

DIAGNOSTYKA ULTRADŹWIĘKOWA

WPROWADZENIE DO PRZEDMIOTU

adj. dr inż. LECH KILIAN

Katedra Systemów Sonarowych WETI PG

Gdańsk, 2020

Celem przedmiotu jest zapoznanie studentów z podstawami licznych zagadnień występujących przy wykonywaniu diagnostyki struktur materii i zjawisk fizycznych w różnych dziedzinach techniki i życia codziennego.

Istnieje wiele metod diagnostycznych, bardziej lub mniej rozpowszechnionych, u których podstaw leżą różne, proste i zawiłe zjawiska fizyczne. W książkach traktujących o badaniach nieniszczących na pierwszych miejscach autorzy wymieniają niby proste badania wizualne, potem np. raczej mało znaną metodę penetracyjną, wykorzystującą zjawisko włośkowatości, by na koniec dojść do po popularnych z nazwy, aczkolwiek dla ogółu ludzi tajemniczych co do zasady, różnych rodzajów tomografii a po drodze zahaczając, w zależności od upodobań, o ograniczone co do zakresu zastosowań ale spektakularne zjawiska, np. w rodzaju efektu Halla.

Skromny wymiar godzinowy przedmiotu traktującego o podstawach diagnostyki spowodował ograniczenie możliwego do prezentacji materiału i wybór diagnostyki ultradźwiękowej jako podstawy.

Powodów takiego wyboru jest kilka.

Pierwszym są chyba najbardziej liczne (może prócz badań wizualnych) dziedziny zastosowań praktycznych. Jeśli nie ograniczyć „diagnostyki” do „defektoskopii technicznej” i nie upierać się przy wykorzystywaniu dźwięków koniecznie powyżej pasma słyszalnego (audio), to interesujący nas rodzaj diagnostyki (formalnie bardziej „akustycznej” niż „ultradźwiękowej”) możemy umieścić w dziedzinach: geo-, audio-, hydroakustyki, medycznych: ultrasonografii wraz z przeptywami krwi, tomografią i mikroskopią oraz w licznych przemysłowych: defektoskopowych, struktur materiałowych, wytrzymałości itp. Wypada też wspomnieć dziedziny „mieszane” – akustooptykę i akustoelektronikę.

Drugi powód to właściwości fizyczne pól i fal i ośrodków akustycznych. Studenci ETI, choć nie wszyscy, mają okazję poznać elektromagnetyzm z jego zawiłościami i w dużej mierze, tajemniczością. Podczas szkolnej i uczelnianej edukacji fizyki jej atrakcyjny dla młodych ludzi dział „Akustyka” jest natomiast traktowany po macoszemu, nie bardzo wiadomo czemu,. Jest to tym dziwniejsze, że występujące w akustyce zjawiska są łatwo wyobrażalne i wiążą się z prostymi prawami mechaniki – np. regułą zachowania pędu cząsteczek tworzących falę akustyczną i transmitujących energię w ośrodkach sprężystych w odróżnieniu od transmisji energii fal elektromagnetycznych bez widocznego nośnika, którym wcześniej miał być „eter” - z poniekąd nieszczęśliwą nazwą, bo przekazaną dla pożytecznego w paru zastosowaniach gazu, nie związanych jednak z polem elektromagnetycznym. Fale akustyczne, mimo pewnych komplikacji w ich dogłębnym zrozumieniu, związanych np. z lepkością i interfe-

rencjami jako podstawowym zjawiskiem kształtującym w przestrzeni pole akustyczne (wg uniwersalnej dla wszystkich rodzajów fal zasady Huygensa – Fresnela), zachowują się też odpowiedzialnie, nie wykazując np. dualizmu korpuskularno – falowego lub zawiłych polaryzacji. Że nie wspomnieć o falach grawitacyjnych, utrzymujących w ryzach, z raczej nieznanymi powszechnie powodów, cały kosmos (choć nie do końca, bo trochę się nam kosmos podobno poszerza).

Powyższe zachwyty nad nietrudną istotą akustyki błedną nieco z powodu rozległości przestrzennej fal i ich powolności, przez co w wielu wypadkach nie daje się stosować pięknych uproszczeń z optyki w rodzaju transmisji wzdłuż promienia, czego efektem są np. dydaktyczne rysunki pokazujące przejścia (i załamania) promieni przez soczewkę i w rezultacie odwracanie obrazu choinki czy świeczki (różnie w różnych podręcznikach).

Dyskusję właściwości fal i pól akustycznych studenci znajdą natomiast łatwo w pierwszych częściach załączonych moich dydaktycznych opracowań „Podstawy hydroakustyki” [1] oraz „Fizyczne i techniczne aspekty ultradźwiękowej diagnostyki i terapii” [2] (wraz z tomografią). W praktyce oba te opracowania są pożyteczne w całości dla przedmiotu „Diagnostyka ultradźwiękowa” dotyczą bowiem dziedzin pod każdym względem najbardziej zaawansowanych spośród wszystkich dziedzin zastosowań ultradźwięków. Ich fragmenty, dotyczące podstaw pomiarów, zostaną przytoczone poniżej.

Do uzyskania sporej, inżynierskiej wiedzy o różnych metodach defektoskopii, wykorzystujących różne zjawiska fizyczne, można wykorzystać książkę Anny Lewińskiej – Romickiej „Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii” [3], wydanej przez WNT Warszawa z numerem ISBN 83-204-2641-3.

Jako uzupełnienie obszernych materiałów [1] i [2] można potraktować niżej zawarte uwagi dotyczące mniej wysublimowanej technicznie defektoskopii materiałowej oraz mniej znanych dziedzin takich jak geoakustyka, meteoakustyka, mikroskopia, akustooptyka czy akustoelektronika.

Na koniec dywagacji o zaletach ultradźwięków w diagnostykach różnych rodzajów przytoczmy explicite jeszcze dwa aspekty. Pierwszym jest bezpieczeństwo metod – przy podstawowych dbałościach brak jest narażeń zdrowotnych i koniecznych w innych dziedzinach zabezpieczeń w rodzaju ołowianych fartuchów. Drugim - brak konieczności stosowania czynników podnoszących kontrastowość badań, czynników uciążliwych lub choćby tylko stresujących badanych i operatorów aparatury.

Należy jednak możliwie wcześniej zwrócić uwagę potencjalnym użytkownikom metod ultradźwiękowych, że na ogół pierwszym kłopotem jaki spotykają projektanci urządzeń diagnostycznych jest zapewnienie skutecznego i nieuciążliwego w eksploatacji sprzężenia pomiędzy sondą pomiarową a diagnozowanym ośrodkiem. Czarnym snem konstruktorów są np. zardzewiałe lub pokryte łuszczącą się farbą powierzchnie sprawdzanych elementów (np. ścian zbiorników) ale też powierzchnia ziemi (w geofonii) lub kora drzew (w tomografii stanu pnia zabytkowych osobników). Prócz prostych rozwiązań typu stosownej warstwy smaru lub badan zanurzonego obiektu należy uciekać się niekiedy do wbijania w ziemię sprzęgających kołków lub delikatnych, daj Boże, szpilek w pień drzewa.

1. METODY DIAGNOSTYCZNE

Klasyfikacje metod diagnostycznych bywają, jak zwykle, rozmaite. Wyróżnia się [3] np. aż siedem tzw. metod badań nieniszczących: ultradźwiękową, radiologiczną, prądów wirowych, magnetyczną, penetracyjną, badań wizualnych i badań szczelności i jest to klasyfikacja

bardzo sensowna, bo zawiera w nazwach zjawiska fizyczne będące podstawą badań. W każdej z tych metod stosowane są różne sposoby prowadzenia diagnostyki, wymuszane np. przez rodzaje obiektów badań, ich fizyczne właściwości materiałowe, zakładane rezultaty itp.

Dla preferowanej tutaj dziedziny diagnostyki ultradźwiękowej podaje się [3] następujące zastosowania:

- defektoskopia różnych obiektów,
- pomiary grubości obiektów,
- mikrodefektoskopia materiałów,
- mikroskopia ultradźwiękowej,
- badania emisji akustycznej,
- badania właściwości materiałów (strukturoskopii), np. własności mechanicznych ciał stałych,
- badania stanu materiałów, np. w pomiarach naprężeń,
- analiza właściwości i pomiary poziomów płynów,
- pomiary prędkości i natężenia przepływu cieczy
- diagnostyce i terapii medycznej,
- badaniu złóż geologicznych.

Wymienione bogactwo zastosowań, także wraz z innymi, wspomnianymi wyżej we wprowadzeniu są możliwe także dlatego, że tylko w tej dziedzinie możliwe jest stosowanie kilku metod [3]:

- metody przepuszczania (cienia),
- metody echa (przeważające zastosowanie)
- metody TOFT (time of flight diffraction) wykorzystującej dyfrakcyjne ugięcia i rozpraszania fal ultradźwiękowych, m.in. na poprzecznych, w stosunku do kierunku przebiegu fal, krawędziach nieciągłości płaskich,
- metod tomograficznych.

Dwie pierwsze metody są najbardziej rozpowszechnione ze względu na prostotę idei jak i niezbędnej aparatury. Obie polegają formalnie na detekcji nieciągłości impedancyjnych w strukturach badanych ośrodków.

Metoda przepuszczania pozwala na oznaczenie wystąpienia i kierunku na nieciągłość (lokalizacji w dwóch wymiarach) i wystarcza np. w procesach produkcyjnych do sprawdzania np. poprawności struktur opon, do których jest dostęp dwustronny – od wnętrza i zewnątrz. Umożliwia jednak również pomiary zaawansowane pod względem precyzji – np. porównywanie struktur transmitowanych przez próbkę impulsów (położenia i amplitud kolejnych sinusoid w obwiedniach) w stabilnych warunkach stwarza np. możliwości szacowania zmęczenia próbek materiałów poddawanych narażeniom.

Metoda echa zapewnia pozyskanie trzeciego wymiaru lokalizacyjnego – odległości celu od głowicy i przy stosownym zaangażowaniu aparaturowym i operatorów umożliwia bogatszą estymację właściwości celów niż metody cienia.

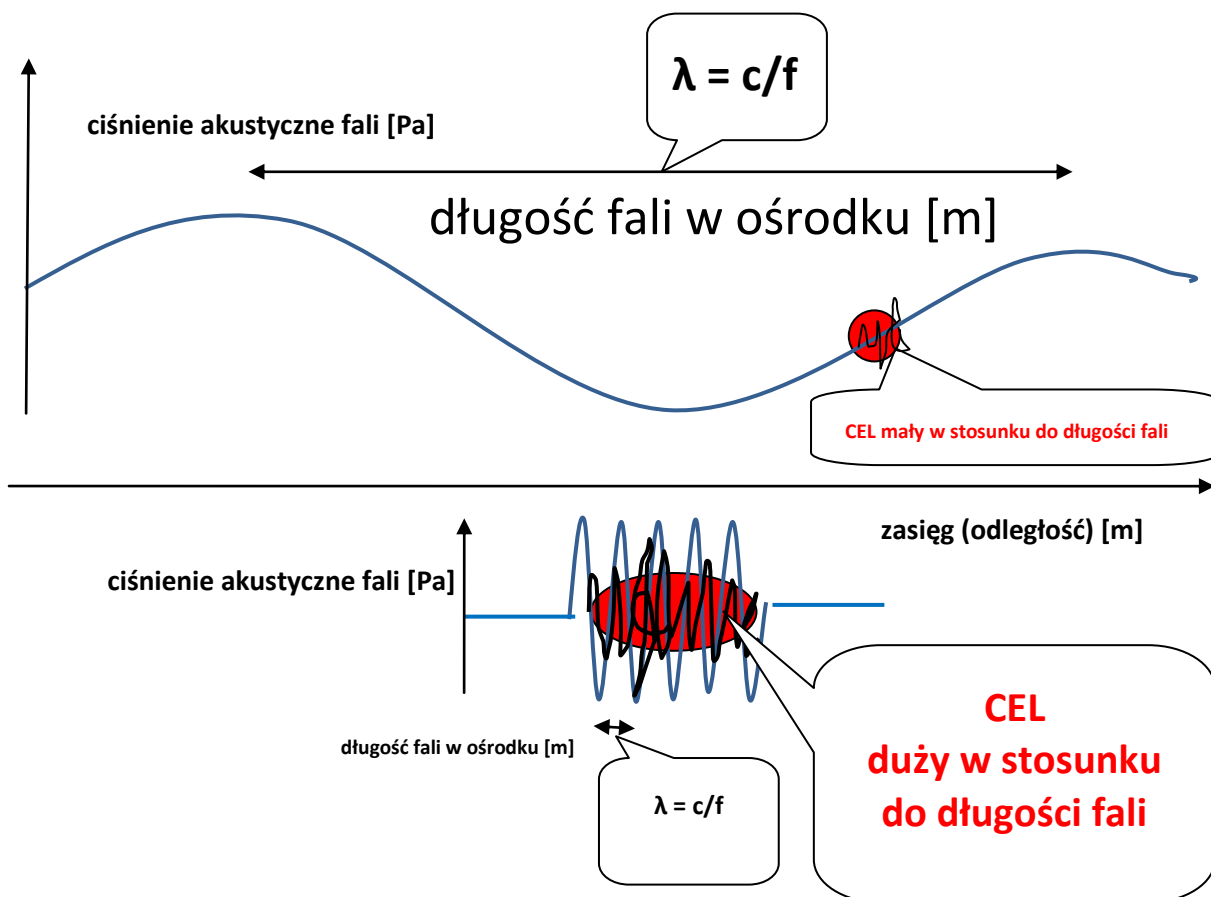
Na szczególne wyróżnienie zasługuje tomografia, umożliwiającą kosztem możliwości pomiarów wokół badanego obiektu i wykonywania wielu kolejnych „przekrojów” zbieranie wielkiej ilości informacji o lokalizacji celów ale też różnych ich właściwości fizycznych, np. nie tylko rozłożenia struktur impedancji akustycznych ale też rozkładów tłumienia fal i ich prędkości w przekrojach obiektu a, po złożeniu, trójwymiarowych. Opanowanie możliwości koniecznych operacji obliczeniowych związanych z nawałem danych umożliwia poszerzenie aplikacji tomografii do niespodziewanych chyba dziedzin, np. badania stanu struktur wewnętrznych pni drzew (np. zabytkowych) bez konieczności wierceń w celu pobrania próbek.

2. PODSTAWOWE POJĘCIA W DIAGNOSTYCE ECHOLOKACYJNEJ

Zwłaszcza w echolokacji jest kilka prostych definicji – pojęć, które specjalistom wydają się absolutnie oczywiste, jednakże, jak wskazuje doświadczenie belferskie, powszechnie nie są takowymi. Poniżej przedstawiam kilka podstawowych „branżowych” haseł wraz z ich graficzną interpretacją, nie sprawiającą trudności poznawczych.

2.1. Cele skupione i rozległe

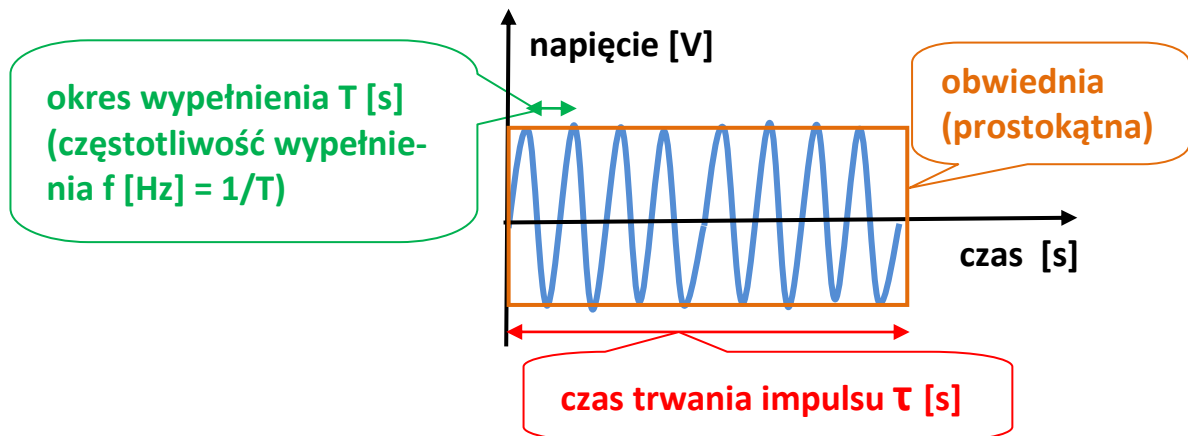
Cele skupione i rozległe względem długości fali impulsu sondującego rozprzestrzeniającego się w ośrodku:



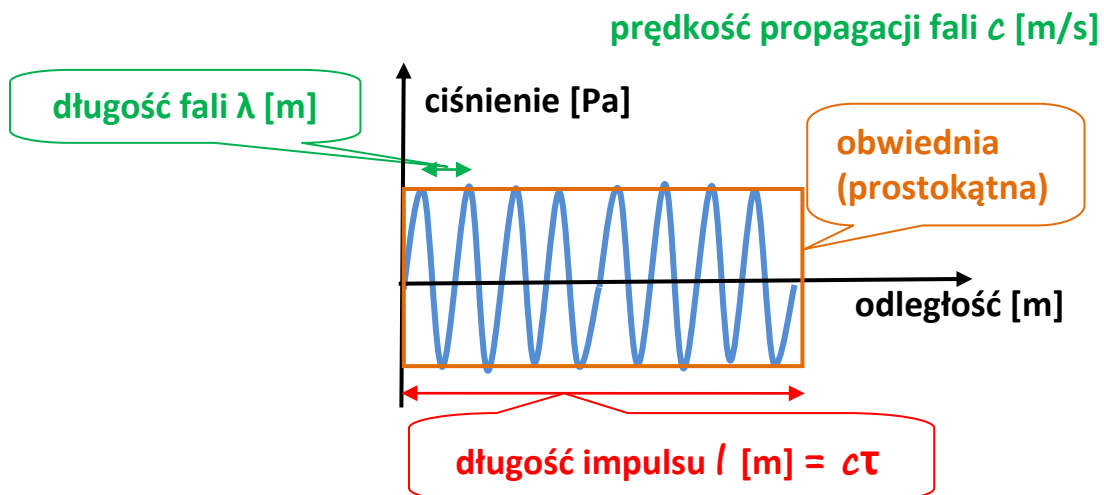
Mały cel jest w stanie naraz zakłócić tylko mały fragment długiej fali. Gdy celów trafi się wiele – mogą rozproszyć bardziej lub mniej impuls. Pojedynczy maluch da mizerny ślad. Co innego duży cel, zaburzający np. cały impuls – powstanie przyzwoite echo.

2.2. Impuls sondujący – po stronie elektrycznej i w przestrzeni (ośrodku)

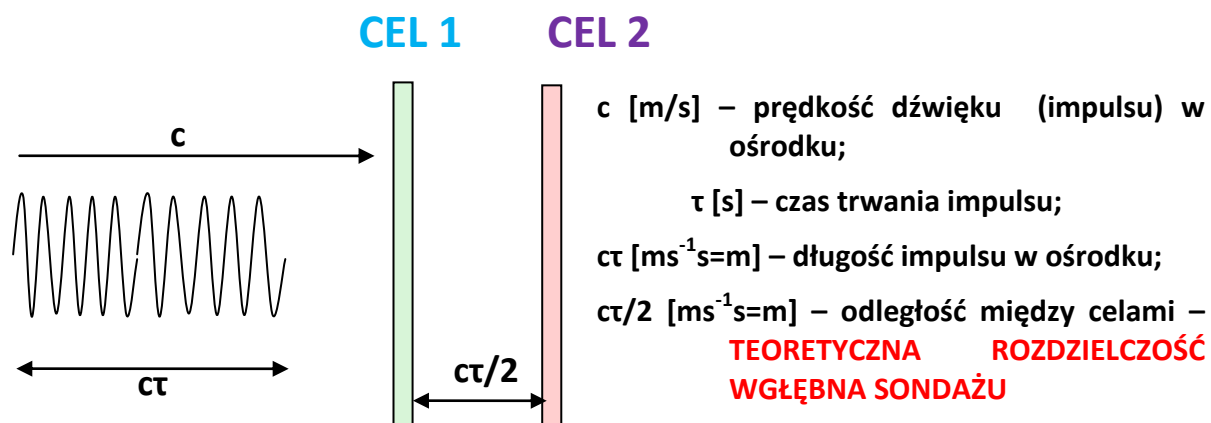
- parametry elektryczne impulsu sondującego (obraz na oscyloskopie):



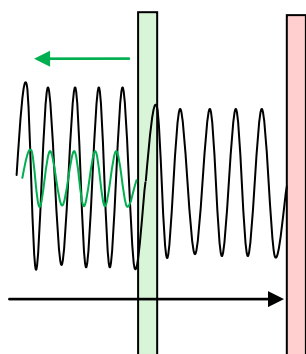
- parametry akustyczne impulsu sondującego (w ośrodku):



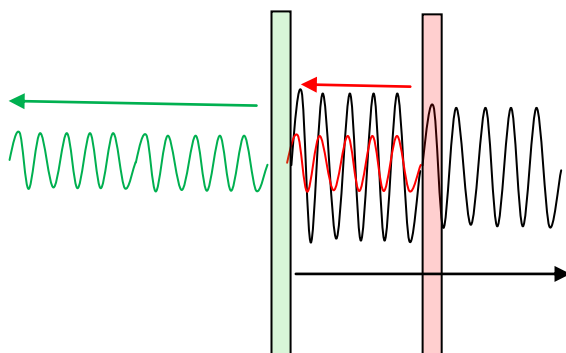
2.3. Rozdzielczość wgłębna sondażu impulsowego (sytuacja modelowa)



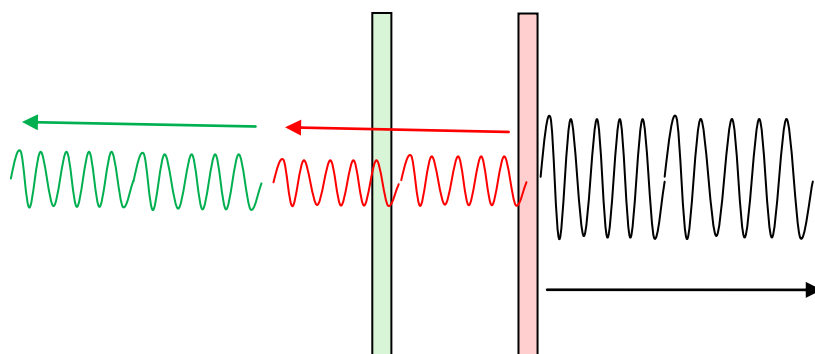
W rzeczywistości oczywiście nie ma kolorów.



- Czoło impulsu dociera do **CELU 2**;
- Połowa impulsu odbiła się od **CELU 1** i wraca jako **zielone echo**;



- Koniec impulsu dotarł poza **CELU 1**;
- **CEL 2** jest w połowie impulsu;
- Cały impuls odbił się od **CELU 1** i wraca jako **zielone echo**;
- Połowa impulsu odbiła się od **CELU 2** i wraca jako **czerwone echo**;

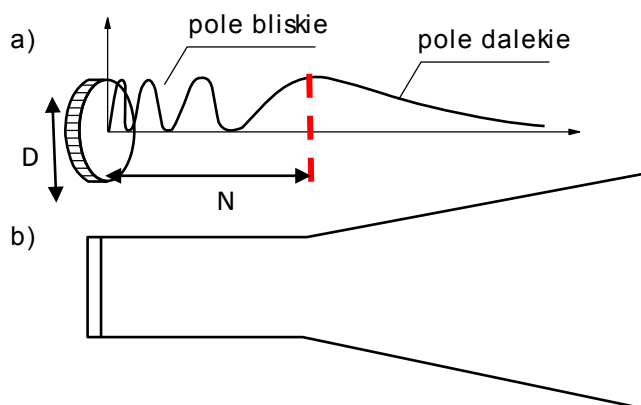


- Koniec impulsu dotarł poza oba CELE;
- Wracają pełne echa od obu CELÓW – **zielone** i **czerwone**;
- Jeśli odległość między celami jest nieco większa niż $c\tau/2$ a także nie ma innych powodów przeciągania impulsów - między impulsami ech jest przerwa i można rozróżnić dwa CELE.

2.4. Rozdzielczość poprzeczna echolokatora

Rozdzielczość poprzeczna echolokatorów: liniowa, kątowa – wiąże się bezpośrednio z kształtem charakterystyk kierunkowych anten echolokatorów (przetworników, głowic – ogólnie tzw. apertur) przy nadawaniu i odbiorze sygnałów sondujących czy też kształtami przekrojów pionowych i poziomych charakterystyk w przestrzeni ośrodka propagacji.

W bezpośredniej bliskości przetwornika (anteny, głowicy – ogólnie tzw. apertury nadawczej) czyli w tzw. **polu bliskim** (zwanym także strefą Fresnela) drgającej harmonicznym powierzchniami fala rozchodzi się w objętości cylindra, którego podstawą jest przetwornik.



Rozkład ciśnienia na osi akustycznej przetwornika w polu bliskim i dalekim (a) i przekrój objętości, w której rozprzestrzenia się fala akustyczna (b).

W przekroju podłużnym cylindrycznego pola bliskiego istnieje zatem **stała rozdzielczość liniowa** echolokatora – można rozdzielić dwa cele jeśli są oddalone od siebie więcej niż wymiar średnicy cylindra.

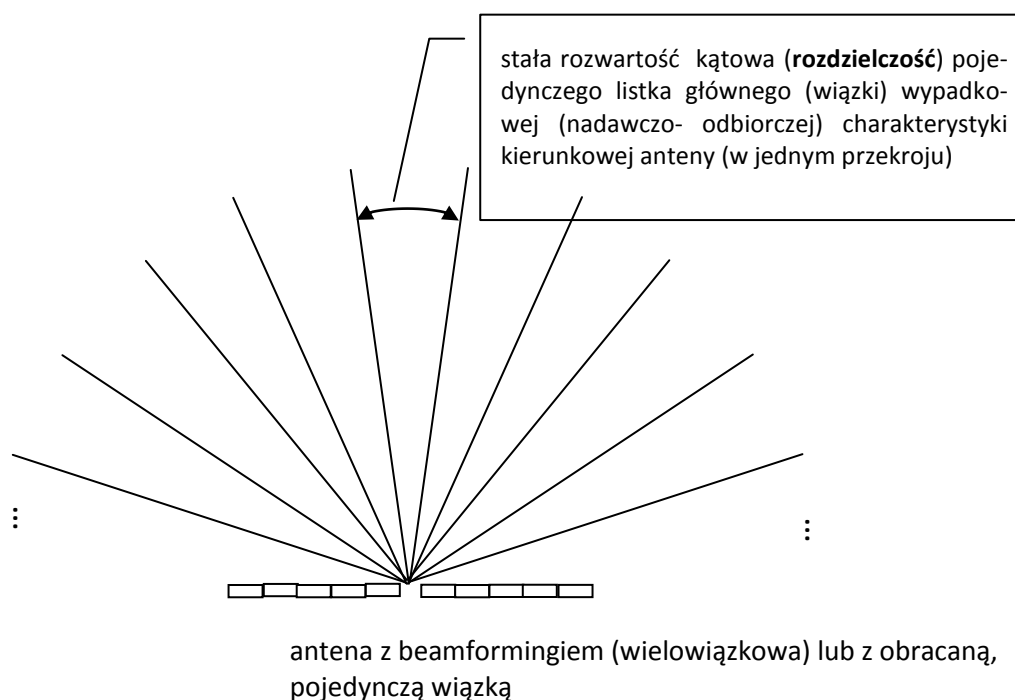
Inna sprawa to możliwość wykorzystania pola bliskiego do echolokacji ze względu na zmienność pola akustycznego w tej strefie. Otóż, gdy przy czysto harmonicznym pobudzeniu zmierzyć rozkład ciśnienia akustycznego oddalając się od przetwornika wzdłuż osi cylindra (osi akustycznej) okaże się, że występuje wiele maksimów i minimów zmierzonych wartości ciśnień (rys.1a). Te częste zmiany są wynikiem interferencji fal wytwarzanych przez każdy z punktów powierzchni drgającej w warunkach szybkich zmian geometrii układu, a więc szybkich zmian relacji fazowych między falami wytwarzanymi przez poszczególne punkty powierzchni przetwornika. W obliczu takiego „bałaganu polowego” strefa ta nie daje się, w przedstawionej w sytuacji pobudzania przetwornika harmonicznym, długim - a więc wąskopasmowym - sygnałem, do wykorzystania w celu uzyskania porządnego zobrazowania ultrasonograficznego. Szczęśliwie, w przypadku stosowania krótkich impulsów sondujących o szerokim widmie częstotliwościowym warunki interferencji w polu bliskim psują się, w związku z czym następuje wygładzenie zmienności ciśnienia.

Możliwością uporządkowania pola bliskiego jest wprowadzenie **ogniska** (dzięki soczewce fizycznej lub metodami elektronicznymi), co jest stosowane, wraz z technologią elektronicznej zmiany ogniskowej, w ultrasonografii a jest szczegółowo opisane w [2].

Inną metodą utrzymania quasi stałej rozdzielczości liniowej jest praca w polu dalekim z przełączaniem w trakcie odbioru sygnałów echa liczby elementów apertury a przez to zawężanie kąta rozwarcia przekroju wiązki z dalszych odległości (zawężanie kąta), przez co rozdzielczość liniowa może zmieniać się niewiele. Można tak robić wtedy, gdy szczególnie zależy nam na stałej rozdzielczości liniowej, jednak realizacja jest zawiła i stosowana niekiedy w sonarach bocznych.

Jeśli nie stosować soczewkowania w polu bliskim naturalną strefą pracy echolokatora jest pole dalekie z uporządkowanym, choć malejącym z odległością ciśnieniem akustycznym i **ze stałą rozdzielczością kątową przekroju wiązki**. Pole dalekie, rozpoczyna się od odległości N ostatniego maksimum ciśnienia, np. dla przetwornika kołowego:

$N = D^2/4\lambda$ gdzie D jest średnicą przetwornika a λ długością fali w ośrodku rozprzestrzeniania się fali.



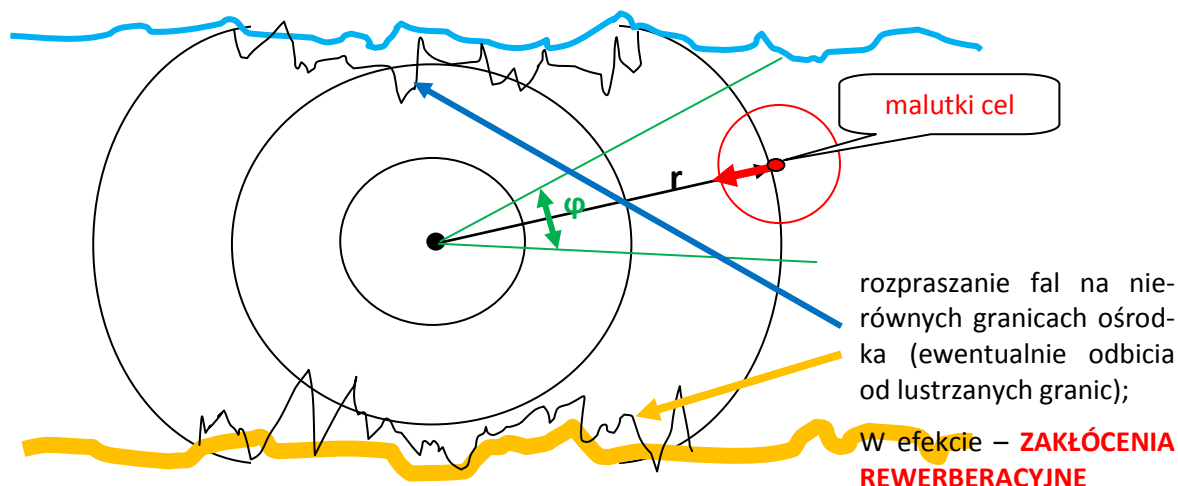
Stała rozdzielczość kątowa echolokatora

By wyeliminować ze strefy pomiarowej pole bliskie można wstawić między powierzchnię przetwornika a ośrodek badany warstwę pośredniczącą, w której zawrze się pole bliskie, zaś ośrodek znajdzie się w strefie dalekiej.

W rzeczywistości granice wiązek nie są wyraźne – definiuje się je np. na poziomie -3dB w stosunku do maksimum (osi akustycznej) wiązki, opisywanej dla przekroju przetwornika prostokątnego (linii) funkcją typu $\sin x/x$.

2.5. Straty transmisyjne sygnałów & zasięgowa regulacja wzmocnienia ZRW w echolokacji

Dla celów niewielkich (skupionych) względem rozwarcia wiązki nadawczo – odbiorczej echolokatora:



Malejące ciśnienie akustyczne przy transmisji w jedną stronę (powierzchnia kuli na której rozkłada się moc rośnie z kwadratem odległości od nadajnika - promienia r):

$$p_a(r) \approx p_N \frac{1}{r^2} \cdot e^{-\alpha r}$$

W dwie strony (do celu i z powrotem):

$$p_{a2}(r) \approx p_N \frac{1}{r^4} \cdot e^{-2\alpha r} \quad \alpha[1/m]$$

W mierze decybelowej – straty transmisyjne (TL - transmission losses):

$$TL [dB] = 20 \log r + \alpha r \quad \alpha[dB/km]$$

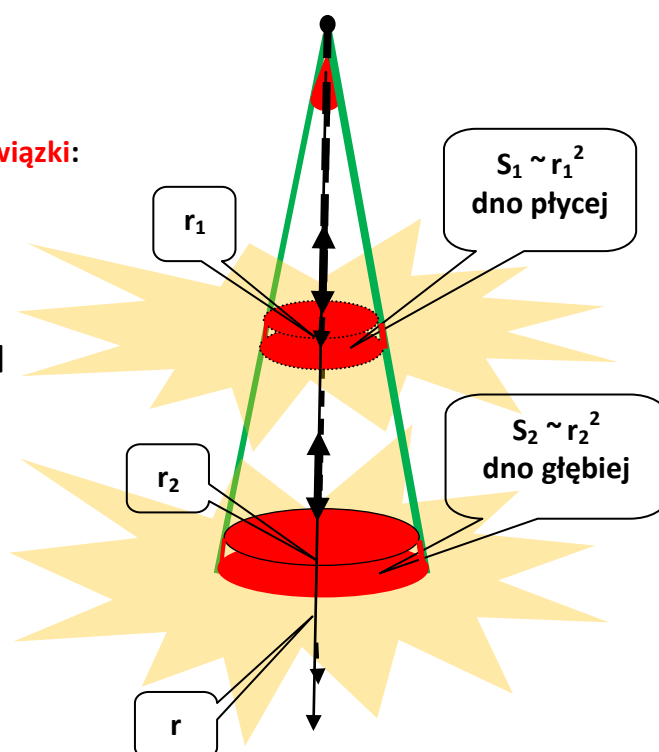
W dwie strony:

$$TL_2 [dB] = 40 \log r + 2\alpha r$$

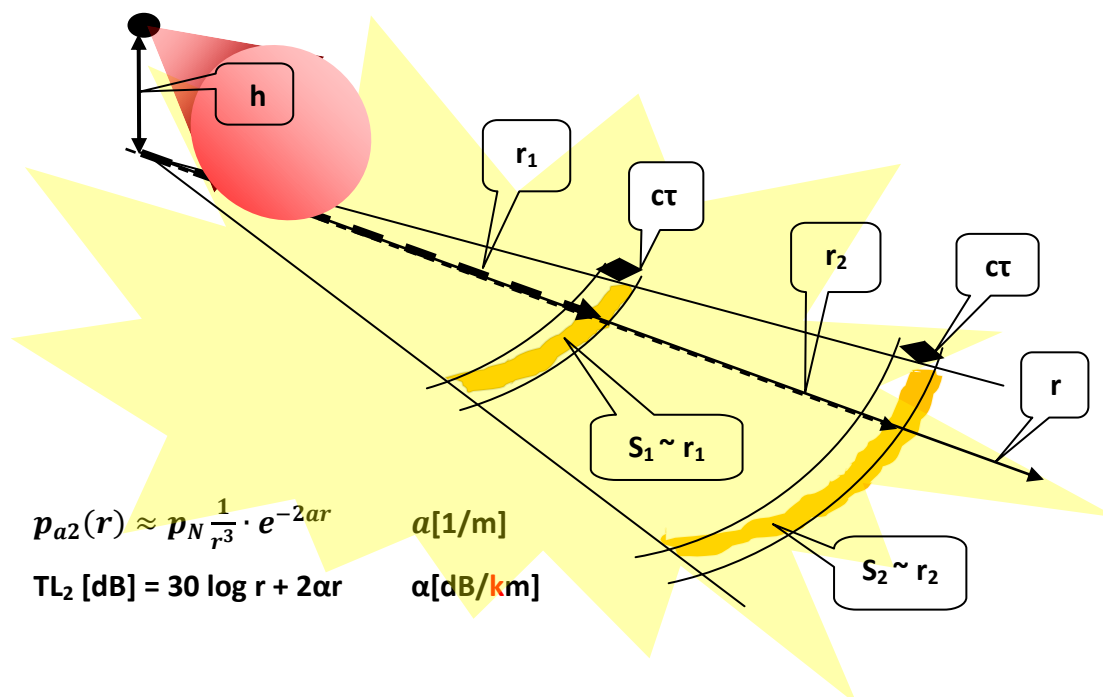
Dla celów rozleglejszych niż przekrój wiązki:

$$p_{a2}(r) \approx p_N \frac{1}{r^2} \cdot e^{-2\alpha r} \quad \alpha[1/m]$$

$$TL_2 [dB] = 20 \log r + 2\alpha r \quad \alpha[dB/km]$$

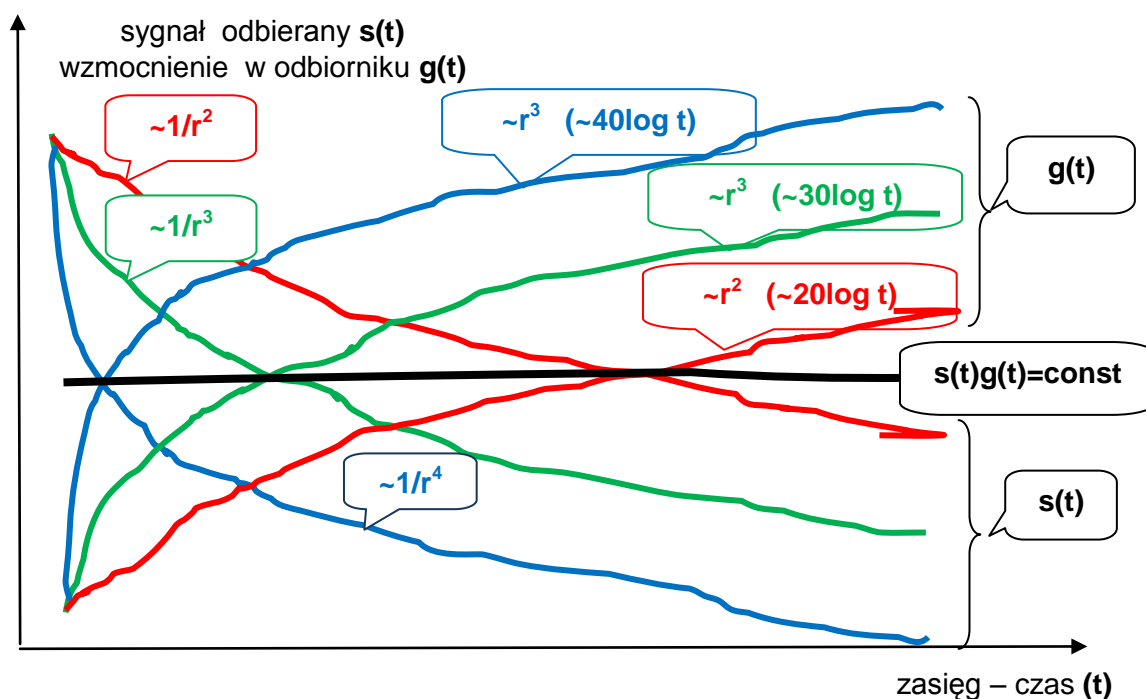


Dla celów obserwowanych ukośnie (sonary boczne, rewerberacje denne lub powierzchniowe):



i stąd:

ZRW - zasięgowa regulacja wzmacnienia w torach odbiorczych echolokatorów (ang. TVG- Time Variable Gain), której celem jest kompensacja strat transmisyjnych sygnałów przez regulowanie wzmacnieniem w torze odbiorczym (podwyższaniem wzmacnienia wg stosownej funkcji zależnej od formy strat transmisyjnych):



2.6. Ugięcia tras propagacji dźwięku wskutek zmian prędkości wywołanych rozwarstwieniami termicznymi lub strukturalnymi ośrodka

Mechanizm ugięć:

