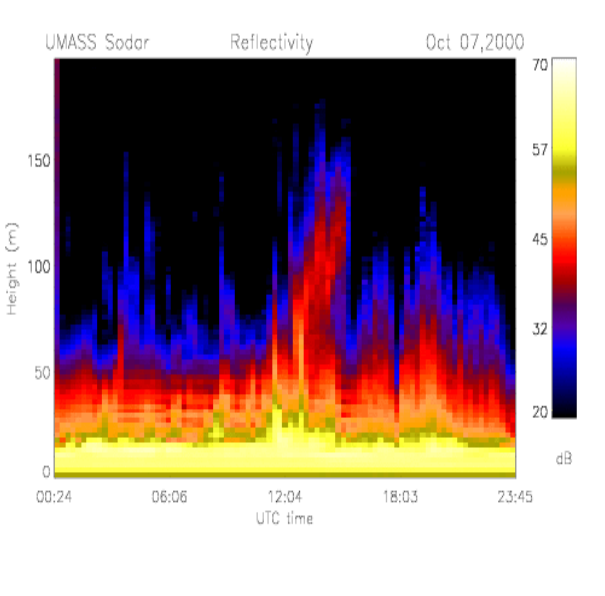


Ważenie zboczy odbywa się zazwyczaj za pomocą funkcji Hanninga

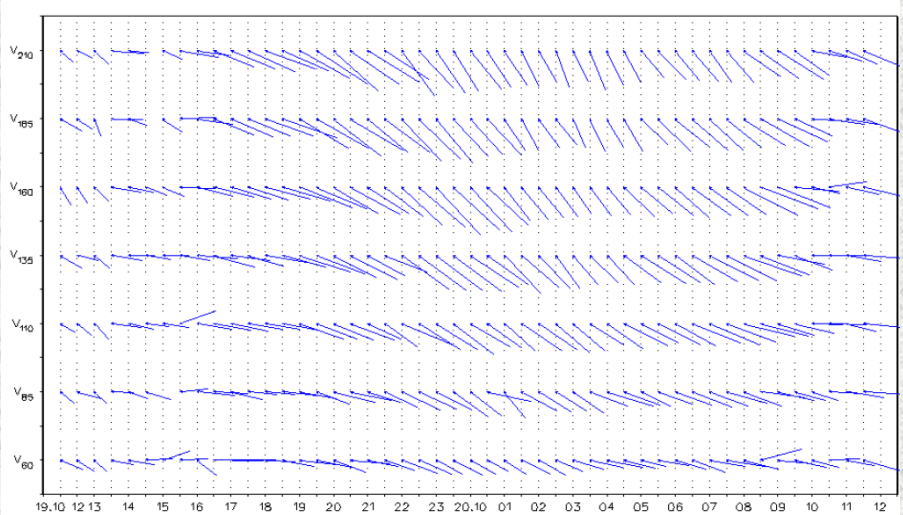
$$(1-\beta)\,p(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{\beta\tau}t\right)\right] & dla\ \ 0 < t < \beta\tau \\ 1 & dla\ \ \beta\tau < t < \tau(1-\beta) \\ \frac{1}{2}\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{\beta\tau}(\tau-t)\right)\right] & dla\ \ \tau(1-\beta) < t < \tau \end{cases}$$



Poprzez cykliczny pomiar amplitudy ech powracających do urządzenia można uzyskać wysokościowy profil wiatru



Transmisja impulsów w kierunku pionowym oraz przynajmniej dwóch innych kierunkach umożliwia określenie kierunku wiatru



Profil wiatrowy

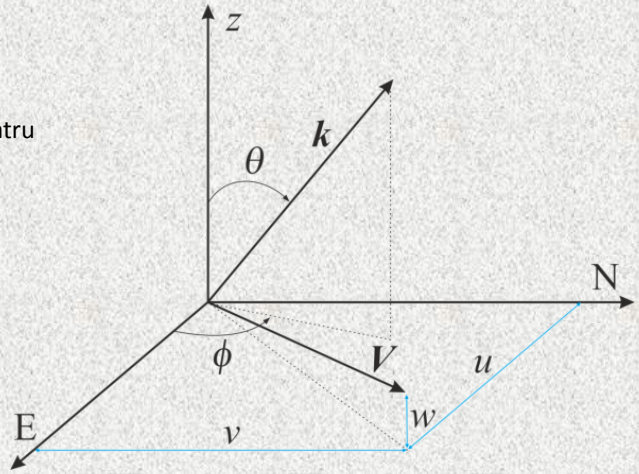
Obliczanie kierunku wiatru

Jeśli zignorować *w* to prędkość wiatru

$$\boldsymbol{V} = WS = \sqrt{u^2 + v^2}$$

kierunek wiatru

$$WD = \tan^{-1}\frac{u}{v}$$



Całkowite przesunięcie Dopplera fali o wektorze falowym $\boldsymbol{k}$ $\Delta\omega = -2\boldsymbol{kw}$

w – pionowa składowa prędkości wiatru $\boldsymbol{V}$

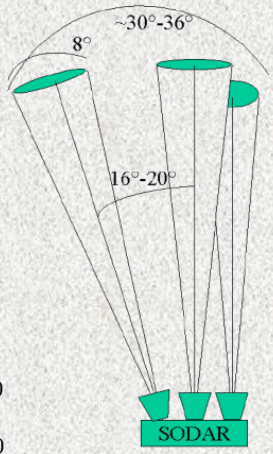
z geometrii problemu

$$\Delta\omega = -2k(u\sin\theta\cos\phi + v\sin\theta\sin\phi + w\cos\theta)$$

SODAR generuje trzy wiązki

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_0 \sim \frac{\pi}{10} \quad \theta_3 = 0$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 0 \qquad \phi_2 = \frac{\pi}{2}$$



przesunięcia Dopplera dla tych wiązek wyniosą odpowiednio

$$\Delta\omega_1 = -2ku\sin\theta_0 - 2kw\cos\theta_0$$
$$\Delta\omega_2 = -2kv\sin\theta_0 - 2kw\cos\theta_0$$
$$\Delta\omega_3 = -2kw$$

stąd

$$u = -\frac{\Delta\omega_1}{2k\sin\theta_0} - \frac{w}{\tan\theta_0}$$

$$v = -\frac{\Delta\omega_2}{2k\sin\theta_0} - \frac{w}{\tan\theta_0}$$

$$w = -\frac{\Delta\omega_3}{2k}$$

Składowa pionowa w jest zwykle dużo mniejsza od u i v może być więc zignorowana wtedy:

$$u = -\frac{\Delta\omega_1}{2k\sin\theta_0}$$

$$v = -\frac{\Delta\omega_2}{2k\sin\theta_0}$$

Jeśli dla przykładu w=0,1 m/s przy $\theta_0 = \pi/10$ to błąd wyznaczenia u wyniesie 0,3 m/s przy czym typowy poziom błędów metody jest rzędu 0,5 m/s

Błąd kąta wpływa na błąd wyznaczenia przesunięcia Dopplera (składowa w zignorowana)

$$\frac{\delta\Delta\omega_1}{\Delta\omega_1} = 2\frac{\delta\theta_0}{\tan\theta_0}$$

Typowo

$$\delta\theta_0 \approx \pm\frac{\pi}{40} \text{ dla } \theta_0 = \frac{\pi}{10}$$

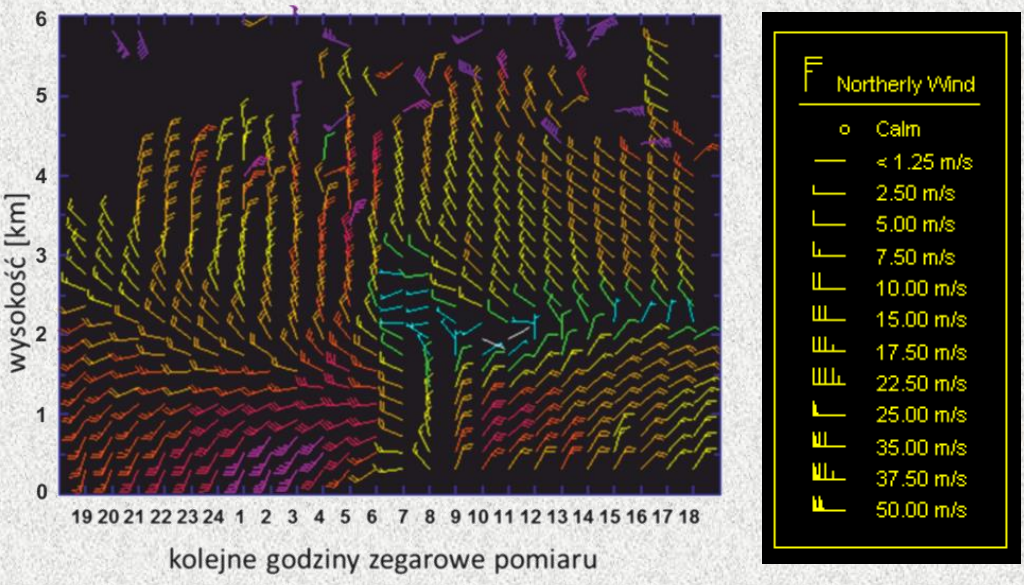
zatem dla

$$k = 80\ [\mathrm{s}^{-1}],\ u = 5\ [\mathrm{m/s}]$$

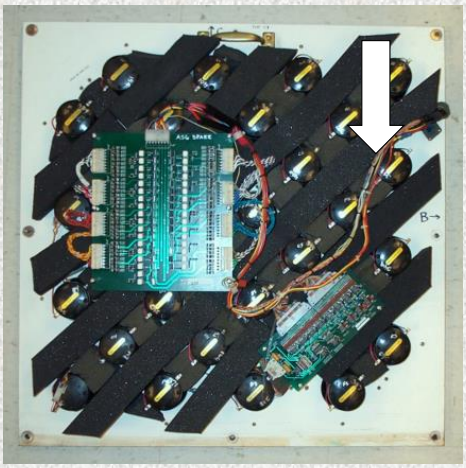
$$\Delta\omega_1 = 250\ [\mathrm{rad/s}] \text{ tj. } \Delta f_1 = 39\ [\mathrm{Hz}]$$

$$\delta\Delta\omega_1 = 160\ [\mathrm{rad/s}] \text{ tj. } \delta\Delta f_1 = 26\ [\mathrm{Hz}]$$

oznaczenia skali wiatru



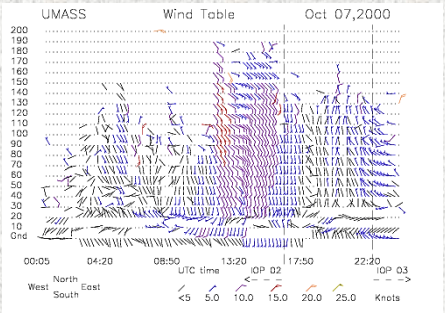
Przykładowe urządzenie złożone z 32 przetworników piezoceramicznych

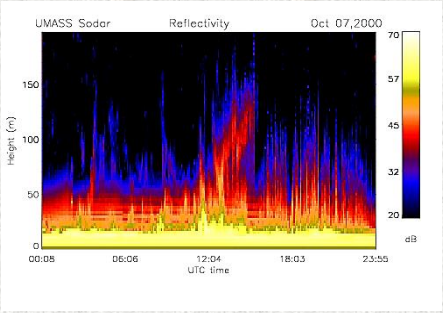


Parametry

częstotliwość pracy	od 2800 Hz do 3000 Hz
szerokość impulsu	od 30 ms do 200 ms
zakres wysokościowy	od 30 m do 500 m
rozdzielczość wysokościowa	10 m
liczba wiązek	1 pionowa, 2 odchylone od pionu o 23°

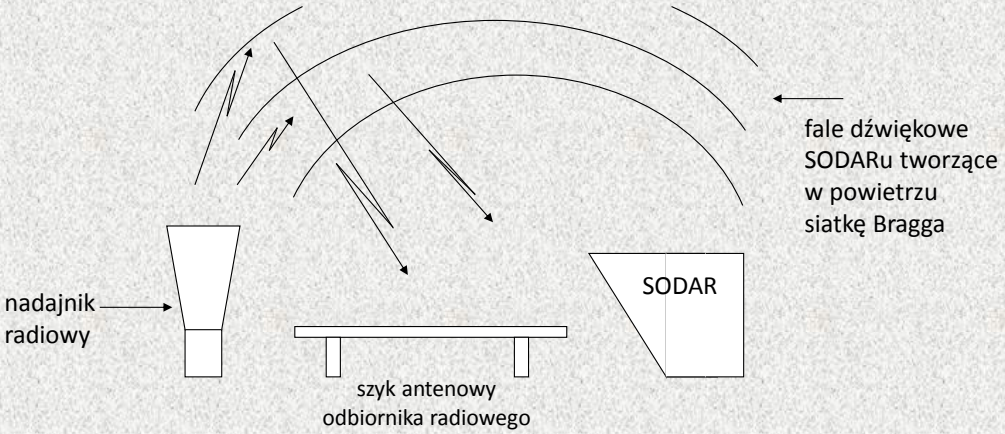
Przykładowe zobrazowania





Węzeł (ang.: *knot*), w skrócie w., *kn, kt* lub *kts* – jednostka prędkości wiatru równa jednej mili morskiej na godzinę - 1 w. = 1 Mm/h = 1852 m/h

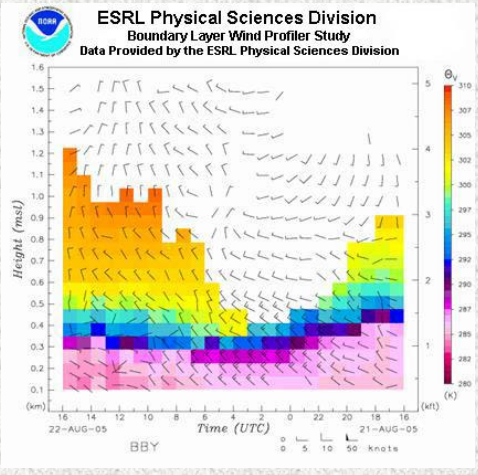
Radio Acoustic Sounding System (RASS)



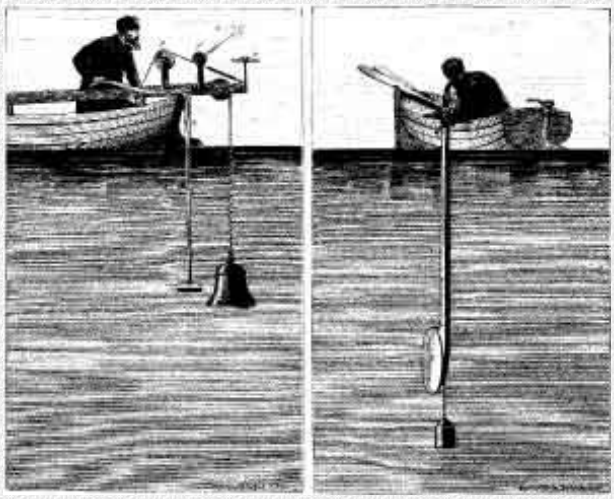
- długość fali akustycznej = ½ długości fali radiowej (warunek Bragga)
- RF = 915 MHz, λ_R ~ 30 cm, λ_A ~ 15 cm
- AF ~ 2 kHz (acoustic frequency)
- urządzenie mierzy profil prędkości fali dźwiękowej co pozwala wyznaczyć rozkład temperatur

$$T_v = (v_a/20{,}047)^2$$

OGRANICZENIA
- silny wiatr może zepchnąć falę dźwiękową z rejonu pomiaru (refrakcja wiatrowa)
- pomiar do wysokości rzędu 1 km
- nie można pracować podczas deszczu (zbyt duże tłumienie dźwięku)



Leonardo di ser Piero da Vinci
(1452 -1519)



Rys historyczny

1822- Daniel Colladen, fizyk szwajcarski, "podwodnym dzwonem" zbadał prędkość dźwięku w wodach jeziora Genewa. W czasach tych rozpoczęto również pierwsze próby określania map dna oceanu w oparciu o proste metody echa dźwiękowego

1877 - Lord Rayleigh opublikował w Anglii rozprawę naukową "Teoria dźwięku" w której opisał podstawy fizyczne rozchodzenia się fal dźwiękowych

1880 - Pierre i Jacques Curie odkryli *efekt piezoelektryczny* w kryształach kwarcu i tytanianu baru. Były to podwaliny do generowania i odbierania fal ultradźwiękowych o częstotliwościach z zakresu MHz

1914-1918 - początek rozwoju ultradźwiękowych urządzeń do nawigacji, pomiaru głębokości i odległości w wodzie - używanych przede wszystkim na łodziach podwodnych

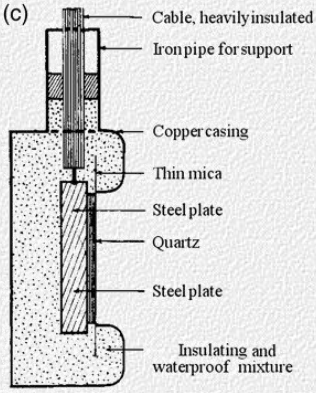
(a)

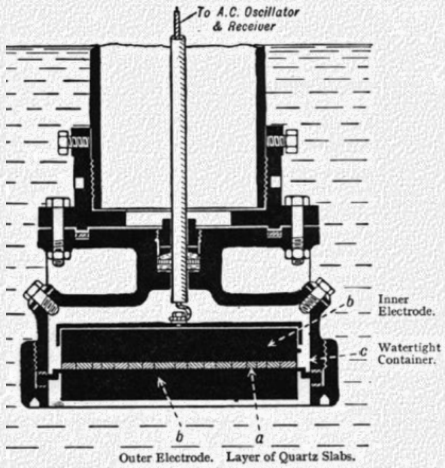
Paul Langevin
(1872–1946)

(b)

Robert W. Boyle
(1883–1955)

(c)

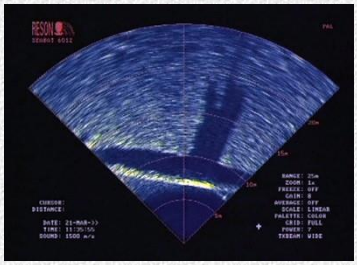


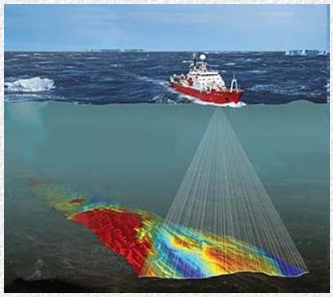


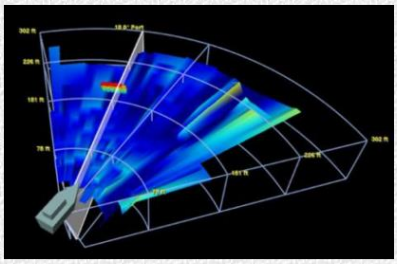
Urządzenia hydrolokacyjne

echosondy – pomiar odległości
echolokatory – namiar kierunku i prędkości obiektów

Zastosowania
- nawigacja
- detekcja
- hydrografia
- zoologia
- rybołówstwo
- inne



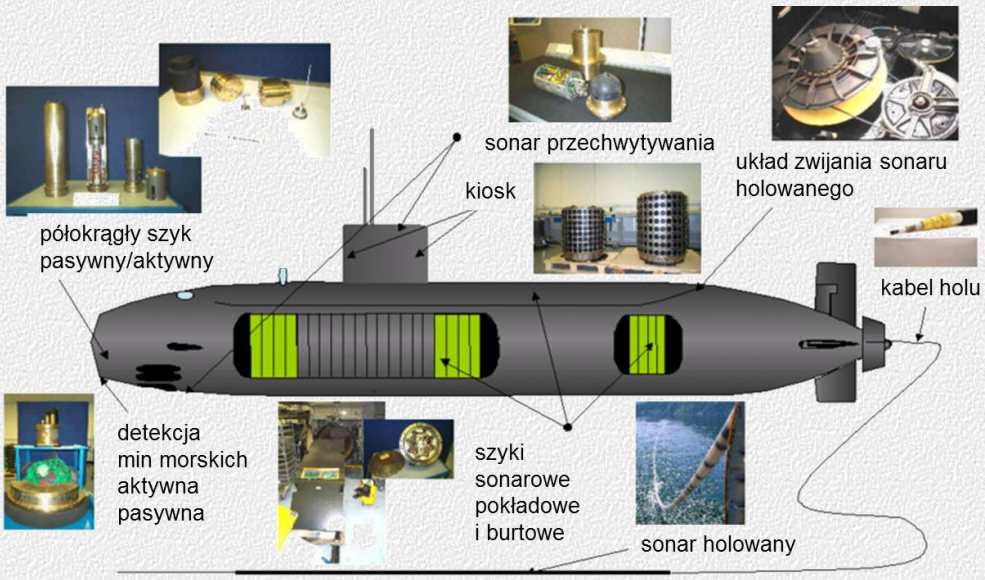




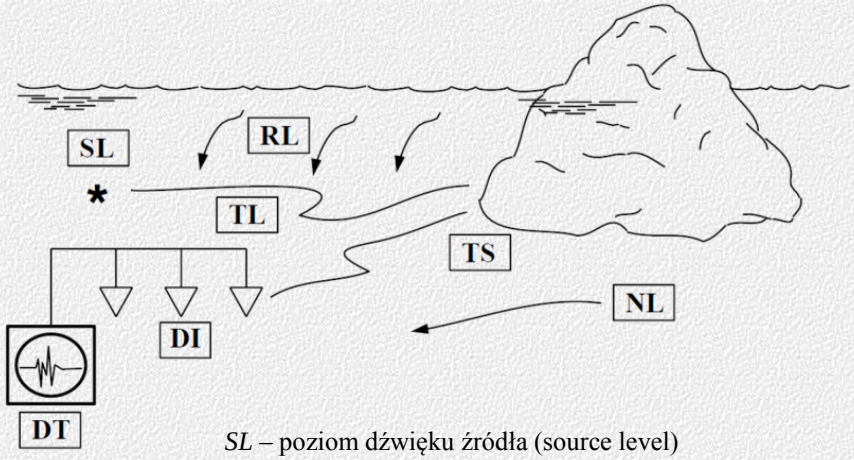
Podział aktywnych urządzeń hydrolokacyjnych ze względu na zastosowane w nich rozwiązania techniczne

- echosondy:
  - bezkierunkowe
  - jednowiązkowe
  - wielowiązkowe
- echolokatory (sonary):
  - jednowiązkowe
  - wielowiązkowe
    - czołowe (sektorowe)
    - okrężne
    - boczne
      - podkilowe
      - opuszczane
      - holowane
      - stacjonarne

Instalacje sonarowe okrętu podwodnego



Podstawowe parametry sonaru i środowiska wodnego



SL – poziom dźwięku źródła (source level)
TL – straty transmisyjne (transmission loss)
NL – poziom szumu tła (noise level)
DI – kierunkowość przetworników (directivity index)
RL – poziom pogłosu (reverberation level)
TS – uśredniony współczynnik odbicia celu (target strength)
DT – próg detekcji (detection threshold)

Definicje podstawowych parametrów sonaru aktywnego

Poziom echa EL - wyrażone w decybelach natężenie użytecznej fali płaskiej padającej prostopadle na powierzchnię przetwornika odbiorczego

Poziom zakłóceń NL - wyrażone w decybelach równoważne natężenie płaskiej fali zakłóceń padającej prostopadle na powierzchnię przetwornika odbiorczego, która daje na wyjściu odbiornika taki sam poziom sygnału, jaki obserwuje się na jego wyjściu odbierając rzeczywiste zakłócenia akustyczne i elektryczne występujące w systemie.

Próg detekcji DT - wyrażony w decybelach stosunek natężeń płaskiej fali użytecznej i płaskiej fali zakłóceń padających prostopadle na powierzchnię przetwornika odbiorczego, który zapewnia na wyjściu odbiornika spełnienie założonych kryteriów detekcji.

SL – poziom dźwięku źródła (source level)

$$SL = 10\log\frac{I}{I_0} = 10\log\frac{p^2}{p_0^2}$$ wyrażenie ogólne

$$I_0 = 0,67\cdot 10^{-18}\ [\mathrm{W/m^2}]$$

systemy bezkierunkowe

$$SL = 10\log\left(\frac{P/12,6}{0,67\cdot 10^{-18}}\right) = 10\log P + 10\log\left(1,1846\cdot 10^{-17}\right) \approx 10\log P + 171\ [\mathrm{dB}]$$

12,6 [m^2] - powierzchnia sfery o promieniu 1 m

systemy kierunkowe

$$SL = 171 + 10\log P + DI$$

DI – kierunkowość przetworników (directivity index)

$$DI = 10\log\frac{I_D}{I_I}$$

I_D - natężenie dźwięku w środku wiązki

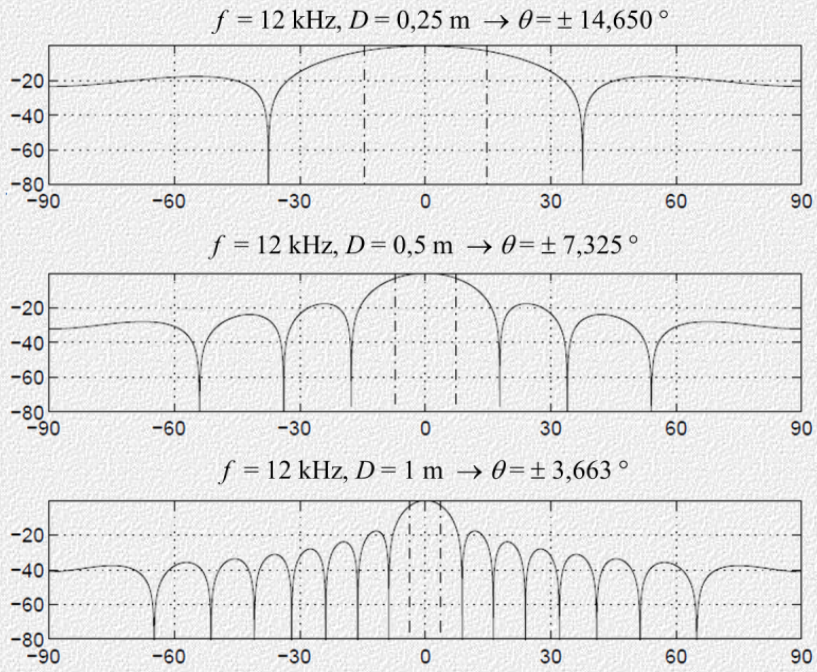
I_I - natężenie dźwięku źródła izotropowego o tej samej mocy mierzone w tym samum punkcie co I_D

dla szyku liniowego $DI = 10\log\frac{2L}{\lambda}$ $\theta_{3dB} = \pm\frac{25,3\lambda}{L}$ [°]

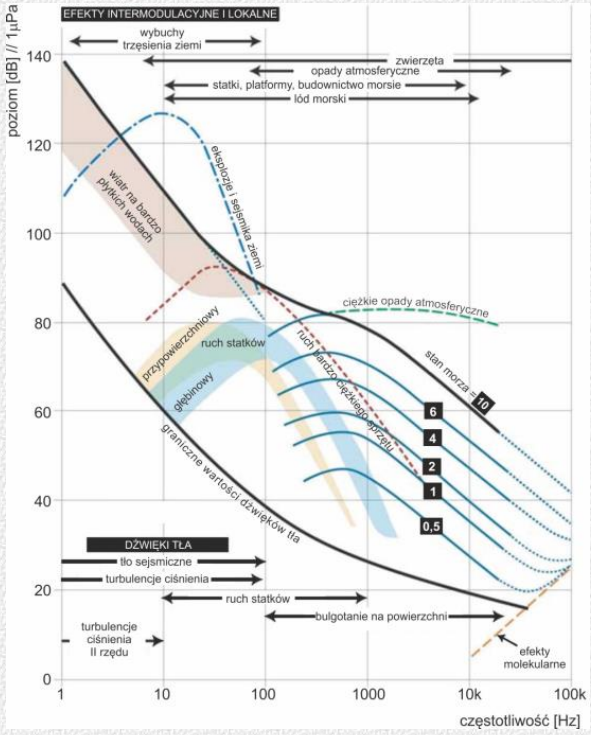
dla szyku kołowego $DI = 10\log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = 20\log\frac{\pi D}{\lambda}$ $\theta_{3dB} = \pm\frac{29,5\lambda}{D}$ [°]

dla szyku planarnego $DI = 10\log\frac{4\pi L_x L_y}{\lambda^2}$ $\theta_{3dB} = \pm\frac{25,3\lambda}{L_{x,y}}$ [°]

Przykłady charakterystyk szyków kołowych o różnych średnicach



NL – poziom szumu tła (noise level)
akustyka morza



Równania sonaru aktywnego

w warunkach ograniczonego szumu

$$SL - 2TL + TS - \left(NL - DI \right) = DT$$

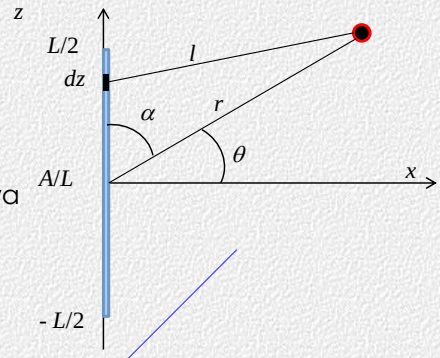
w warunkach ograniczonego pogłosu (zaniedbanie kierunkowości)

$$SL - 2TL + TS - RL = DT$$

Próg detekcji jest tu rozumiany jako granica słyszalności - poziom sygnału pozwalający stwierdzić istnienie obiektu

Pole akustyczne liniowego szyku przetworników

amplituda jednostkowa



$$l^2 = r^2 + z^2 - 2r \cdot z\cos\alpha \longrightarrow l = r\sqrt{1 - \frac{2z}{r}\sin\theta + \frac{z^2}{r^2}}$$

$$\sqrt{1+a} \approx 1 + \frac{a}{2} \longrightarrow l \approx r\left[1 + \frac{1}{2}\left(-\frac{2z}{r}\sin\theta + \frac{z^2}{r^2}\right)\right]$$

dla $z << r$ $\quad l \approx r - z\sin\theta$

Zmiana ciśnienia na pozycji (r, θ) wywołana przez element o długości dz ulokowany na pozycji z

$$dp = \frac{A}{L}\frac{1}{l}e^{-i(kl-\omega t)}dz \qquad p = \frac{A}{L}\int_{-L/2}^{L/2}\frac{1}{l}e^{-i(kl-\omega t)}dz$$

ale $l \approx r - z\sin\theta$ $\qquad p \approx \frac{A}{L}e^{-i(kr-\omega t)}\int_{-L/2}^{L/2}\frac{1}{r - z\sin\theta}e^{ikz\sin\theta}\,dz$

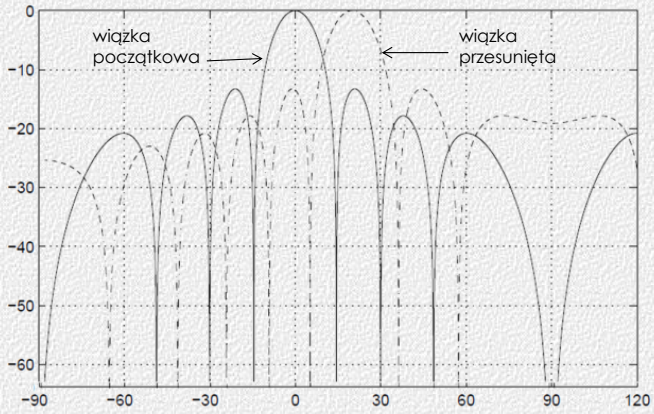
zakładając $z\sin\theta << r$ $\qquad \frac{1}{r - z\sin\theta} \approx \frac{1}{r}$

$$p \approx \frac{A}{rL}e^{-i(kr-\omega t)}\int_{-L/2}^{L/2}e^{ikz\sin\theta}\,dz \qquad p \approx \frac{A}{rL}e^{-i(kr-\omega t)}\left[\frac{e^{\frac{1}{2}ikL\sin\theta} - e^{-\frac{1}{2}ikL\sin\theta}}{ik\sin\theta}\right]$$

$$p \approx \frac{A}{rL}e^{-i(kr-\omega t)}\left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}kL\sin\theta\right)}{\frac{1}{2}kL\sin\theta}\right]$$

Dla szyku sterowanego $$dp = \frac{A}{Lr}\frac{1}{l}e^{-iz(k\sin\theta - k\sin\theta_0)}e^{i\omega t}dz$$

$$p = \frac{A}{r}e^{-i(kr-\omega t)}\left[\frac{\sin\left(\frac{kL}{2}\left[\sin\theta-\sin\theta_0\right]\right)}{\frac{kL}{2}\left[\sin\theta-\sin\theta_0\right]}\right]$$



Wyznaczanie poziomu echa

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{I_0}{I_r}\frac{I_r}{I_1} = \left(\frac{I_0}{I_r}\frac{I_r}{I_i}\right)\frac{I_i}{I_1} = \left(\frac{I_0}{I_r}\frac{I_r}{I_i}\frac{I_i}{I_t}\right)\frac{I_t}{I_1}$$

I_1 – natężenie w odległości 1m na osi promieniowania

Po obustronnym zlogarytmowaniu

$$10\log\frac{I_0}{I_1} = 10\log\frac{I_0}{I_r} + 10\log\frac{I_r}{I_i} + 10\log\frac{I_i}{I_t} + 10\log\frac{I_t}{I_1}$$

$TL = 10\log\frac{I_r}{I_0}$ jednostronne straty transmisyjne $TL = 10\log\frac{I_t}{I_i}$

$TS = 10\log\frac{I_r}{I_i}$ Siła celu $SL = 10\log\frac{I_t}{I_1}$ Poziom źródła

$$EL = -TL + TS - TL + SL$$

$$EL = SL - 2TL + TS$$

Poziom źródła SL - wyrażona w decybelach, znormalizowana wartość natężenia fali akustycznej w odległości jednego metra od powierzchni promieniującej przetwornika na jego osi akustycznej.

$$SL = 10 log \frac{I_t}{I_1}$$

Jednostronne straty transmisyjne TL - wyrażony w decybelach stosunek natężenia fali promieniowanej przez przetwornik nadawczy, występującego na jego osi akustycznej w odległości jednego metra od powierzchni przetwornika, do natężenia fali płaskiej padającej prostopadle na powierzchnię przetwornika odbiorczego nazywamy

$$TL = 10 log \frac{I_t}{I_0}$$

Siła celu - wyrażony w decybelach iloraz natężenia fali odbitej od celu w kierunku odbiornika w odległości 1 m od jego środka i natężenia płaskiej fali akustycznej padającej na cel z kierunku nadajnika

$$TS = 10 log \frac{I_r}{I_i}$$

Równoważna definicja stosowana w radiolokacji

$$TS = 10 \log \frac{\sigma}{4\pi r_1^2}$$ σ - skuteczna powierzchnia odbicia

Związek pomiędzy oboma definicjami

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_i} = 10 \log \frac{P_r}{4\pi r_1^2} \frac{\sigma}{P_i}$$

Zakładamy się, że zgodnie z prawem zachowania mocy, skuteczna powierzchnia odbicia to takie pole powierzchni że moce padająca i odbita są równe

$$P_r = P_i$$

Obliczanie parametrów równania zasięgu

Poziom źródła nadajnika systemu hydrolokacyjnego

$$SL = 171 + 10\log P_t / P_1 + 10\log\eta + DI_t \qquad \text{[dB]}$$

P_t - moc elektryczna nadajnika, P_1=1W

η - sprawność przetwornika

DI_t – indeks kierunkowości przetwornika (szyku) nadawczego

Przykład

P_t=1 kW, η = 0,5 a = b = 10 λ $\qquad DI_t = \frac{4\pi ab}{\lambda^2} = 4\pi 100 = 400\pi$

DI_t=10log(400π)=31 dB

$SL=171+30-3+31=229$ dB

Straty transmisji *TL*

Straty transmisji zależą od sposobu rozchodzenia się fali:

• fala płaska	$TL=0+\alpha R$	[dB]
• fala cylindryczna	$TL=10\log R/R_1+\alpha R$	
• fala sferyczna	$TL=20\log R/R_1+\alpha R$	

R – odległość celu od przetwornika, R_1=1m
α - współczynnik tłumienia absorpcyjnego [dB/m]

Przykład: R = 1 km, α = 0,01 dB/m, rozprzestrzenianie sferyczne

$TL = 20\log 1000 + 0{,}01 \cdot 1000 = 60 + 10 = 70$ dB

Siła celu

Siła celu zależy od wielkości obiektu, jego kształtu, materiału, usytuowania względem kierunku padania fali, własności rozpraszających itp.

Przykładowe wielkości siły celu w hydrolokacji:

dla ryb $TS = 19{,}1 \log L[\text{cm}] - 0{,}9 \log f[\text{kHz}] - 62$

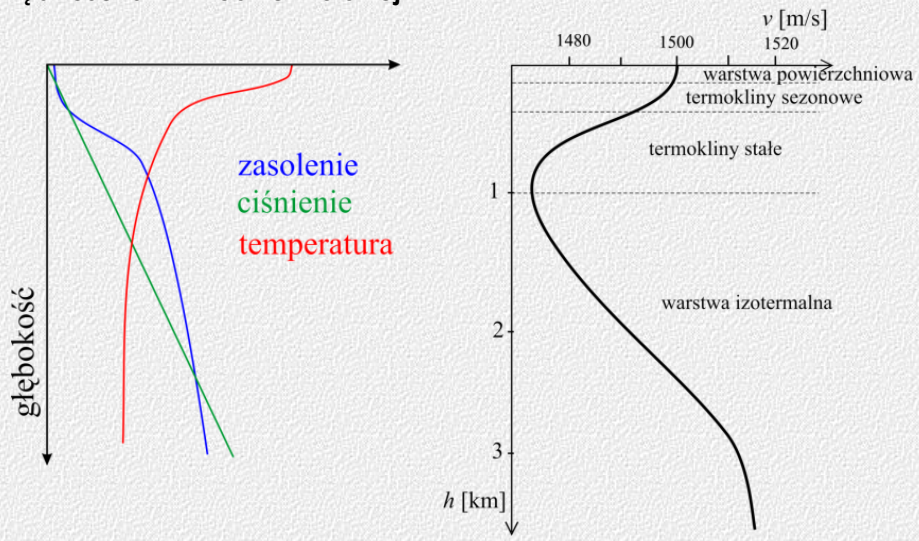
dla śledzia L = 30 cm, f = 30 kHz, TS = – 35,1 dB

Okręty podwodne	TS = – 10 do – 45 dB
Okręty nawodne	TS = – 15 do –25 dB
Miny	TS = – 10 do – 15 dB
Torpedy (od dziobu)	TS = – 20 dB

Kula doskonale odbijająca

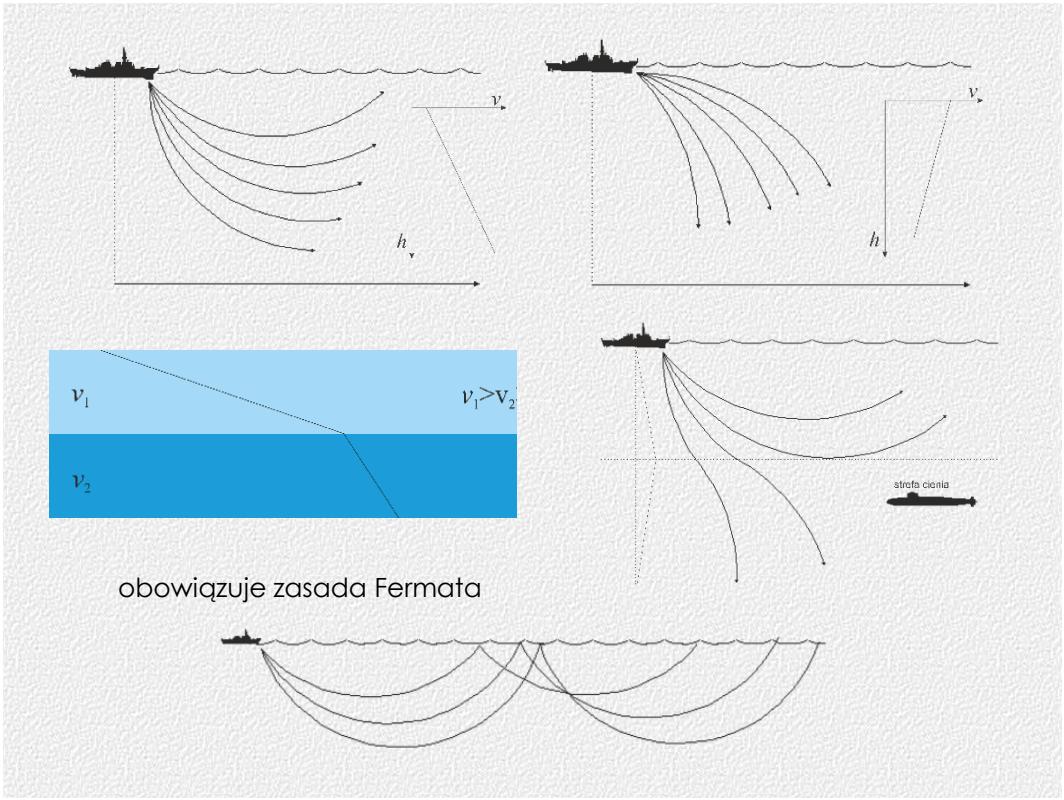
$$TS = 10 \log \left[\frac{R[\text{cm}]}{2} \right]$$

Prędkość fali w wodzie morskiej

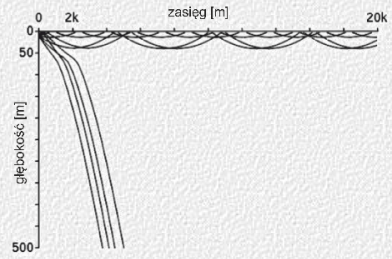


$$v(T, D, S) = 1449{,}2 + 4{,}6T + 0{,}055T^2 + 1{,}39(S - 35) + 0{,}016D$$

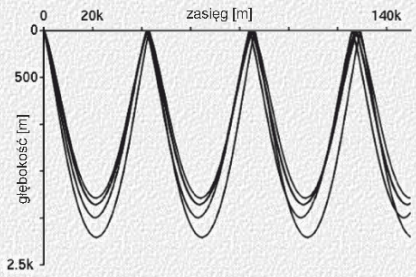
$v[m/s]$ $T[°C]$ $S[‰]$ $D[m]$



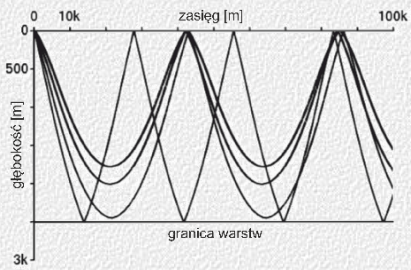
woda płytka



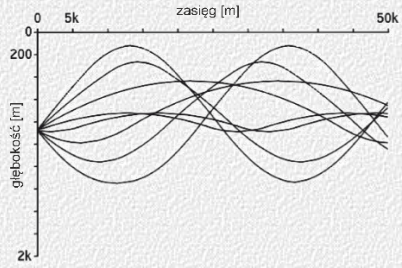
woda głęboka



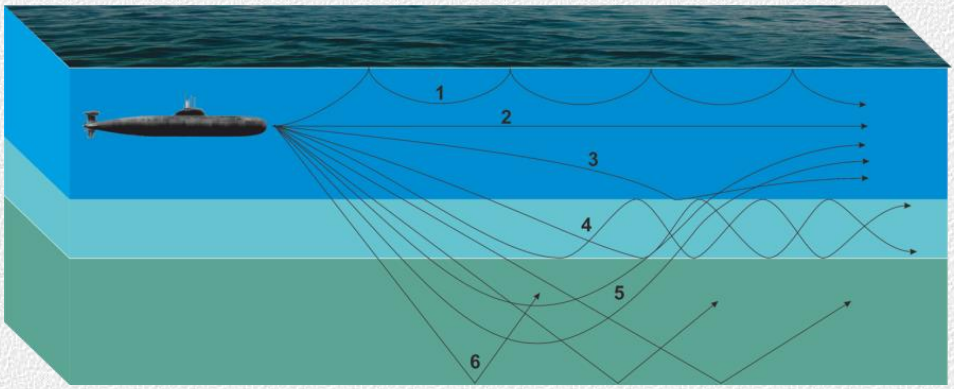
odbicie od dna



SOFAR (sound fixing and ranging)



Wielodrogowość propagacji



1 - wielokrotne odbicie wewnętrzne
2 – trakt bezpośredni (izoprędkościowy)
3 - odbicie od granicy izotermalnej
4 - kanał ujemnego gradientu
5 - strefa konwergencji
6 - odbicie od dna

prędkość dźwięku w wodzie ustalona została empirycznie

empiryczne równanie Wooda

$$v = 1445,5 + 4,62T - 0,0452T^2 + (1,32 - 0,007T)(S - 35)$$

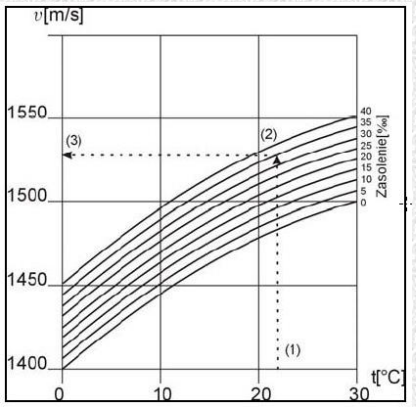
gdzie:

v – prędkość dźwięku w wodzie [m/s],
T – temperatura wody [°C],
S – zasolenie [‰].

Zależność długości fali w wodzie od częstotliwości

Optymalna częstotliwość sondowania (ustalona empirycznie)

$$f_{OPT} = \frac{40}{h_{\max}^{2/3}}$$



Tłumienie fali w wodzie = spadek natężenia fali

$$I = \frac{f}{r^2} e^{-\beta r}$$

r – odległość między nadajnikiem
a odbiornikiem lub podwojona odległość do celu

β – wsp. tłumienia – z formuły Naviera-Stokesa:

$$\beta = \frac{4\mu\omega^2}{3\rho v^3}$$

μ – współczynnik lepkości wody
ρ – gęstość wody
v – prędkość dźwięku w wodzie
ω – pulsacja

Empiryczna wartość wsp. tłumienia

$$\beta = \frac{43 f^2}{4450 + f^2} + 296 \cdot 10^{-6} f^2 \qquad \begin{matrix} f \text{ [Hz]} \\ \beta \text{ [dB/km]} \end{matrix}$$

4 mechanizmy tłumienia

lepkość ścinania ($\tau = 10^{-12}$ s)

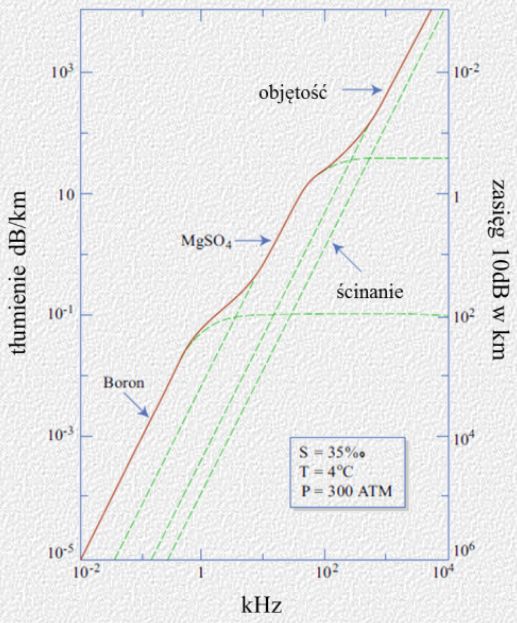
lepkość objętościowa ($\tau = 10^{-12}$ s)

lepkość objętościowa ze względu na

- zawartość $MgSO_4$
  1,35 ppt ($\tau = 10^{-6}$ s)
- zawartość boraksu H_3BO_3
  4,6 ppm ($\tau = 10^{-4}$ s)

jeśli $\omega\tau << 1$ – występują małe straty

jeśli $\omega\tau \approx 1$ lub wyższy straty są duże

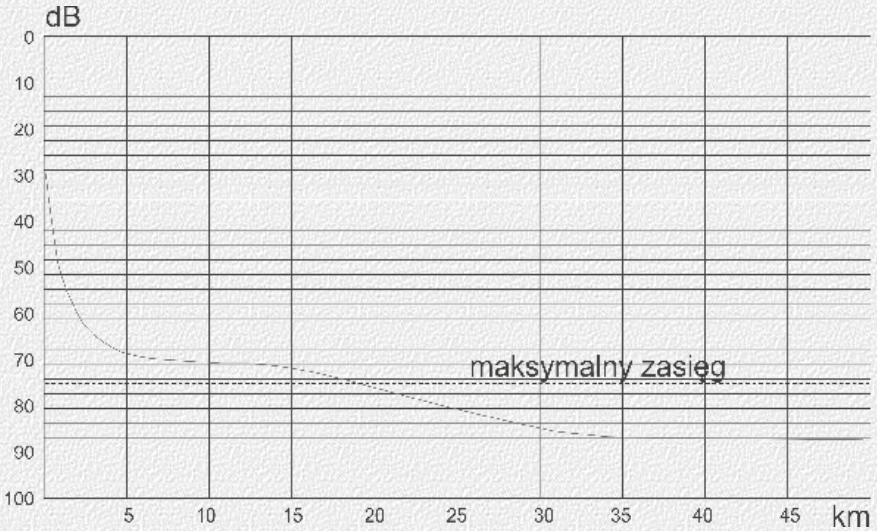


Maksymalny zasięg echosondy

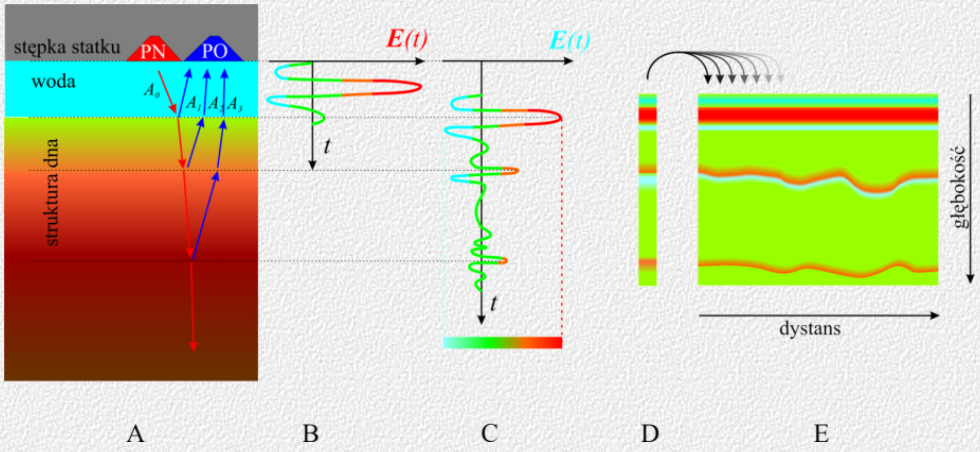
$$h_{\max} = \sqrt{\frac{\Gamma P S}{4\Omega J}}$$

Γ – wsp. odbicia
S – apertura przetwornika odbiorczego [m^2]
Ω – kątowa szerokość wiązki wypromieniowanej [srad]
J – czułość odbiornika
P – moc wypromieniowana

materiał	energia odbita [%]	współczynnik odbicia
powietrze (styk powietrza z wodą)	99,9	0,99997
nikiel	89,0	0,9
stal	85,0	0,8-0,9
granit	65,0	0,6-0,8
guma	55,0	0,5-0,8
kamień	55,0	0,5-0,7
drewno	21,0	0,20-0,5
piasek	13,0	0,005-0,5
lód	13,0	0,1-0,2
ił	10,0	0,0017



Zjawisko wielokrotnego echa



Błąd nachylenia dna

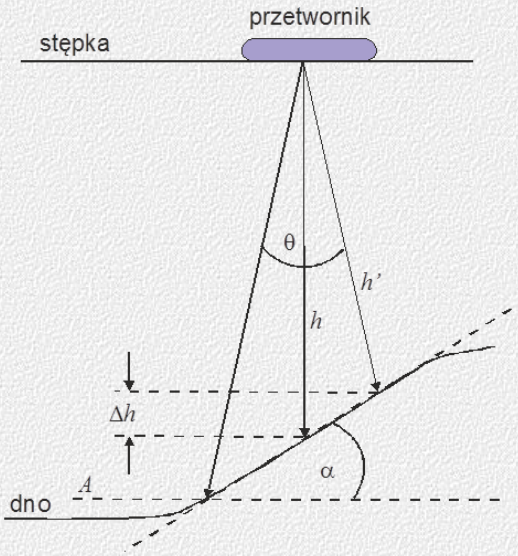
$$\Delta h = h - h'$$

h – głębokość rzeczywista
h' – głębokość zarejestrowana

$$h = \frac{h'}{\cos\alpha}$$

poprawka głębokości

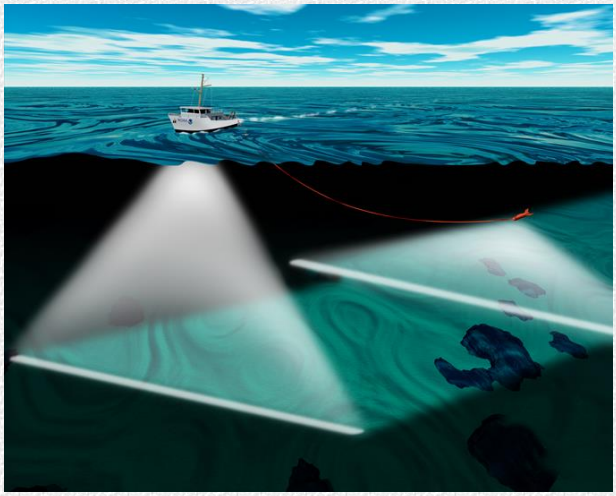
$$\Delta h = h'(\sec\alpha - 1)$$

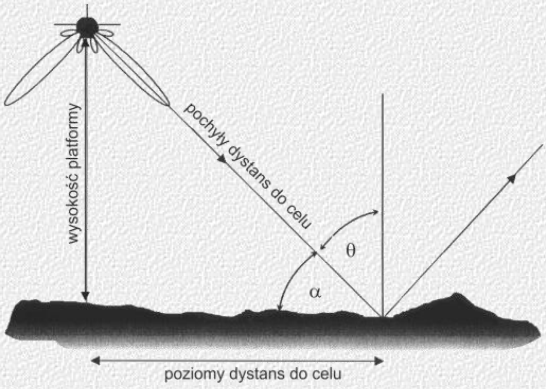


dla $\alpha \leq 8^o$ oraz $\theta \leq 30^o$
błąd nachylenia nie ma znaczącego wpływy na wynik pomiaru

Sonary obserwacji bocznej

sonary tego typu służą przede wszystkim do obrazowania dna





W typowym sonarze tego typu wiązka w płaszczyźnie horyzontalnej jest wąska, zaś w wertykalnej szeroka. W systemie100 kHz może to być odpowiednio 1° i 40° , zaś w systemie 500 kHz 0.2° i 40°.
Główna oś wiązki jest zwykle nachylona względem dna w granicach 10 - 20°.
Typowe długości impulsów dla 100 kHz wynoszą 0,1 ms, dla 500 kHz 0,02 ms.

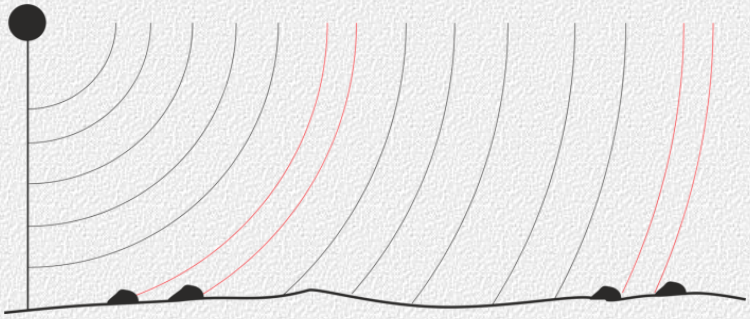
Krótsze impulsy zapewniają lepszą rozdzielczość, dłuższe lepszą odporność na zakłócenia.

Rozdzielczość odległościowa systemu wyraża się za pomocą praktycznego związku

$$\delta y = \frac{v \cdot T}{2 \cdot \sin\theta}$$

T – długość impulsu

Rozdzielczość odległościowa może wzrastać wraz z odległością

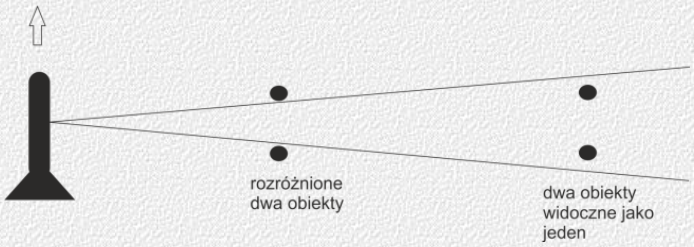


Dla kąta $\theta \to 0$

$$\delta y = \sqrt{h \cdot v \cdot T}$$

h – wysokość platformy (odległość do dna)

Rozdzielczość pozioma systemu zależy od szerokości wiązki



$$\delta x = r \cdot \sin\beta$$

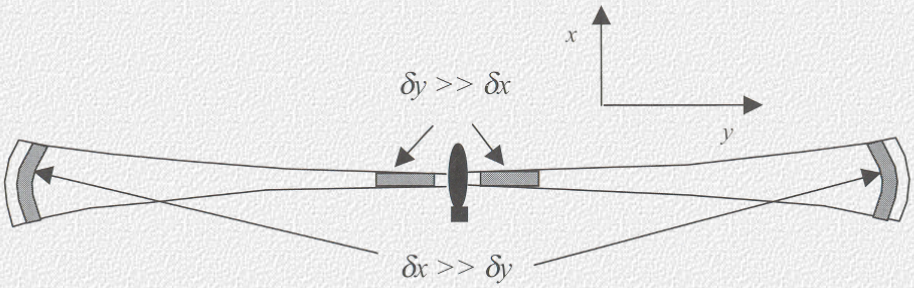
r – odległość do celu

β – 3 dB szerokość wiązki

Zarówno podłużna jak i poprzeczna rozdzielczość takiego systemu jest niejednorodna i zależy od insonowanego obszaru.

na niewielkich odległościach $\delta y >> \delta x$

na dużych odległościach $\delta y << \delta x$



Uproszczony schemat blokowy sonaru

panele kontroli i zobrazowania

przetworniki N/O
sterowniki WN
zespół przesuwników i korektorów fazy
przełącznik N/O
wzmacniacze

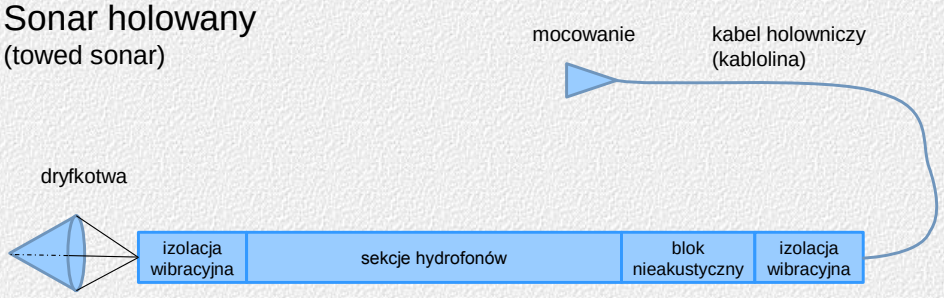
ADC

DSP

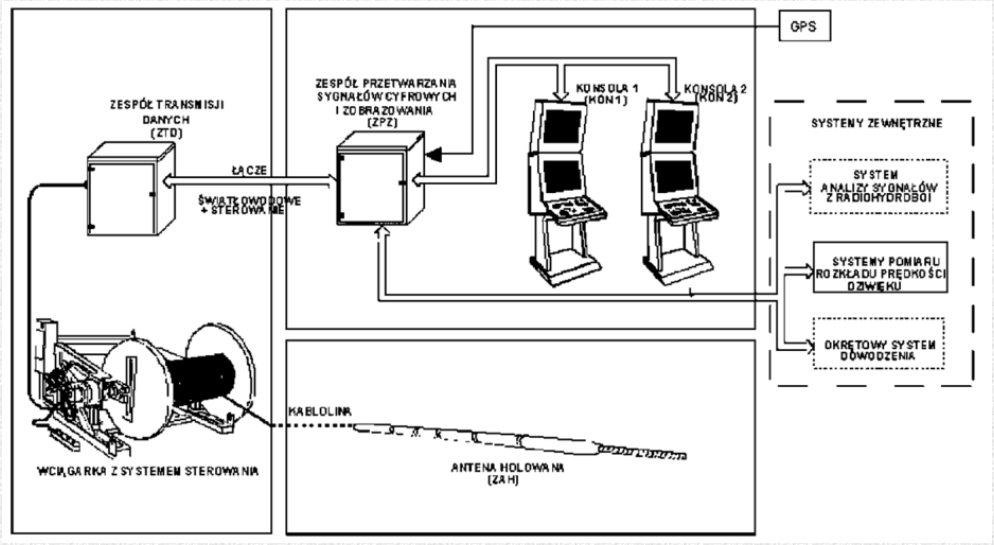
generator sygnału DDS

blok sterowania i synchronizacji

Sonar holowany
(towed sonar)



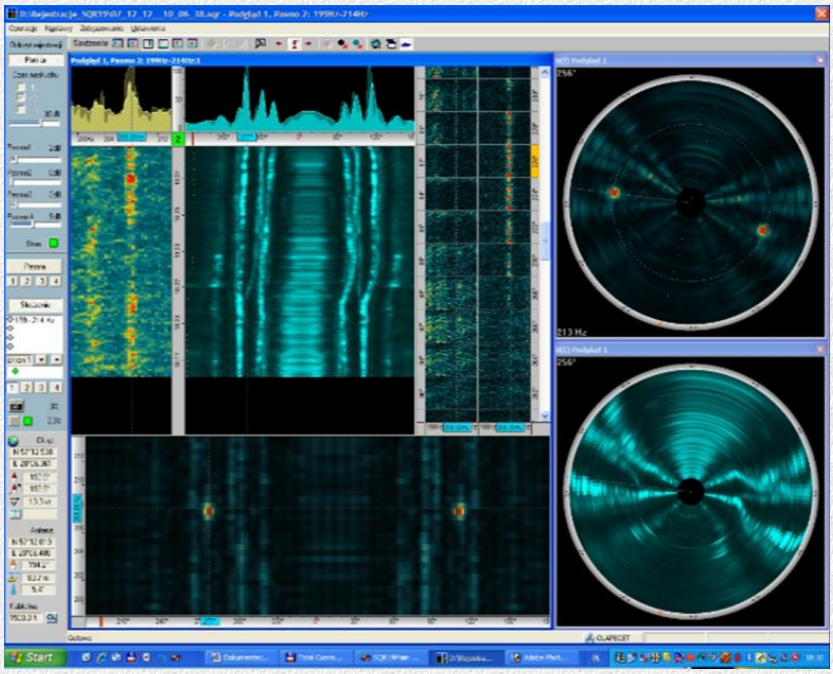
STACJA HYDROLOKACYJNA SQR-19 PG



Konsola sonaru SQR-19 z anteną holowaną

sonar na hali produkcyjnej

Przykład zobrazowania



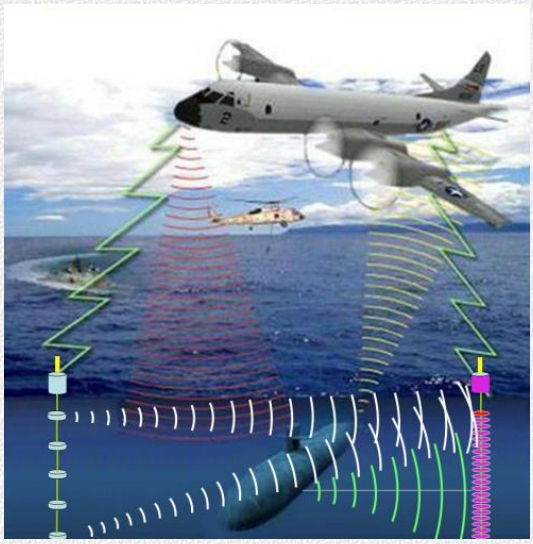
Podstawowe parametry SQR-19

zasilanie 115 V 60 Hz
max. pobór mocy 3,5 kW
temp. pracy od -2 do + 35 °C
max. prędkość przy wydawaniu 25 w
max. prędkość przy wybieraniu 15 w
max stan morza przy pomiarach 4 (awaryjnie 6)
max. głębokość operacyjna 610 m (awaryjnie 1830 m)
Zakresy częstotliwości
pasmo A – 700 – 1400 Hz (efektywna długość 24,4 m)
pasmo B – 350 – 700 Hz (efektywna długość 48,8 m)
pasmo C – 175 – 350 Hz (efektywna długość 97,5 m)
pasmo D – 10 – 175 Hz (efektywna długość 195 m)

liczba formowanych wiązek 91
liczba przetwarzanych kanałów 120
sektor obserwacji 360°
max. dokładność namiaru 2°
rozdzielczość doplerowska od 4 Hz w paśmie A do 0,25 Hz w D
częstotliwość próbkowania 4096 Hz
pasmo transmisji sygnałów 6 MHz
max liczba śledzonych obiektów 16

Boje sonarowe (radio - hydroakustyczne)

Są to pływające swobodnie pasywne bądź aktywne urządzenia sonarowe wyposażone w łącze kablowe bądź radiowe



Przykład konstrukcji

część nawodna

część podwodna

zespół anten radiowych

układy radiowe

układy elektroniczne, sterowania sonaru, GPS, przetwarzania sygnałów

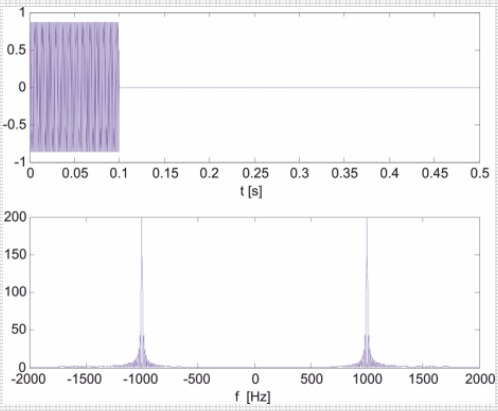
bateria akumulatorów

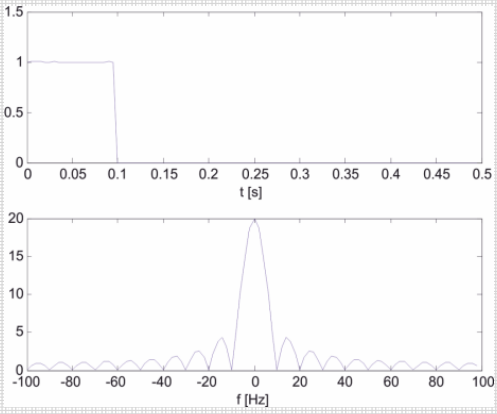
przetworniki sonarowe

SYGNAŁY SONOLOKACYJNE

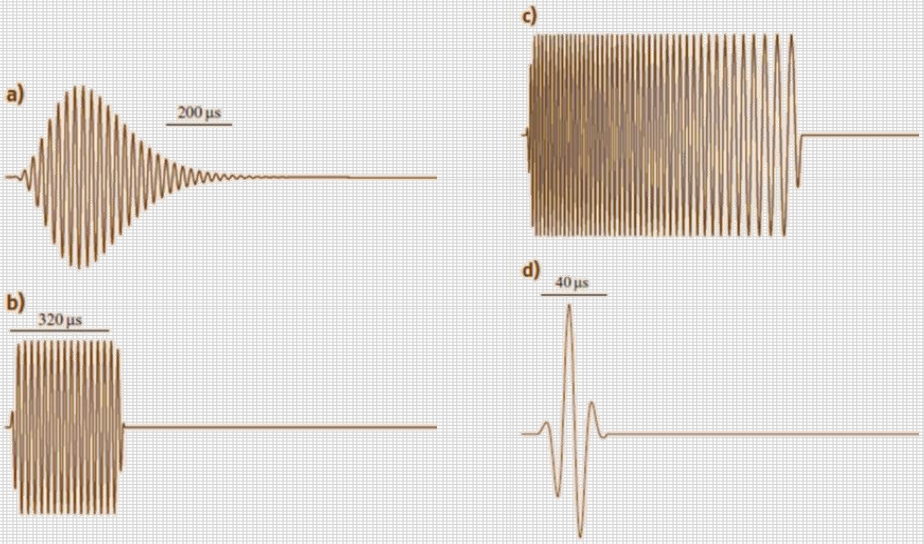
Impulsy proste

Porównanie widm dwóch sygnałów o czasie trwania 0,1 s

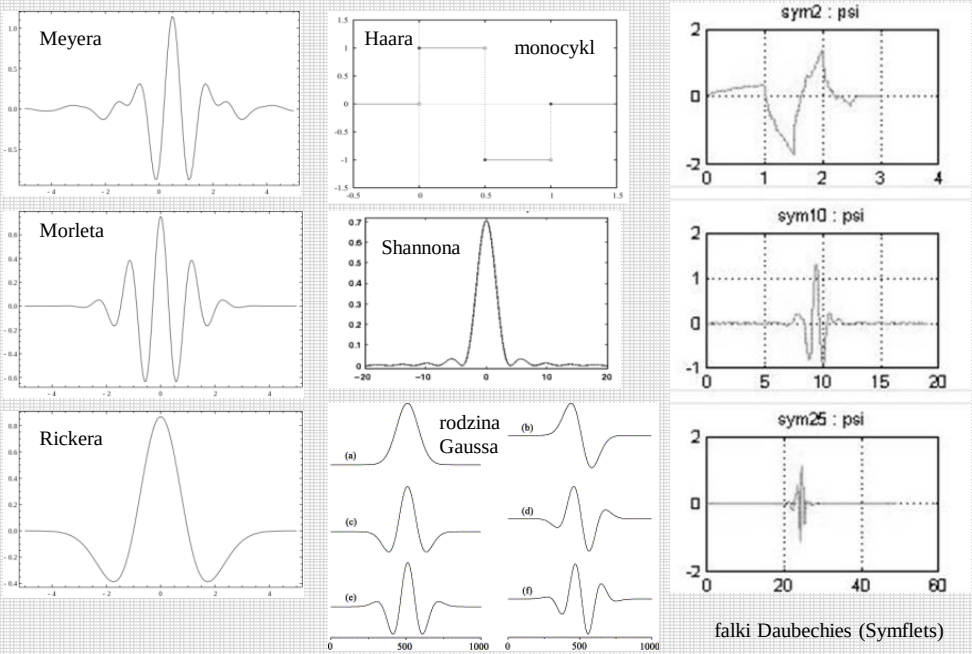




Impulsy proste

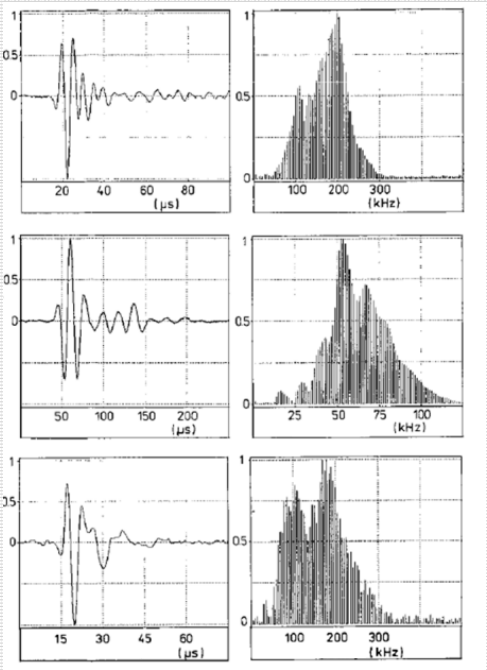


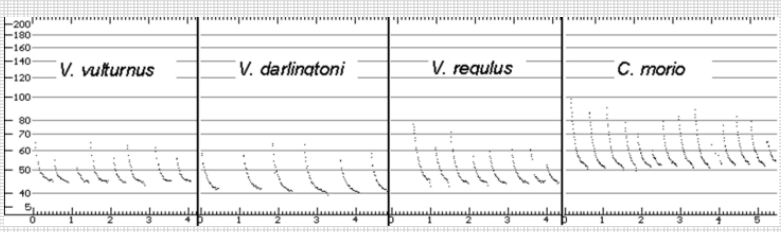
Falki



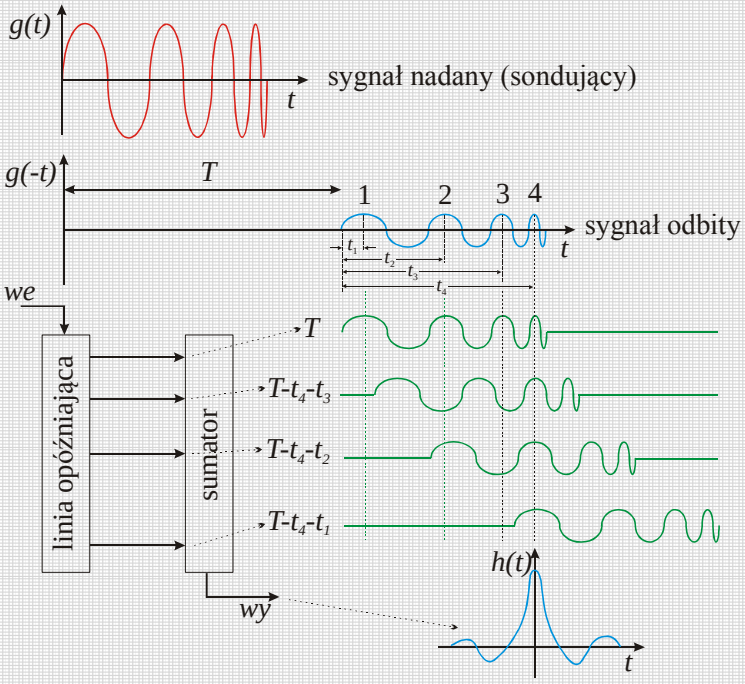
falki Daubechies (Symflets)

Porównanie widm przykładowych falek

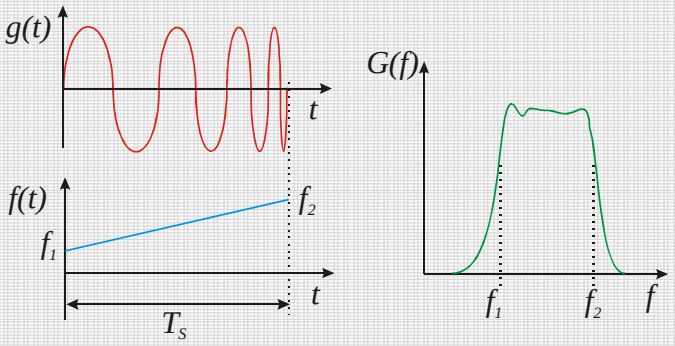




Impulsy złożone



Sygnał „chirp” i jego widmo



minimalny czas rozróżnialny (relacja nieostrości) $\Delta t \geq \frac{1}{\Delta f}$

maksymalna liczba rozróżnialnych odcinków czasowych $N = \frac{T_S}{\Delta t} = T_S \Delta f$

wartość średnia szumów na wyjściu $N\sigma_n^2 = N\,2\int_0^\infty S_n(f)\,df$

gęstość widmowa szumu

wartość skuteczna (odchylenie standardowe) szumu na wyjściu

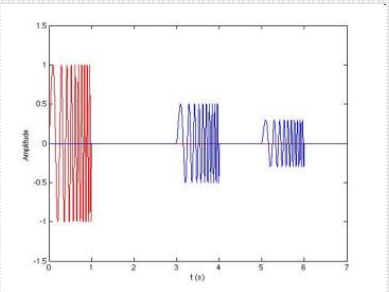
wartość kwadratu sygnału szczytowego (po kompresji) $(Ns)^2$

Stosunek mocy sygnału do szumu na wyjściu wyniesie więc

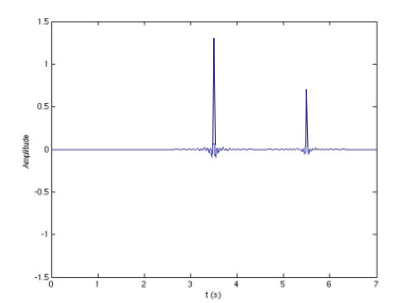
$$SNR_{WY} = \frac{(Ns)^2}{N\sigma_n^2} = \frac{Ns^2}{\sigma_n^2}$$

zaś na wejściu wynosił tylko $SNR_{WE} = \frac{s^2}{\sigma_n^2}$

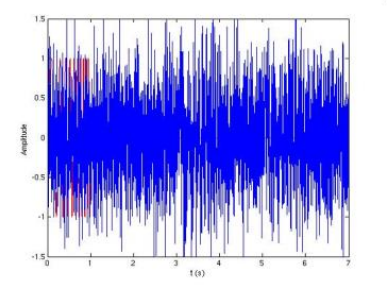
SNR polepszył się zatem *N* razy czyli $N = \frac{T_S}{\Delta t} = T_S \Delta f$



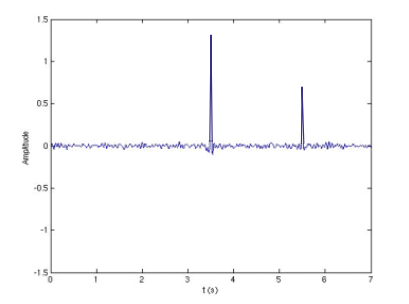
Przed filtracją – sygnał bez szumów



Po filtracji

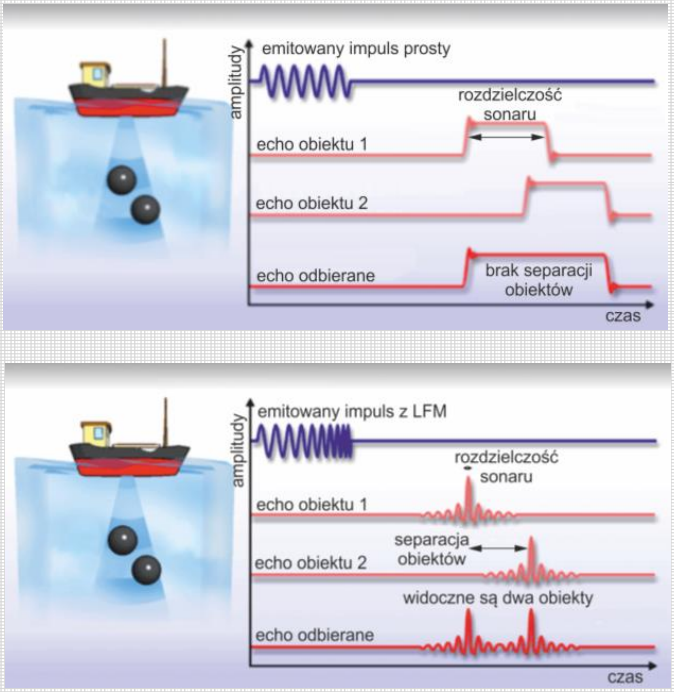


Przed filtracją – sygnał zaszumiony



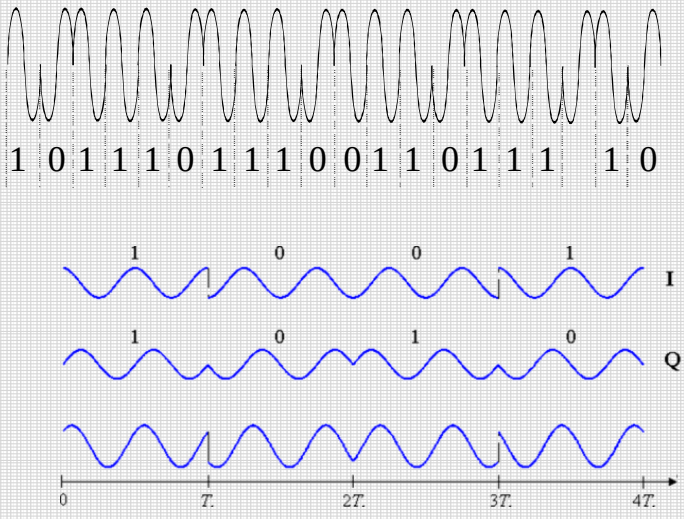
Po filtracji

Sygnały złożone poprawiają także rozdzielczość sonarów



Sygnały z manipulacją fazy

Kod PSK o długości 6 cykli z sekwencją 1001



Najbardziej znane są kody Barkera

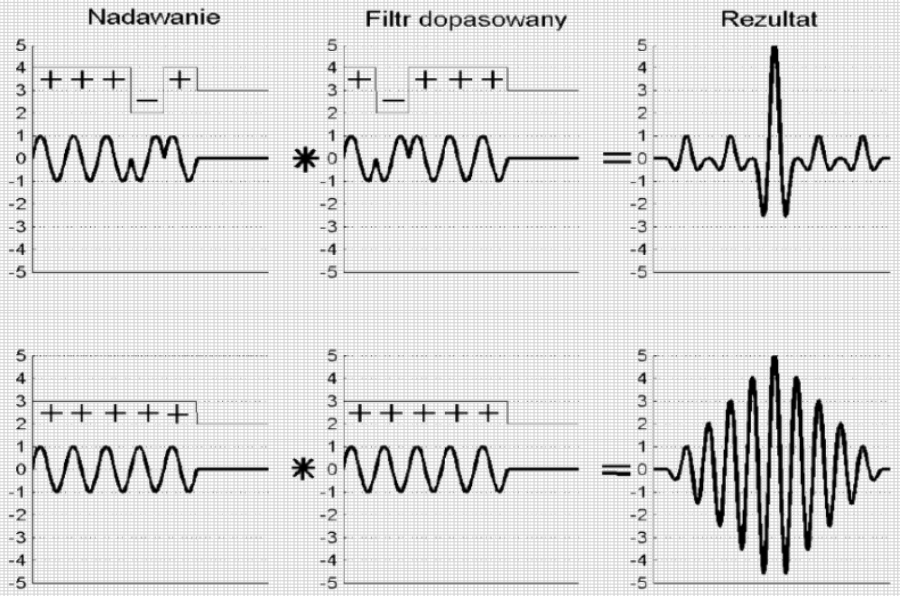
długość ciągu	elementy ciągu	PSL [dB]	ISL [dB]
2	10,11	-6,0	-3,0
3	110, 101	-9,5	-6,5
4	1101, 1110	-12,0	-6,0
5	11101	-14,0	-8,0
7	1110010	-16,9	-9,1
11	11100010010	-20,8	-10,8
13	1111100110101	-22,3	-11,5

szczytowy poziom listków bocznych

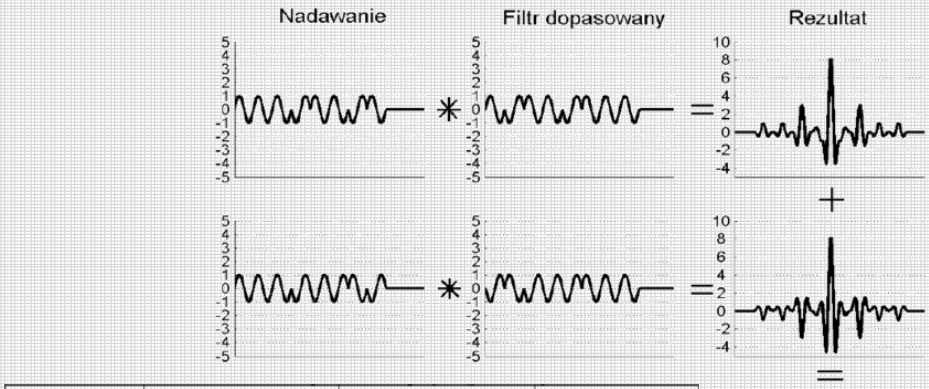
$$PSL = 10\log\frac{\text{maks. moc listków bocznych}}{\text{moc szczytowa sygnału}}$$

integrowany poziom listków bocznych

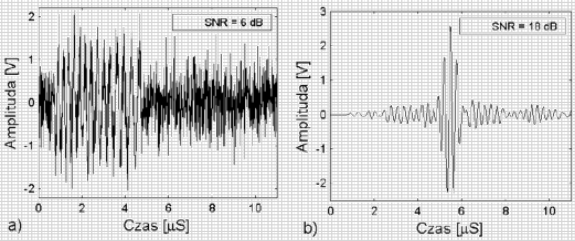
$$ISL = 10\log\frac{\text{cakowita moc listków bocznych}}{\text{moc szczytowa sygnału}}$$



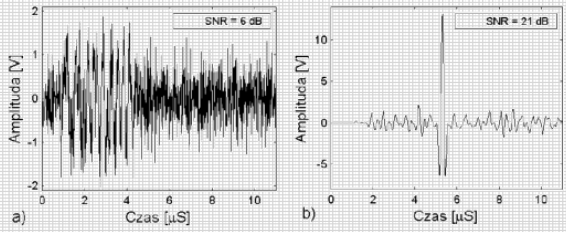
Kody komplementarne Golaya



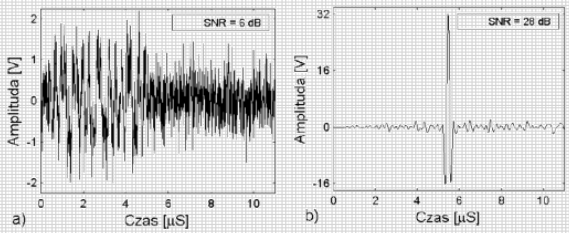
Długość ciągu	X (X*)	Y (Y*)	Amplituda listka głównego
2	+ + (+ +)	+ – (– +)	4
4	+ + – + (+ – + +)	+ + + – (– + + +)	8
8	+ + + – + + – + (+ – + + – + + +)	+ + + – – – + – (– + – – – + + +)	16
10	+ + + + – + + – – + (+ – – + + – + + + +)	+ + – – – – + – + – (– + – + – – – + +)	20



echo z szumem gaussowskim sygnał sondujący typu chirp 4 µs



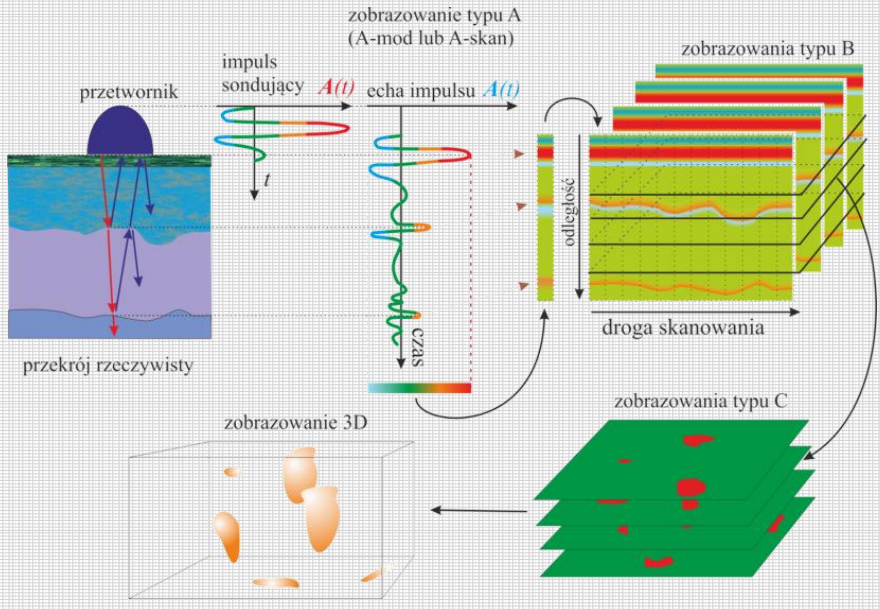
echo z szumem gaussowskim sygnał sondujący 13-bitowy kod Barkera



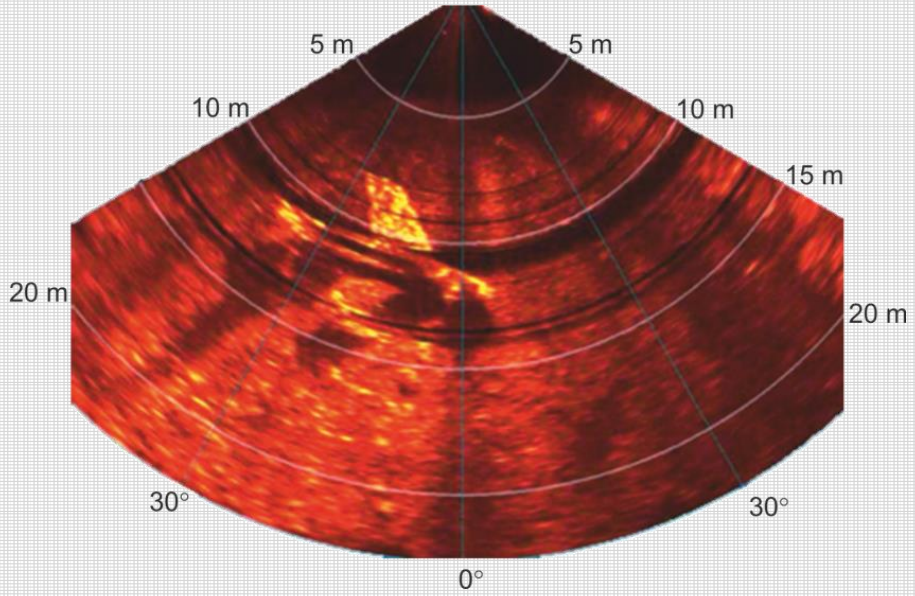
echo z szumem gaussowskim sygnał sondujący 16-bitowy kod Golaya

Obrazowanie akustyczne
acoustical imaging

Zasada tworzenia zobrazowań liniowych



Jeśli sonar zmienia kąt patrzenia powstają zobrazowania sektorowe



Zasadnicze cele przetwarzania sygnałów i danych

- poprawa stosunku sygnału użytecznego do szumu
- eliminacja zakłóceń
- poprawa rozdzielczości

Jeśli pojedynczy skan daje się przedstawić w postaci sumy

$$x(t) = s(t) + z(t) + n(t)$$

sygnał użyteczny — zakłócenia — szumy

to podstawowym zadaniem algorytmów przetwarzania jest eliminacja dwóch ostatnich składników powyższego wyrażenia (niestety możliwa tylko do pewnego stopnia)

Niepożądane składniki można częściowo wyeliminować poprzez wykonanie pewnych operacji na każdym ze skanów z osobna bądź też na ich grupie.

Do najprostszych należą operacje na pojedynczym skanie takie jak:
- odpowiednie wzmacnianie (zmienne w czasie),
- uśrednianie
- filtracja

Z uwagi na powyższe, algorytmy przetwarzania sygnałów dzieli się na trzy grupy:
- algorytmy dla pojedynczego skanu
- algorytmy dla grupy skanów
- algorytmy zaawansowane

Algorytm wzmacniania można zapisać w postaci iloczynu sygnału wyjściowego $x(t)$ oraz charakterystyki wzmocnienia $h(t)$:

$$y(t) = x(t)h(t)$$

Dla liniowej charakterystyki wzmocnienia:

$$h(t) = A(t - t_0) + B$$

Dla wykładniczej charakterystyki wzmocnienia:

$$h(t) = Ae^{B(t-t_0)}$$

gdzie A i B są współczynnikami charakterystyk, zaś t_0 chwilą załączenia okna czasowego (chwilą rozpoczęcia procesu wzmacniania)

Charakterystyki te można łączyć dla uwypuklenia wybranych ech

Obok wzmacniania wg określonych charakterystyk możliwe jest też zastosowanie algorytmu wzmacniania automatycznego (AGC - ang. automatic gain control, znany również pod nazwą chwilowej automatycznej regulacji wzmocnienia IAGC ang. instantaneous AGC).
Schemat procedury jest następujący:

- automatyczne normowanie amplitudy w zadanym oknie czasowym
- obliczenie w tym oknie średniej wartości amplitudy
- pomnożenie wyniku przez odpowiednio dobrany współczynnik skali
- przypisanie uzyskanej wartości do określonej próbki
- przesunięcie okna czasowego na kolejną próbkę
- powtórzenie operacji na kolejnej próbce

W rezultacie próbki o wysokich amplitudach są odpowiednio osłabiane, natomiast próbki o małych amplitudach wzmacniane.
Niekorzystnym efektem tego algorytmu jest nadmierne wzmacnianie szumu losowego w końcowej części skanu.

Stosuje się także wzmacnianie stałe w czasie nazywane skalowaniem skanu.
Jednym z jego wariantów jest stałe wzmocnienie w wybranych oknach czasowych.
Ich wyboru można dokonać dopiero po wstępnej analizie otrzymanego echogramu.

Spośród algorytmów uśredniania najprostszym przykładem jest obliczanie średniej ruchomej tj. średniej arytmetycznej w oknie o zadanej długości, a następnie przypisanie tej wartości do środka okna.
Okno przesuwa się następnie do kolejnej próbki i całą operację powtarza.
Średnia ruchoma z 2N+1 próbek zdefiniowana jest następująco:

$$f(t, x_i) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^{N} a_n f(t, x_{i+n})$$

gdzie N jest liczbą próbek, zaś a_n współczynnikami wagowymi. Proces ten zasadniczo odpowiada filtracji dolnoprzepustowej.

Pewną odmianą tego algorytmu jest odejmowanie średniej ruchomej (*ang. dewow*).
Procedura ta polega na obliczeniu średniej arytmetycznej z zadanej liczby próbek a następnie odjęciu obliczonej średniej od wartości środkowej okna.
Podobnie jak poprzednio okno przesuwa się o jedną próbkę i operację powtarza od początku.
Procedura ta umożliwia usunięcie zakłóceń niskoczęstotliwościowych.

Ważnym algorytmem przetwarzania pojedynczegp skanu jest filtracja częstotliwościowa.
Można ją z stosować powodzeniem w przypadkach, gdy istnieje wyraźna różnica w częstotliwościach pomiędzy sygnałem użytecznym, zakłóceniami zdeterminowanymi i czynnikiem losowym.
Możliwa jest realizacja takiej filtracji zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i czasu.
Filtracja w dziedzinie częstotliwości polega na mnożeniu widma sygnału przez transmitancję odpowiedniego filtru, co w dziedzinie czasu odpowiada operacji splotu sygnału z odpowiedzią impulsową tegoż filtru.
Najłatwiejsza w realizacji praktycznej jest filtracja w dziedzinie częstotliwości. Aby określić parametry filtru należy zbadać widma amplitudowe kilku wybranych skanów. Najczęściej stosuje się filtry, które nie wprowadzają przesunięcia fazowego (filtry zero-fazowe), a kształtują jedynie widmo amplitudowe sygnału.
Jednym z rozpowszechnionych algorytmów filtracji w dziedzinie częstotliwości jest algorytm, w którym poddaje się sygnał wejściowy transformacji Fouriera, ustala charakterystykę amplitudową filtru, a następnie mnoży tę charakterystykę przez uzyskane widmo amplitudowe sygnału georadarowego. Po zakończeniu tych operacji wykonywana jest odwrotna transformacja Fouriera przenosząca sygnał z powrotem do dziedziny czasu.

Do bardziej zaawansowanej rodziny algorytmów zaliczają się operacje wykonywane na grupie skanów nazywane procedurami kontekstowymi.
Ich celem jest przede wszystkim eliminacja poziomych ech zakłócających oraz poprawa poziomu ech użytecznych.

Sąsiednie skany na ogół są ze sobą w pewnym stopniu skorelowane. Eliminacja niepożądanych ech może więc polegać na odjęciu średniej skanu od całego profilu.
Operacja ta jest najprostszym algorytmem wykonywanym na grupie skanów.
Jego realizacja polega na obliczeniu średniej z całego falogramu. Procedurę tę można opisać za pomocą następującej zależności:

$$\overline{x}_i = \frac{1}{L}\sum_{j=0}^{L} x_{i,j}$$

gdzie $x_{i,j}$ jest i-tą próbką j-tego skanu, zaś L liczbą skanów na falogramie,
$i = 0...n$ gdzie n oznacza liczbę próbek na pojedynczym skanie

Po wyznaczeniu skanu średniego, kolejnym krokiem jest odjęcie go od każdego z pozostałych skanów. Algorytm ten jest przydatny przy usuwaniu refleksów poziomych powtarzających się przez większą część echogramu.

Przetwarzanie dopplerowskie

W przypadku obserwacji celu ruchomego, zarówno opóźnienie sygnału jak i dopplerowskie przesuniecie częstotliwości występują jednocześnie.

Z tego powodu wybór optymalnego sygnału powinien uwzględniać zmiany jego parametrów tak w czasie jak i w częstotliwości.

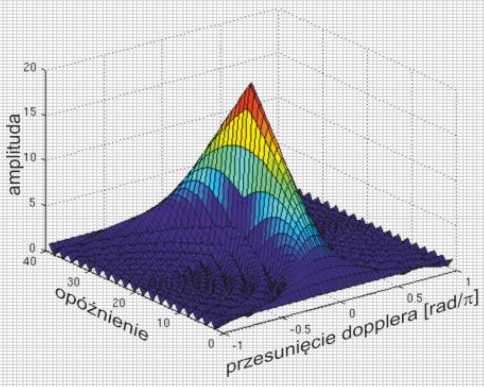
Dla uzyskania dużej dokładności pomiaru odległości i rozróżnialności odległościowej należy stosować krótkie impulsy sondujące, natomiast chcąc dokładnie mierzyć prędkości należy stosować impulsy długie (najlepiej falę ciągłą). Wymagania te są przeciwstawne.

Niemożność jednoczesnego polepszenia rozróżnialności tak w odległości jak i prędkości nosi w echolokacji nazwę zasady nieoznaczoności.

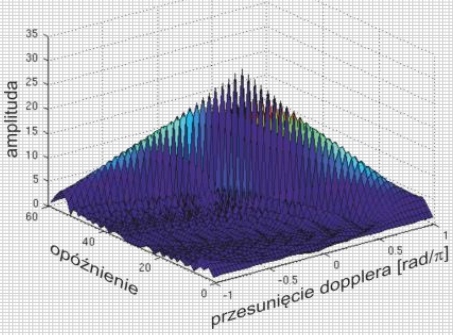
Funkcja nieoznaczoności reprezentowana jest przez figurę przestrzenną zwaną bryłą nieoznaczoności.

$$\chi(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)e^{j\omega t}dt$$

Przykłady funkcji nieoznaczoności

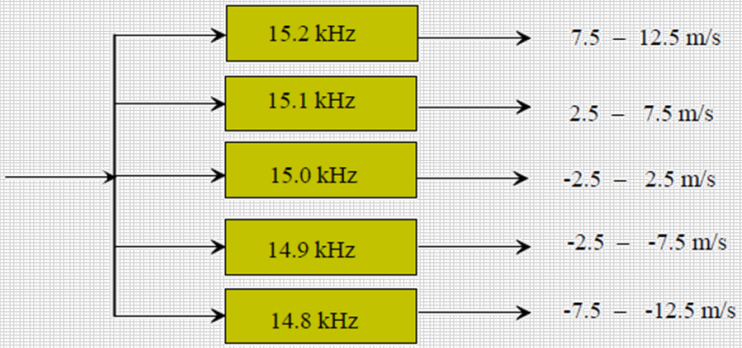


dla impulsu prostokątnego



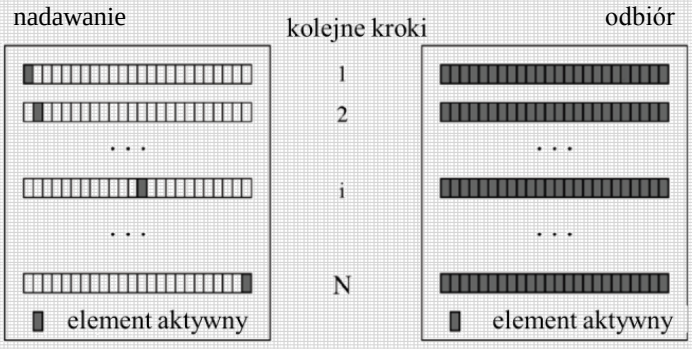
dla LFM

Przesunięcie dopplerowskie wyznacza się poprzez filtrację częstotliowściową realizowaną poprzez odpowiedni bank filtrów

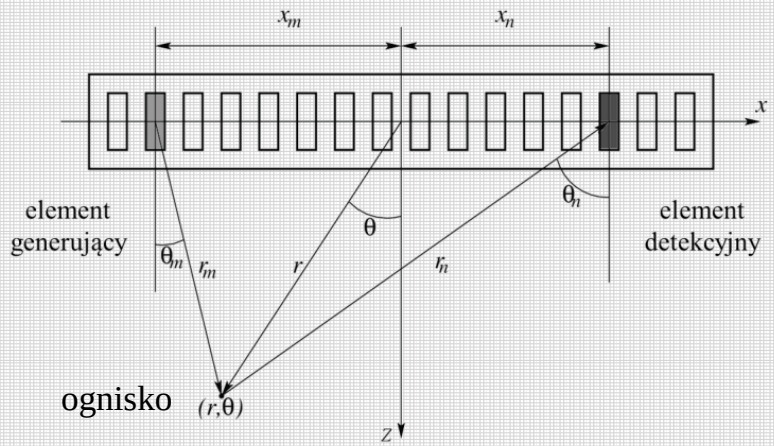


Syntetyzowanie apertury

jeden element nadający



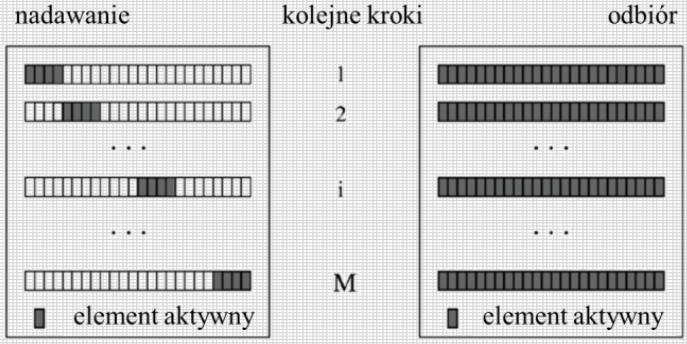
$$\tau_{m,n} = \tau_m + \tau_n$$



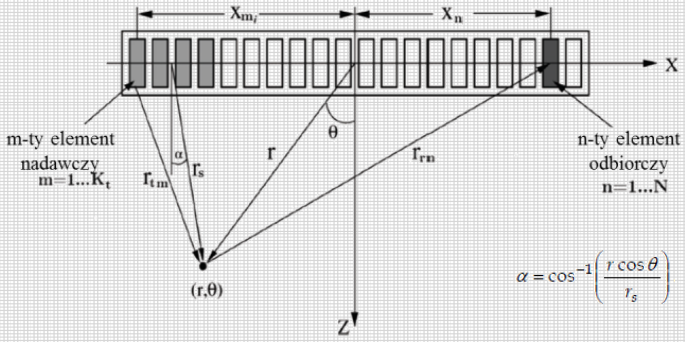
opóźnienia $\tau_m = \frac{1}{c}\left(r - \sqrt{x_m^2 + r^2 - 2x_m r\sin\theta}\right)$, $\tau_n = \frac{1}{c}\left(r - \sqrt{x_n^2 + r^2 - 2x_n r\sin\theta}\right)$

A-skan $A(r,\theta) = \sum_{m=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-1} y_{m,n}\left(\frac{2r}{c} - \tau_{m,n}\right)$

szyk elementów nadających



$\tau_m = \frac{r_s - r_{tm}}{c}$



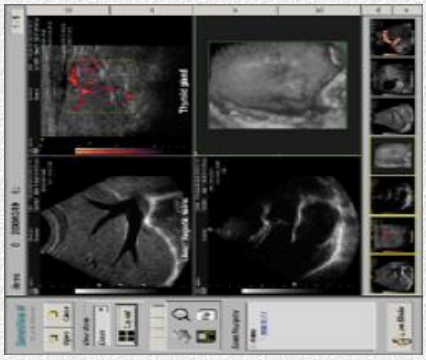
$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{r\cos\theta}{r_s}\right)$$

$$r_{tm} = \sqrt{\left[\left(-\frac{K_t-1}{2}+m\right)d\right]^2 + r_s^2 - 2\left(-\frac{K_t-1}{2}+m\right)dr_s\sin\alpha}$$

$$\tau_i = \frac{r-r_s}{c} = \frac{1}{c}\left(r - \sqrt{(r\cos\theta)^2 + (xm_i - r\sin\theta)^2}\right) = \frac{1}{c}\left(r - \sqrt{\left[K_t\left(-\frac{N_s-1}{2}+i\right)d\right]^2 + r^2 - 2K_t\left(-\frac{N_s-1}{2}+i\right)dr\sin\theta}\right)$$

$$A_{STA}(t) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{N_s-1}\sum_{m=0}^{K_t-1} s_{K_t i+m,n}(t-\tau_n-\tau_i-\tau_m)$$

ULTRASONOGRAFIA



Rys historyczny

1876 Francis Galton gwizdek przywołujący psa – pierwszy instrument ultradźwiękowy

1880 Jacques i Pierre Curie odkrycie prostego efektu piezoelektrycznego

1881 Gabriel Jonas Lippmann odkrycie odwrotnego efektu piezoelektrycznego
- pierwsze zastosowania

1912 nieudane próby lokalizacji Titanica

1917 Paul Langevin i wsp. mozaikowy detektor łodzi podwodnych [50 kHz]

II Wojna Światowa **SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging

1937 K.T. Dussik próba wizualizacji komór sercowych

1949 D. Howry & W.R. Bliss pierwszy skaner

1954 Howry & Holmes sonoskop

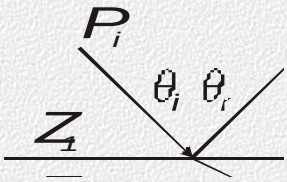
lata 60-te pierwszy skaner komercyjny

Założenia:

fale krótsze od 1 mm

częstotliwość 1 –15 MHz

powietrze	331
tłuszcz	1450
rtęć	1450
olej	1500
woda (50ºC)	1540
tkanki miękkie	1540
mózg	1541
wątroba	1549
nerka	1561
krew	1570
mięśnie	1585
soczewka oka	1620
PZT -5A	3780
PZT -4	4000
kość	4080
kwarc	5740
aluminium	6400



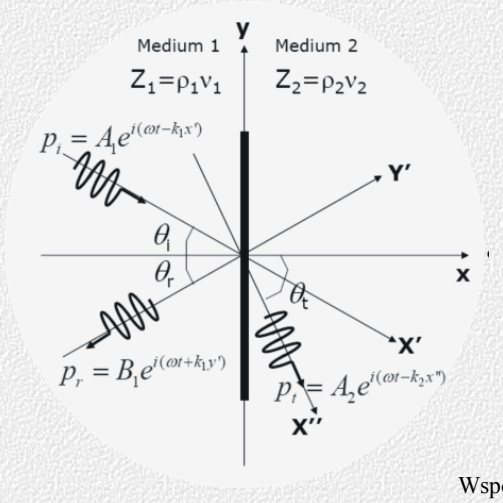
$$Z = \frac{P}{U} = \frac{\text{cisnienie fali padającej}}{\text{prędkosć cząstki materialnej}} = \rho v = \sqrt{\frac{\rho}{G}} \qquad \left[\frac{kg}{m^2 s}\right] = [Rayl]$$

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{v_1}{v_2}$$

natężenie promieniowania akustycznego (moc przechodząca przez powierzchnię jednostkową):

$$I = \frac{1}{2} PU = \frac{1}{2}\frac{P^2}{Z} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

moc powyżej 100 mW/cm^2 dla faliu ciągłej jest niebezpieczna dla zdrowia



Współczynnik odbicia

$$r = \frac{p_r}{p_i}\bigg|_{x=y=0} = \frac{B_1}{A_1}$$

Współczynnik transmisji

$$\tau = \frac{p_t}{p_i}\bigg|_{x=y=0} = \frac{A_2}{A_1}$$

Ciśnienia i prędkości

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$p_{i\perp} = A_1 \cos\theta_i e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad p_{r\perp} = B_1 \cos\theta_i e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad p_{t\perp} = A_2 \cos\theta_t e^{i(\omega t - k_2 x)}$$

$$v_{i\perp} = \frac{1}{\rho_1}\int \frac{\partial p_{i\perp}}{\partial x} dt = \frac{A_1 \cos\theta_i k_1}{\omega\rho_1} e^{i(\omega t - k_1 x)} = \frac{A_1 \cos\theta_i}{\rho_1 v_1} e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

$$v_{r\perp} = \frac{1}{\rho_1}\int \frac{\partial p_{r\perp}}{\partial x} dt = \frac{B_1 \cos\theta_i k_1}{\omega\rho_1} e^{i(\omega t - k_1 x)} = \frac{B_1 \cos\theta_i}{\rho_1 v_1} e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

$$v_{t\perp} = \frac{1}{\rho_2}\int \frac{\partial p_{t\perp}}{\partial x} dt = \frac{A_2 \cos\theta_t k_2}{\omega\rho_2} e^{i(\omega t - k_2 x)} = \frac{A_2 \cos\theta_t}{\rho_2 v_2} e^{i(\omega t - k_2 x)}$$

Na brzegu

$$p_i\big|_{x=y=0}+p_r\big|_{x=y=0}=p_t\big|_{x=y=0} \qquad A_1+B_1=A_2 \qquad v_{i\perp}\big|_{x=0}+v_{r\perp}\big|_{x=0}=v_{t\perp}\big|_{x=0}$$

Zatem na podstawie w.b.

$$\frac{A_1\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}-\frac{B_1\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}=\frac{A_2\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}$$

$$\frac{A_1\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}-\frac{B_1\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}=\frac{A_1\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}+\frac{B_1\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}$$

$$\frac{A_1\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}-\frac{(A_2-A_1)\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}=\frac{A_2\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}$$

więc

współczynnik odbicia

$$r=\frac{B_1}{A_1}=\frac{\frac{\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}-\frac{\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}}{\frac{\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}+\frac{\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}}=\frac{\frac{\cos\theta_i}{Z_1}-\frac{\cos\theta_t}{Z_2}}{\frac{\cos\theta_i}{Z_1}+\frac{\cos\theta_t}{Z_2}}=\frac{Z_2\cos\theta_i-Z_1\cos\theta_i}{Z_2\cos\theta_i+Z_1\cos\theta_i}$$

współczynnik transmisji

$$\tau=\frac{A_2}{A_1}=\frac{\frac{2\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}}{\frac{\cos\theta_i}{\rho_1 v_1}+\frac{\cos\theta_t}{\rho_2 v_2}}=\frac{\frac{2\cos\theta_i}{Z_1}}{\frac{\cos\theta_i}{Z_1}+\frac{\cos\theta_t}{Z_2}}=\frac{2Z_2\cos\theta_i}{Z_2\cos\theta_i+Z_1\cos\theta_t}$$

Definiuje się też współczynniki natężeniowe

natężeniowy współczynnik odbicia

$$R = r^2 = \left(\frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1 \cos\theta_i}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_i} \right)^2$$

natężeniowy współczynnik transmisji

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \tau^2 = \left(\frac{2Z_2 \cos\theta_i}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} \right)^2 = \frac{4Z_1 Z_2 \cos^2\theta_i}{\left(Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t\right)}$$

$$p = p_0 e^{i\omega t} \qquad v = v_0 e^{i\omega t}$$

$$I = p_0 v_0 \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \frac{1}{2} p_0 v_0 = \frac{p_0^2}{2Z}$$

Przykład

tkanka	v_0 [m/s]	Z [kg/m^{2}s]
nerka	1560	1,62
mięsień	1570	1,70
kość	3360	6,10

wsp. odbicia na granicy nerka – mięsień = 0,00058,
co oznacza 0,058 % mocy odbitej, 99,942% mocy przechodzącej

mięsień kość: odpowiednio 0,318, 31,8% 68,2%

Dla $Z_2 >> Z_1$ odbiciu ulega niemal 100% energii

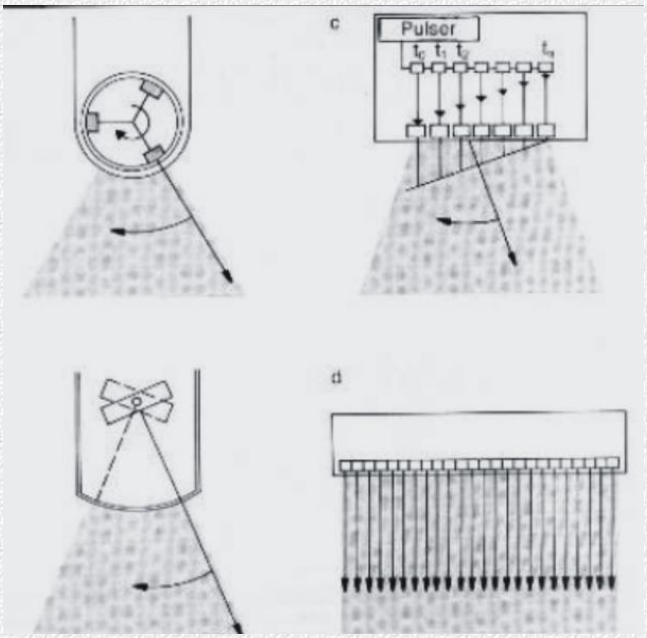
Tłumienie

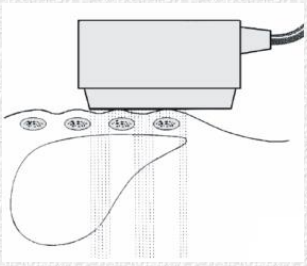
= względny spadek natężenia na drodze propagacji

$$\alpha = \frac{\Delta I}{I \Delta x}[\mathrm{m}^{-1}] \qquad I = I_0 e^{-\alpha t}$$

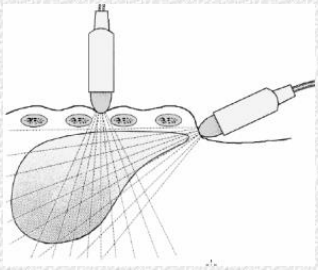
tkanka	tłumienie [dB/m] przy 1 MHz
krew	20
tłuszcz	60
mięśnie	180
wątroba	90
tkanki miękki (średnia)	70

Przetworniki





Głowica linearna

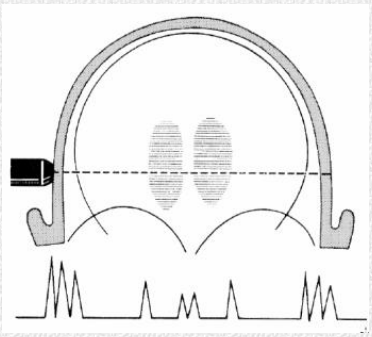


Głowica sektorowa

Metody skanowania

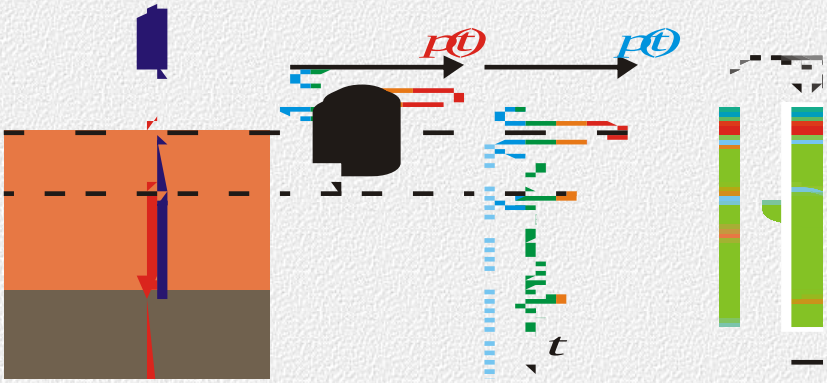
- **A-mode** – tryb amplitudowy

Pomiar nieciągłości tkanek wzdłuż osi skanowania
Zobrazowanie ech amplitudy
stosowany do kalibracji dla innych modów



- **B-mode** – tryb natężeniowy

Oś x jest osią czasu y – przemieszczenia głowicy
Przemieszczenia przetwornika liniowe bądź radialne
Zobrazowanie natężeniowe

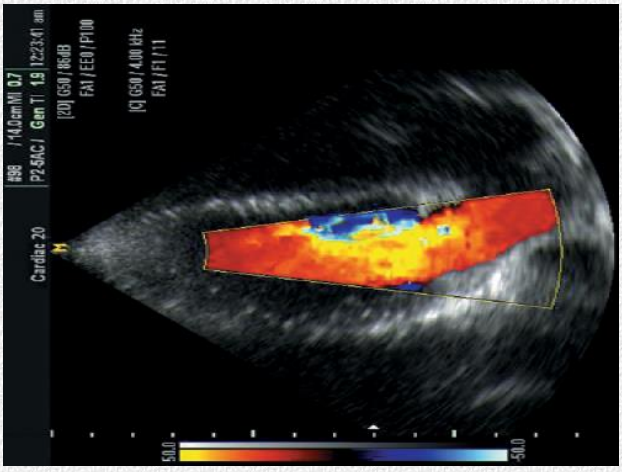


- **M-mode** – tryb dopplerowski

Stosowany w kardiologii
Jest to w zasadzie tryb B ale z poziomą osią czasu - **zapis ruchu struktur podczas insonacji**

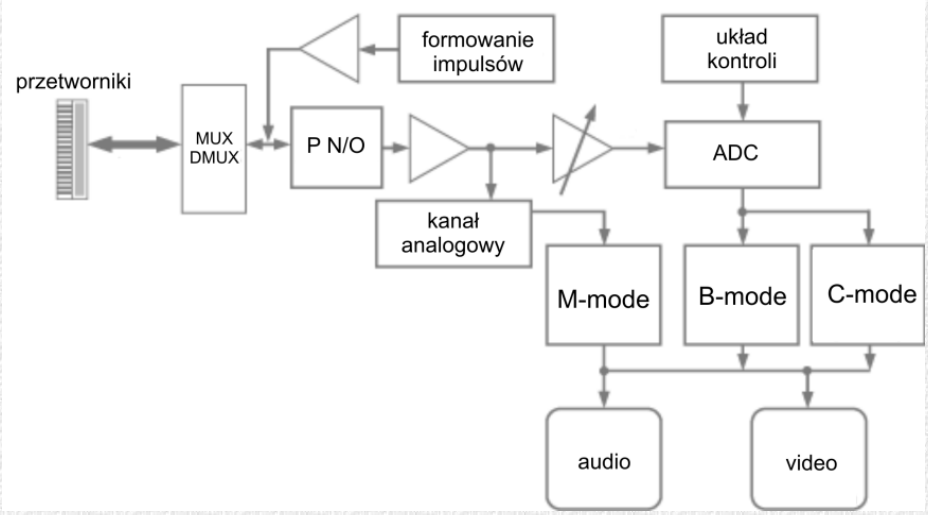
- **C-mode** – tryb kolorowy

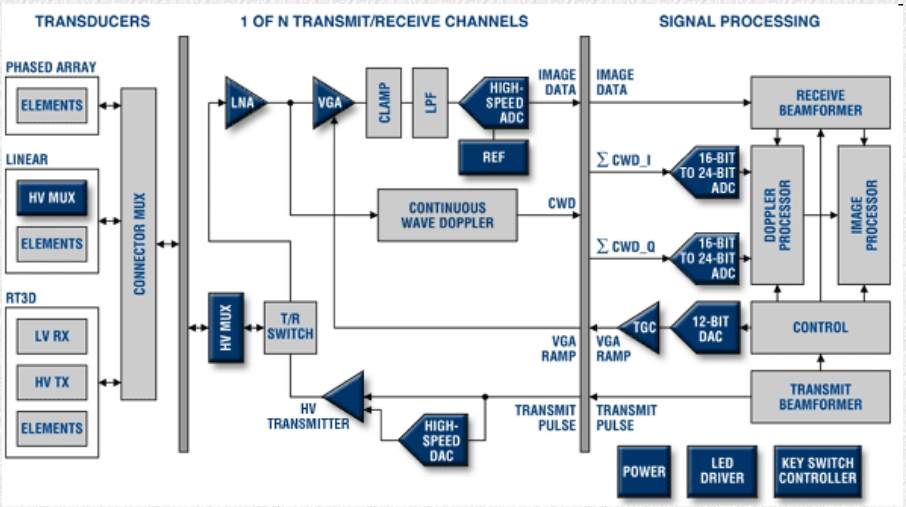
Specjalne zobrazowanie częstotliwości dopplerowskiej

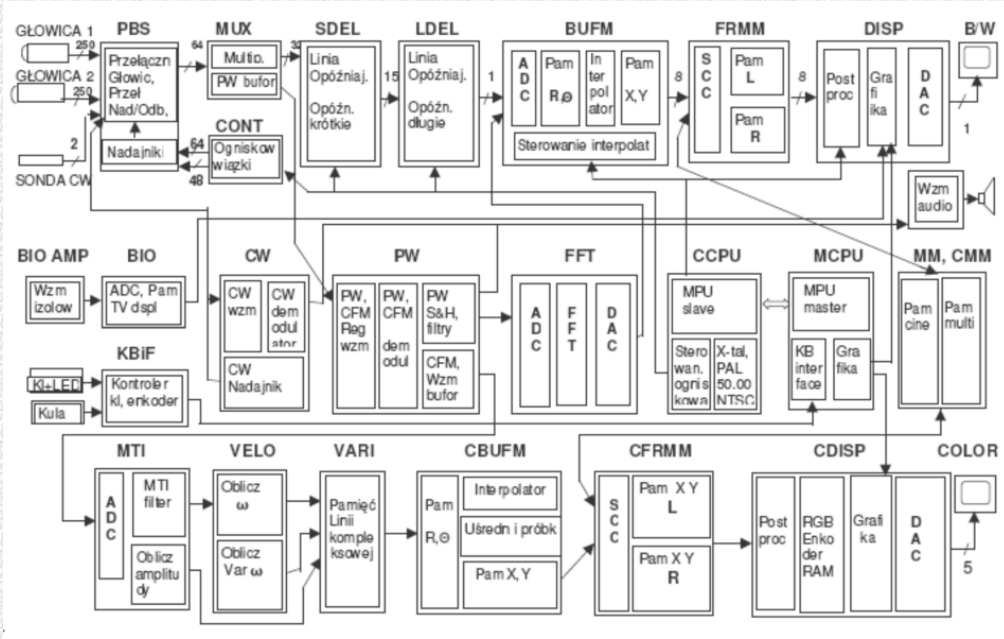


- **3D-mode**

Uproszczony schemat blokowy




TRANSDUCERS
1 OF N TRANSMIT/RECEIVE CHANNELS
SIGNAL PROCESSING
PHASED ARRAY
ELEMENTS
LINEAR
HV MUX
ELEMENTS
RT3D
LV RX
HV TX
ELEMENTS
CONNECTOR MUX
LNA
VGA
CLAMP
LPF
HIGH-SPEED ADC
REF
IMAGE DATA
IMAGE DATA
RECEIVE BEAMFORMER
CONTINUOUS WAVE DOPPLER
CWD
Σ CWD_I
16-BIT TO 24-BIT ADC
Σ CWD_Q
16-BIT TO 24-BIT ADC
DOPPLER PROCESSOR
IMAGE PROCESSOR
HV MUX
T/R SWITCH
TGC
12-BIT DAC
CONTROL
VGA RAMP
VGA RAMP
HV TRANSMITTER
HIGH-SPEED DAC
TRANSMIT PULSE
TRANSMIT PULSE
TRANSMIT BEAMFORMER
POWER
LED DRIVER
KEY SWITCH CONTROLLER


GŁOWICA 1
GŁOWICA 2
SONDA CW
PBS
Przełączn Głowic, Przeł Nad/Odb,
Nadajniki
MUX
Multio.
PW bufor
CONT
Ogniskow wiązki
SDEL
Linia Opóźniaj.
Opóźn. krótkie
LDEL
Linia Opóźniaj.
Opóźn. długie
BUFM
ADC
Pam R,Θ
Interpolator
Pam X,Y
Sterowanie interpolat
FRMM
SCC
Pam L
Pam R
DISP
Post proc
Grafika
DAC
B/W
Wzm audio
BIO AMP
Wzm izolow
BIO
ADC, Pam TV dspl
CW
CW wzm
CW demodulator
CW Nadajnik
PW
PW, CFM Reg wzm
PW, CFM demodul
PW S&H, filtry
CFM, Wzm bufor
FFT
ADC
FFT
DAC
CCPU
MPU slave
Stero wan. ogniska
X-tal, PAL 50.00 NTSC
MCPU
MPU master
KB interface
Grafika
MM, CMM
Pam cine
Pam multi
KBiF
Kl+LED
Kula
Kontroler kl, enkoder
MTI
ADC
MTI filter
Oblicz amplitudy
VELO
Oblicz ω
Oblicz Var ω
VARI
Pamięć Linii komplekswej
CBUFM
Pam R,Θ
Interpolator
Uśredn i próbk
Pam X,Y
CFRMM
SCC
Pam X Y L
Pam X Y R
CDISP
Post proc
RGB Enkoder RAM
Grafika
DAC
COLOR

- dwie głowice po 250 linii sygnałowych, wchodzących do modułu **PBS**.
- 64 linie nadawcze, 48 linii sterujących i 64 linie odbiorcze
- głowice piezoelektryczne pobudzane są impulsami o wartości szczytowej przekraczającej 100V i są źródłem sygnałów o wartości szczytowej 2μV
- moduł **PBS** jest sterowany 64 sygnałami nadawczymi w standardzie CMOS 12V sygnały te są odpowiednio poprzesuwane w czasie, zapewniając ogniskowanie wiązki w zadeklarowanych odległościach od czoła głowicy
- moduł **CONT** wypracowuje przesunięcia czasowe na podstawie kodów programujących ogniskowanie, przysłanych z modułu **CCPU**
- sygnały ech, po wstępnym wzmocnieniu w 64 identycznych wzmacniaczach, wysyłane są do modułu multipleksera **MUX**
- w typowych badaniach, w których wiązka dźwięku nie jest pochylana względem głowicy, moduł **MUX** sumuje sygnały symetryczne względem osi wiązki
- sygnały z MUX podawane są na wejścia linii opóźniających **SDEL** gdzie sumowane są grupami i w formie do 15 niezależnych sygnałów przesyłane są na wejścia linii opóźniających **LDEL**
- po zsumowaniu z przesunięciami czasowymi grup, wynikającymi z ogniskowania przy odbiorze, tworzą jeden sygnał, wysyłany do procesora cyfrowego **DSP,** na wejście modułu pamięci buforowej **BUFM.** Moduł ten zawiera ponadto uproszczony interpolator, dokonujący konwersji obrazu ze współrzędnych biegunowych na współrzędne prostokątne (X,Y) oraz pamięć obrazu.
- z modułu pamięci buforowej obraz jest przesyłany do modułu pamięci obrazów **FRMM**, który dokonuje operacji ważonego uśredniania ciągu obrazów
(**sc**an **c**orelation) oraz zapewnia zapamiętanie dwóch obrazów
- w nowoczesnych aparatach przesunięcia czasowe modyfikowane są w trakcie odbioru echa z coraz większych głębokości, przesunięcia te dla głowic liniowych mieszczą się w granicach od 0,1 ns dla sąsiednich kanałów i głębokości 20 cm do 2011 ns dla skrajnych kanałów i głębokości 1 cm
- sygnał analogowy jest przetwarzany na cyfrowy przy pomocy przetwornika o bezpośrednim przetwarzaniu, próbkującego sygnał co 80ns. Długość słowa reprezentacji cyfrowej sygnału wynosi od 6 do 8 bitów
-

z modułu **FRMM** obraz transmitowany jest do modułu **DISP**, gdzie następuje jego ostateczne przygotowanie do wyświetlenia:

· operacje postprocessingu, np. dobór krzywej kontrastu**,**

· dodanie grafiki do obrazu (standardowa ramka z parametrami zobrazowania i

piktogramami)

· dodanie w formie graficznej sygnałów bioelektrycznych z przystawki BIOAMP

· konwersja sygnału cyfrowego na sygnał analogowy

· dodanie impulsów synchronizacji by utworzyć zespolony sygnał wizyjny w

standardzie PAL lub NTSC.

- moduł **MCPU** dekoduje i interpretuje polecenia operatora z klawiatury wysyła do modułów **DISP** i **CDISP** grafikę stanowiącą uzupełnienie obrazu USG a przede wszystkim za pośrednictwem wspólnego obszaru adresowego przekazuje modułowi **CCPU** zadania operatora dotyczące technicznych parametrów zobrazowania

- moduł **CCPU** organizuje prace sprzętu. Na podstawie informacji odebranych z **MCPU** procesor **CCPU** przygotowuje kody sterujące ogniskowaniem przy nadawaniu i odbiorze, sterujące praca interpolatora, sterujące postprocessingiem obrazu USG czy też sterujące pracą toru zobrazowania barwnego

- moduł **BIO AMP** stanowi klasyczny wzmacniacz sygnału bioelektrycznego, wspomagający najczęściej badania USG w kardiologii poprzez dostarczenie sygnału EKG. Oprócz dodatkowej informacji diagnostycznej sygnał ten bardzo często służy do synchronizacji obrazu USG przy prezentacji **M** lub **DOPPLER**

- moduł **BIO** dokonuje konwersji sygnału bioelektrycznego na postać cyfrową, pamięta wartości próbek a następnie, po kompresji dynamiki, wybiera kolejne wartości próbek i wyświetla je w postaci graficznej synchronicznie z kolejnymi liniami TV, formowanymi w module **DISP**.

- moduł **KBiF** jest interfejsem klawiatury i trackball'a

- moduł **CW** zdudnia sygnały nadawane i odbierane uzyskując sygnał dopplerowski. Może być on odsłuchany przy pomocy wzmacniacza audio i głośnika lub za pośrednictwem modułów PW, FFT, BUFM, FRMM i DISP wyświetlony na monitorze

- moduł **PW** wzmacnia odebrane impulsy PW, demoduluje je i w układzie próbkująco – pamiętającym, uciągla próbki sygnału dopplerowskiego oraz wzmacnia sygnały przeznaczone do wizualizacji w torze zobrazowania barwnego

- moduł **FFT** wraz z wejściowym i wyjściowym przetwornikami analogowo – cyfrowymi umożliwia wizualizacje widma sygnału dopplerowskiego na ekranie monitora

- moduł **MTI** jest pierwszym modułem zobrazowania barwnego CFM. Wyposażony w przetwornik ADC na wejściu, lądujący pamięć jednej linii, stanowi filtr korelacyjny umożliwiający identyfikację ech od obiektów stałych i od obiektów ruchomych. Sygnał dopplerowski od obiektów ruchomych analizowany jest jako wirujący wektor reprezentatywny dla danego punktu obrazu. W module **MTI** obliczana jest długość tego wektora

- moduł **VELO** oblicza pozostałe parametry wirowania wektora, prędkość kołową wirowania i wariancję, która przyjmuje wartości niezerowe dla przepływów turbulentnych

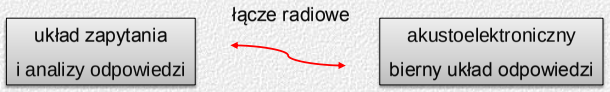
- moduł **VARI** zestawia kompleksową informację dla całej bieżącej linii obrazu

- dodatkowe moduły **CBUFM, CFRMM** i **CDISP** pełnią te same funkcje w torze zobrazowania barwnego, co analogiczne moduły w torze zobrazowania czarno-białego

Niestandardowe układy akustolokacyjne

RFID

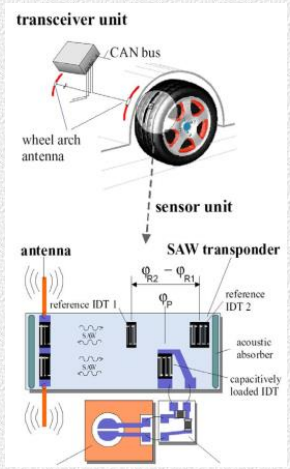
Układy tego typu mają cechy radarów wtórnych

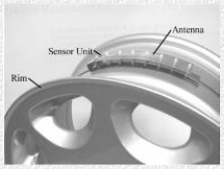


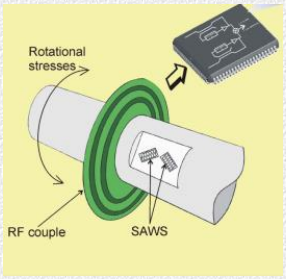
podstawowe cechy

- działanie na niewielkich dystansach
- małe gabaryty
- prostota technologii
- możliwość montażu w trudnodostępnych miejscach
- możliwość współpracy z czujnikami

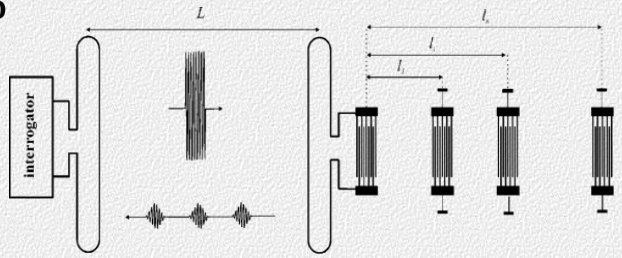
Zastosowania







RFID



sygnał interrogatora $S_e(x,t) = E\left(t - \frac{2\pi}{\omega_0 \lambda_0} x\right) e^{j(\omega_0 t - k_e x)}$ gdzie $E(t) = \begin{cases} E_0 \text{ dla } 0 \le t \le T \\ 0 \quad \text{dla pozostałych} \end{cases}$

T – czas trwania paczki harmonicznej,

l_0 – długość fali elektromagnetycznej,

k_e – liczba falowa fali EM,

ω_0 - pulsacja środkowa systemu (jednakowa dla jego części elektromagnetycznej i akustycznej)

Po pokonaniu dystansu *L* fala EM wzbudza prąd w antenie i generuje za pomocą dołączonego doń przetwornika IDT falę akustyczną o postaci:

$$S_v(t) = S_e(t)S_{12}(t) = V(t)e^{j(\omega_0 t - k_e L)}$$

S_{12}(t) element macierzy rozproszenia układu antena - IDT,

V(t) amplituda sygnału akustycznego

Sygnał po odbiciu się od układu reflektorów akustycznych trafia poniwnie do IDT i zostaje przekształcony na postać EM :

$$S_{ech}(t) = S_e(t)S_{21}(t) = V_{ech}(t)e^{j\left[\omega_0 t - (2k_e L + 2k_a l_1 + \ldots + 2k_a l_n)\right]}$$

$V_{ech}(t)$ amplituda sygnału ech fali EM

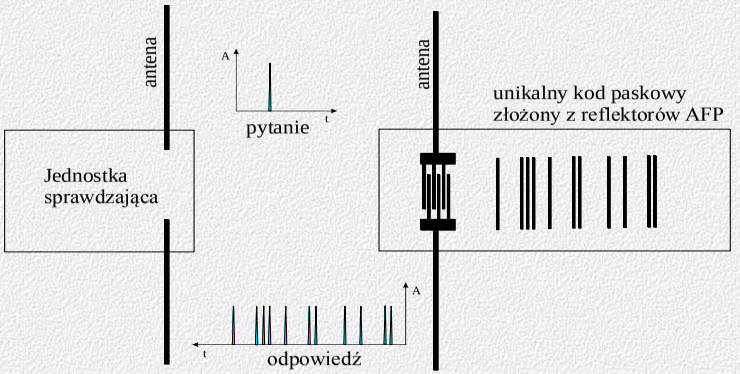
k_a liczba falowa fali akustycznej,

l_1 ... l_n odległości reflektorów akustycznych liczone od środka IDT

Oznaczając $2k_e L = \Phi_e$ oraz $2k_a l_n = \Phi_{na}$

$$S_{ech}(t) = V_{ech}(t)e^{j\left(\omega_0 t - \Phi_e - \sum_{n=1}^{m}\Phi_{na}\right)}$$

m jest liczbą reflektorów



Zastosowanie *n* reflektorów daje możliwość rozpoznawania i rozróżniania 2^n obiektów. Maksymalna liczba reflektorów ograniczona jest amplitudą sygnału. Przy *n* = 32 otrzymuje się ponad 4 miliardy rozróżnialnych kombinacji

Wpływając na opóźnienia fazowe pomiędzy reflektorami układ może pracować jako czujnik mierzący zmiany prędkości fali pomiędzy reflektorami.

Zależność opóźnienia fazowego fali akustycznej od zmian jej prędkości reflektorami można przedstawić następująco:

$$\Delta\Phi_{an} = \Phi_{an}\left(\frac{\Delta l_n}{l_n} - \frac{\Delta v_a}{v_a}\right) = \frac{2\omega_0 l_n}{v_a}\frac{\Delta v_a}{v_a} = \frac{2\omega_0 l_n \Delta v_a}{v_a^2}$$

$\Delta v_a = v_0 - v_a$ jest różnicą między prędkością fali akustycznej na powierzchni swobodnej, a prędkością fali akustycznej na powierzchni zaburzonej. Z uwagi na możliwe różnice w odległościach reflektorów, czujnik taki może pracować wielorozdzielczo.

Zasięg systemu określić można stosując równanie radarowe

$$r = \frac{1}{4\pi}\sqrt[4]{\frac{P_0 G_i^2 G_e^2 \lambda^4}{kT_0 B\, F\, S/N\, D}}$$

P_0 jest mocą wyjściową interrogatora,

G_i wzmocnieniem odbiornika interrogatora,

G_e zyskiem energetycznym anteny sensora,

D stratami sensora,

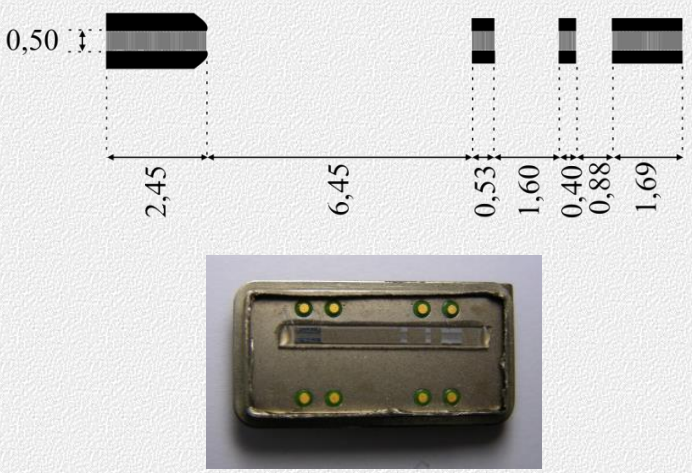
kT_0 energią szumów anteny odbiorczej (k – stałą Boltzmanna, T_0 temperatura bezwzględna),

B pasmem systemu,

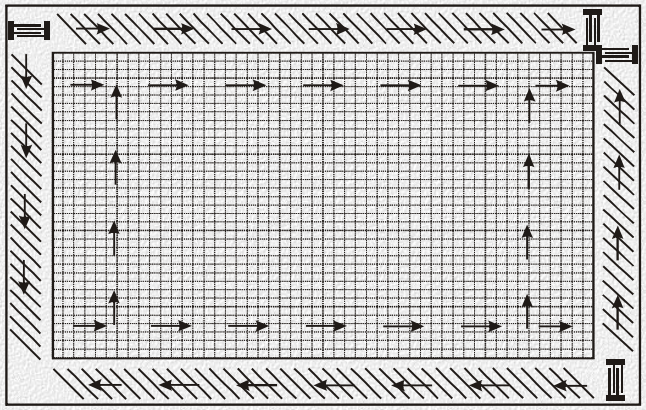
F współczynnikiem szumów systemu,

S/N stosunkiem mocy sygnału użytecznego do szumu

Przykład realizacji



Nakładane panele dotykowe



5 MHz

Cechy użytkowe

uzyskiwane przekątne 6,4” – 42” tj. ~16 – 105 [cm]

rozdzielczość 4096 x 4096

przeźroczystość >90%

dokładność < 2 mm

minimalna siła uaktywniająca 55 g

aktywacja palcem, palcem w rękawiczce, rysikiem

możliwość rozpoznawania siły nacisku (3D)

nie zniekształca kolorów

gwarantowana wytrzymałość 50 mln dotknięć bez uszkodzenia

twardość powierzchni 7 w skali Mohsa

brak dryftu punktu dotknięcia

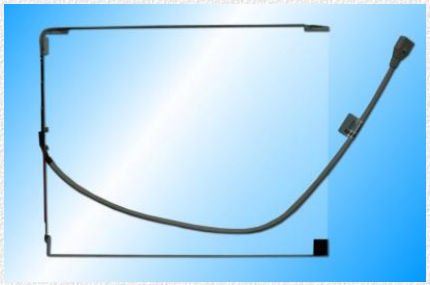
czas reakcji 16 ms

zakres temperatur pracy -20 °C do +50 °C

zakres temperatur przechowywania -40 °C do +70 °C

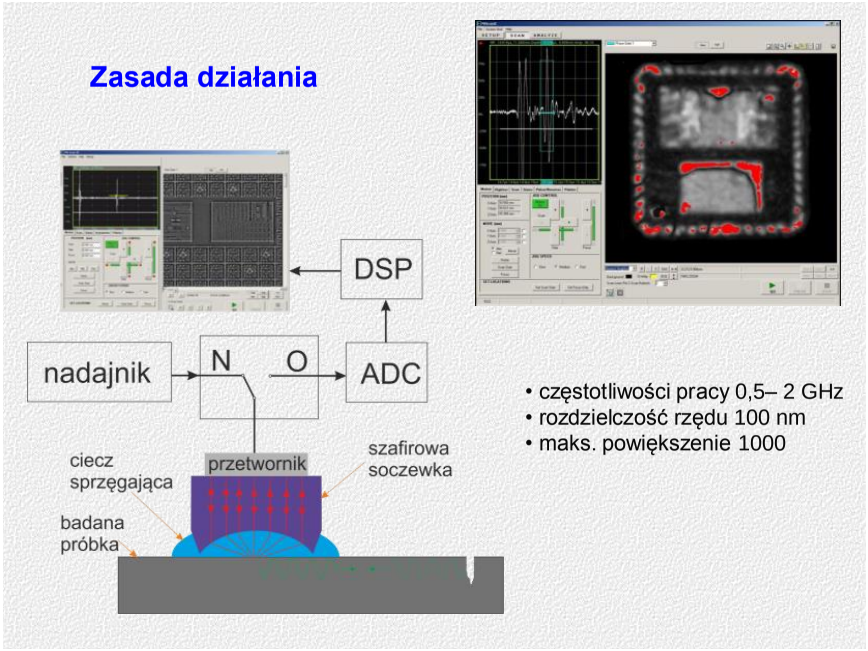
bardzo wysoka odporność na zakłócenia

kształt panelu: płaski, cylindryczny, sferyczny (nawet dowolny ale gładki)



Mikroskopia akustyczna

Zasada działania



- częstotliwości pracy 0,5– 2 GHz
- rozdzielczość rzędu 100 nm
- maks. powiększenie 1000