

NEDERLANDS AKOESTISCH GENOOTSCHAP

NIET-LINEAIRE AKOESTIEK

Ir. H.A.J. Rijnja

Physisch Laboratorium TNO, 's-Gravenhage

NON-LINEAR ACOUSTICS

Summary

Because the speed of sound under water depends on the pressure, a sinusoidal pressure wave with a high amplitude will be distorted while it propagates through the water.

When two strong sound waves with different frequencies interact, mutual modulation occurs, causing sum- and difference frequencies.

Because the absorption of sound energy under water is higher for higher frequencies, eventually a sound wave with the difference frequency remains.

In this way it is possible to generate a low frequency sound wave in a narrow beam without side lobes, using a relatively small transducer.

The efficiency however is very low.

1. Inleiding

De term "niet-lineaire akoestiek" zou de indruk kunnen wekken dat er naast de gewone akoestiek, waarvan het toevoegsel "linear" gemakshalve maar wordt weggelaten, ook een niet-lineaire tak van deze wetenschap zou bestaan.

Dit is niet waar.

Alle akoestische verschijnselen verlopen niet-lineair. De niet-lineaire termen zijn echter gewoonlijk zo klein dat men ze mag verwaarlozen.

In deze voordracht zullen die gevallen worden behandeld waarbij de niet-lineaire effecten een belangrijke rol spelen in de akoestiek.

2. Niet-lineairiteit

Een geluidsgolf is een drukverstoring die zich met een eindige snelheid in een elastisch medium voortplant. Deze snelheid is van vele factoren afhankelijk, onder andere ook van de druk zelf. Dit heeft tot gevolg dat de golftoppen, waar de druk het hoogste is, zich met een andere snelheid voortplanten dan de golfdalen. Hierdoor wordt de oorspronkelijke golfvorm geleidelijkaan gedeformeerd. Deze deformatie gaat sneller naarmate de amplitude van de golf groter is.

Nu zijn de amplituden van geluidgolven in lucht gewoonlijk klein ten opzichte van de heersende, atmosferische druk. Een geluidniveau van 120 dB re $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$, wat zo sterk is dat het de pijngrens benadert, gaat gepaard met een wisseldruk-amplitude van 28 Pa. Dit is een factor 3500 kleiner dan de atmosferische druk, die gelijk is aan ongeveer 10^5 Pa . In het algemeen zijn dus de drukvariaties in een geluidsgolf in lucht zo klein ten opzichte van de heersende druk, dat niet-lineaire effecten verwaarloosd mogen worden.

Onder water is de situatie anders. SONAR-signalen bijvoorbeeld, waarmee men onderzeeboten opspoort, worden uitgezonden met een zo hoog mogelijk geluidniveau teneinde een zo groot mogelijke reikwijdte te kunnen behalen. De bovengrens voor dit geluidniveau wordt bepaald door het optreden van cavitatie. Hierbij is de piekwaarde van de geluiddruk vlak vóór de transducent ongeveer gelijk aan de hydrostatische druk. In dit geval zullen de niet-lineaire effecten zo sterk zijn dat er rekening mee gehouden moet worden.

In deze voordracht zal ik met u behandelen:

- de niet-lineairiteit van water als akoestisch medium,
- hoe men daar een nuttig gebruik van kan maken,
- wat de beperkende factoren zijn,
- en tenslotte de experimenten die door het Fysisch Laboratorium TNO op dit gebied zijn uitgevoerd.

3. Niet-lineaire effecten in water

3.1 Verzadiging

De snelheid waarmee geluid zich onder water voortplant wordt gegeven door:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

waarin k de compressiemodulus van water is en ρ de dichtheid.

Nu zijn zowel k als ρ afhankelijk van de druk, en wel in die mate dat bij een drukverhoging van 1 atmosfeer de geluidssnelheid met 0,012% toeneemt:

$$c = (1500 + 0,18 p) \text{ m/s}$$

waarin p de druk voorstelt in atmosfeer.

Dit betekent dat bij een vlakke lopende sinusvormige geluidsgolf, die een amplitude heeft van 1 atmosfeer, na één periode de golftop 12×10^{-5} golflengte vooruit gelopen is op de nuldoorgangen en dat het golfdal over dezelfde afstand achter loopt. Na ruim 2000 perioden is het wegverschil tussen de toppen en de nuldoorgangen $1/4$ golflengte geworden, wat betekent dat de sinusgolf in een zaagtand is overgegaan. Zie figuur 1.

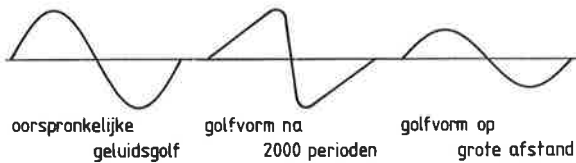


fig. 1 Vervorming van een sinusvormige geluidsgolf door een drukafhankelijke geluidssnelheid.

Er worden dus onderweg harmonischen van de grondgolf gegenereerd.

Nu neemt de absorptie van geluid onder water toe met ongeveer het

kwadraat van de frequentie. Zie figuur 2. Het gevolg is dat de eerste

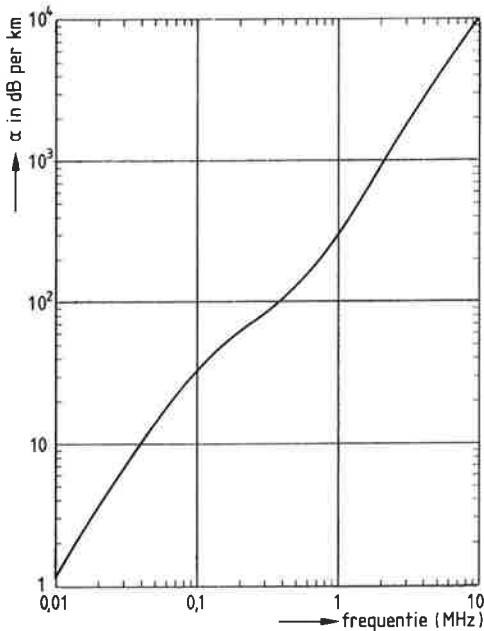


fig. 2 Geluidabsorptie in zeewater als functie van de frequentie.

harmonische een ongeveer viermaal zo sterke demping ondergaat dan de grondgolf. Voor de tweede harmonische wordt dit een factor 9, enzovoorts. Op den duur zullen dus alle harmonischen weer verdwijnen en blijft alleen de grondgolf over, waarvan de amplitude gedaald is, niet alleen door demping en spreiding van het geluid, maar ook door energieverlies in de hogere harmonischen.

Verhoging van de originele geluiddruk veroorzaakt meer harmonischen, waardoor dit effect zodanig wordt versterkt dat boven een bepaalde grens de amplitude van de sinusvormige golf op grote afstand niet meer toeneemt. Dit noemt men "verzadiging" van het medium.

3.2 Modulatie

Het ontstaan van hogere harmonischen kan beschreven worden als een kwadratische term in de golfvergelijking, vergezeld van eventuele hogere-machtstermen. Het is uit de wisselstroomtheorie bekend dat in dit geval sommatie van twee golven leidt tot product-termen.

Wanneer men dus twee vlakke lopende geluidgolven met grote amplitude door hetzelfde stuk medium stuurt dan ontstaat niet alleen de som van die twee golven, maar ook hun product en verder nog een aantal harmonischen en hun onderlinge producten.

Als nu beide golven een verschillende frequentie hebben geeft dit aanleiding tot het optreden van golven met frequenties die gelijk zijn aan de som en aan het verschil van de originele frequenties en veelvoud daarvan. Als die twee originele frequenties dicht bijeen liggen is alleen de verschilfrequentie laag en zijn alle andere frequenties veel hoger. Tengevolge van de demping van geluid onder water, die toeneemt met de frequentie, sterven alle golven met hogere frequenties snel uit en blijft op den duur alleen de verschilfrequentie over.

Volgens dit principe, waarbij een laagfrequente geluidgolf wordt gegenereerd uit twee hoogfrequente golven, werkt de parametrische SONAR, die enkele interessante eigenschappen bezit.

4. Parametrische SONAR

Veronderstel dat beide frequenties door één vlakke transducent worden uitgezonden. Het geluid, afkomstig van een dergelijke bron, wordt dan gebundeld binnen een ruimtehoek waarvan de doorsnede in radialen ongeveer gelijk is aan de verhouding tussen de golflengte van het geluid λ en de breedte van de bron b , volgens:

$$2\theta = \frac{\lambda}{b} \text{ rad}$$

Zie figuur 3.

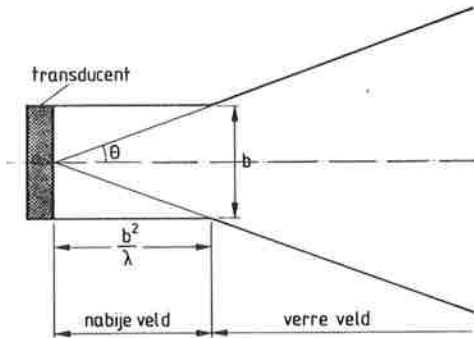


fig. 3 Begrenzing van de geluidbundel van een vlakke transducent.

Vlak vóór de bron heerst het zogenaamde "nabije veld" waarvan de structuur tamelijk ingewikkeld is en dat zich uitstrekt over een afstand L die gegeven wordt door:

$$L = \frac{b^2}{\lambda}$$

Voorbij deze afstand spreekt men van het verre veld, waarin de geluidgolven zich bolvormig uitbreiden, in hoofdzaak binnen de ruimtehoek met doorsnede 2θ . Als nu de afmetingen van de transducent groot zijn ten opzichte van de beide primaire golflengten, dan worden de signalen uitgezonden binnen een betrekkelijk nauwe bundel. In het nabije veld treden interferenties op tussen beide signalen, waardoor maxima en minima van de drukamplitude ontstaan.

De afstand tussen twee opeenvolgende maxima is juist een halve golflengte bij de verschilfrequentie. Deze maxima liggen op één lijn op de as van de geluidbundel en zij fungeren als een rij van puntbronnen in een zogenaamd "endfire array". Omdat er eigenlijk geen reële puntbronnen aanwezig zijn noemt men dit endfire array "virtueel".

Op deze wijze wordt laagfrequent geluid in de asrichting uitgezonden binnen een zeer nauwe bundel, waarvan de openingshoek afhankelijk is van de effectieve lengte van het virtuele endfire-array en de sterk-

te afhangt van het aantal werkzame virtuele bronnen.

Deze lengte wordt bepaald door de mate van absorptie van de oorspronkelijke (hoogfrequente) golven. Naarmate de amplitude van deze primaire golven op hun weg door het water zwakker worden door absorptie en door spreiding van het geluid in het verre veld, neemt ook de sterkte van de virtuele bronnen af, tot hun bijdrage verwaarloosbaar klein geworden is.

Als de primaire frequenties lager worden gekozen neemt de absorptie in het water af en wordt de effectieve lengte van het virtuele endfire-array dus groter. Deze lengte is dus sterk afhankelijk van de gemiddelde primaire frequentie.

Het aantal werkzame virtuele bronnen over die lengte wordt daarbij bepaald door het frequentie-verschil tussen de beide primaire signalen: Naarmate dit verschil kleiner wordt, wordt de afstand tussen twee opeenvolgende bronnen groter en neemt dus het totale aantal werkzame bronnen af, want de totale lengte van het array blijft gelijk.

Dit heeft tot gevolg dat de sterkte van het secundaire (laagfrequente) geluid afneemt als de frequentie daarvan lager wordt.

Kiezen we echter de primaire frequenties ook lager, dan wordt het endfire-array langer en neemt het aantal werkzame bronnen toe, waardoor het secundaire geluid weer sterker wordt.

Het is dus voordelig om de primaire frequenties zo laag mogelijk te kiezen. De ondergrens daarvoor wordt bepaald door de toelaatbare afmetingen van de transducent en door de bandbreedte daarvan: Om beide primaire signalen nog met een hoog rendement te kunnen uitzenden moeten de primaire frequenties binnen de resonantie-bandbreedte van de transducent vallen. Voor de meeste transducenten is deze bandbreedte niet groter dan $1/4$ van de resonantie-frequentie, zodat dus de primaire frequenties minstens een factor 4 hoger moeten zijn dan de verschil-frequentie.

Het verloop van het geluidpeil op de as van de transducent met toenemende afstand wordt geschetst in figuur 4.

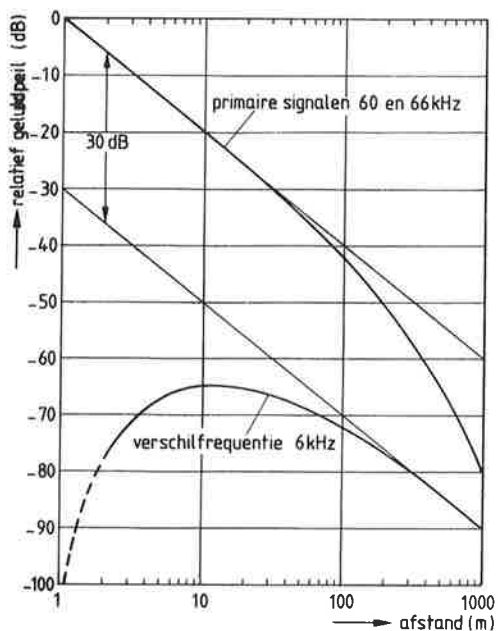


fig. 4 Afname van het relatief geluidpeil van de beide primaire signalen en van het secundaire signaal, als functie van de afstand tot de transducent.

Het peil van de primaire signalen, met frequenties van bijvoorbeeld 60 en 66 kHz, daalt aanvankelijk tengevolge van de bolvormige uitbreiding, met 6 decibel per verdubbeling van afstand. Na ongeveer 30 meter begint het geluidpeil sterker te dalen tengevolge van absorptie die bij deze frequenties ongeveer 20 dB/km bedraagt.

Het secundaire geluidpeil met een frequentie van 6 kHz is aanvankelijk nog zeer zwak, maar groeit met toenemende afstand zolang het virtuele endfire-array nog werkzaam is. Op een afstand, die hier geschat is op 100 meter, neemt de bolvormige uitbreiding ook voor dit signaal de overhand. De absorptie bij 6 kHz is slechts 0,5 dB/km, zodat deze factor nog niet tot uiting komt in deze figuur.

Hoewel in dit voorbeeld het conversie-rendement op -30 dB werd gesteld,

zal op afstanden groter dan 2 km het secundaire geluidpeil sterker zijn dan het primaire.

5. Eigenschappen van parametrisch opgewekt geluid

5.1 Hoewel de afmetingen van de transducent niet groot zijn ten opzichte van de secundaire golflengte kan toch de bundelbreedte zeer smal zijn.

5.2 De zijlobben van het richtingsdiagram zijn gewoonlijk zeer laag. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de amplitude van de virtuele bronnen in het endfire-array geleidelijk kleiner wordt naarmate de afstand tot de transducent toeneemt. Theoretisch kan worden aangetoond dat een zuivere lijnvormige endfire bron met exponentieel afnemende amplitude geen zijlobben vertoont. Door de eindige afmetingen van de transducent bestaat het virtuele endfire-array niet uit puntbronnen, terwijl door de overgang van nabij veld naar ver veld en door de hogere-machts-termen in het modulatieproces de afname van de bronamplitude niet zuiver exponentieel verloopt. Hierdoor worden de zijlobben niet volledig onderdrukt. Experimenteel kon worden aangetoond dat zijlobben met een niveau lager dan -40 dB t.o.v. de hoofdbundel gerealiseerd kunnen worden.

5.3 Het is mogelijk om zeer korte geluidsignalen te genereren zonder hinderlijke inschakelverschijnselen.

De ervaring leert dat onderwater-transducenten slecht reageren op korte signalen. Al schakelt men het signaal in en uit bij de nuldoorgangen van de spanning, door de complexe impedantie van de transducent vertoont de stroom dan toch een inschakelpiek die men over de eerste perioden terugvindt in het verloop van de wisseldruk in het water.

De parametrische transducent vertoont weliswaar hetzelfde effect bij de primaire frequenties, maar door het frequentie-verschil zijn de inschakelverschijnselen verschillend voor beide frequenties. Bovendien verdwijnt het effect na enkele primaire perioden.

Door de veel lagere verschilfrequentie beslaat het inschakelverschijnsel dan slechts een fractie van één secundaire periode, zodat men het

nauwelijks waarneemt.

Het is op deze wijze zelfs mogelijk om een geluidstoot te genereren die korter duurt dan één periode, als men dat zou willen, zonder dat de gave sinusvorm van het signaal merkbaar wordt aangetast.

Korte geluidsignalen zijn wenselijk bij toepassing in een SONAR met een hoog oplossend vermogen in afstand.

5.4 De bandbreedte van de uitgezonden signalen kan zeer groot zijn, zonder dat resonantie-verschijnselen van de transducent de frequentie-karakteristiek verstoren en zonder dat de bundelbreedte aanmerkelijk varieert.

Dit laatste kan worden bereikt als men van de beide primaire frequenties de laagste constant houdt en alleen de hoogste varieert om een variabele verschilfrequentie te verkrijgen. Met de verschilfrequentie verandert dan ook de gemiddelde primaire frequentie, wat compenserend werkt op de variatie van het aantal werkzame virtuele bronnen als functie van de verschilfrequentie.

5.5 Als nadeel moet tenslotte genoemd worden dat het rendement van de energieomzetting laag is. Het grootste deel van de uitgezonden hoogfrequente energie gaat door absorptie in het water verloren, en slechts een klein gedeelte wordt omgezet in laagfrequent geluid. Het conversierendement is in de meeste gevallen kleiner dan 0,1%.

De voordelen van de parametrische geluidbron worden dus duur betaald.

6. Parametrische ontvanger

Het principe van reciprociteit, dat zoveel toepassingen kent in de akoestiek, is ook geldig voor de parametrische geluidbron.

Op dezelfde wijze waarop een laagfrequente geluidbundel kan worden opgewekt door niet-lineaire interactie van twee hoogfrequente signalen, kan men een laagfrequent signaal in het water opvangen door deze te laten interfereren met een sterke hoogfrequente golf. Daartoe plaatsen we een zogenaamde "pomptransducent" op enige afstand tegenover

een hydrofoon. De pomptransducent genereert een sterk hoogfrequent signaal met frequentie F . Wanneer nu een zwakke laagfrequente golf met frequentie f in dezelfde richting loopt wordt door niet-lineaire interactie de hoogfrequente golf hiermede gemoduleerd, zodat naast de oorspronkelijke frequentie F zijbanden ontstaan met de frequenties $F - f$ en $F + f$.

In de ontvanger moet de sterke draaggolf met frequentie F worden onderdrukt om de amplitude van de zijbanden te kunnen detecteren.

De parametrische ontvanger heeft dezelfde voordelen als de parametrische zender: Met een kleine hydrofoon wordt over een breed frequentiegebied een scherpe bundel verkregen zonder zijlobben.

Er zijn echter ook grote nadelen:

1. De pomptransducent moet op een afstand, die overeenkomt met de lengte van het virtuele endfire-array, vóór de hydrofoon geplaatst worden, in de richting waarin men luisteren wil. Dit vereist een dermate uitgebreide opstelling dat het voordeel van de kleine hydrofoon hierdoor teniet wordt gedaan.
2. Door allerlei fluctuaties, zoals mechanische trillingen van het systeem, stroming van het water en temperatuursverschillen spreidt de pompfrequentie zich uit over de naburige zijbanden, waardoor een storend achtergrondsignaal ontstaat.

Het nut van de parametrische ontvanger wordt daarom tot nu toe nog sterk betwijfeld.

7. De praktijk

Uit diverse publicaties van andere laboratoria zijn enkele resultaten van berekeningen en metingen overgenomen die hier worden weergegeven.

Figuur 5 toont het secundaire geluidpeil en de bundelbreedte als functie van de frequentie, voor een bron van 2,5 meter breed, die een vermogen van 200 kilowatt uitzendt bij een frequentie van 20 kHz.

De primaire bundel is 1.9° breed.

Naarmate het verschilfrequentie lager wordt neemt het geluidpeil af en

neemt de bundelbreedte toe, als gevolg van het afnemend aantal virtuele puntbronnen. Over één frequentie-decade, van 400 tot 4000 Hz, neemt het conversie-rendement toe van -50 tot -20 dB en daalt de bundelbreedte van 6° tot $2,5^\circ$.

Extrapolatie van beide curven voert dicht in de buurt van primair geluidpeil en bundelbreedte.

Een soortgelijk effect wordt geconstateerd met een bron van 5 meter breed die een vermogen van 60 kilowatt uitzendt bij een frequentie van 6500 hertz in een bundel van $2,6^\circ$ breed. Zie figuur 6.

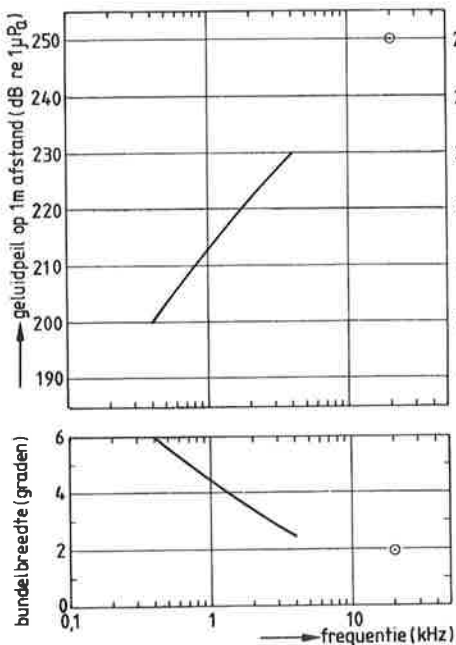


fig. 5

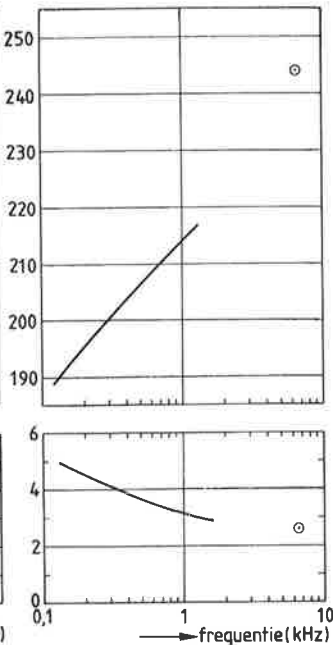


fig. 6

Bronsterkte en bundelbreedte als functie van de secundaire frequentie.

8. Eigen experimenten

Het Fysisch Laboratorium vervaardigde zelf een transducent voor een frequentie van ongeveer 200 kHz. Zie figuur 7. Deze transducent

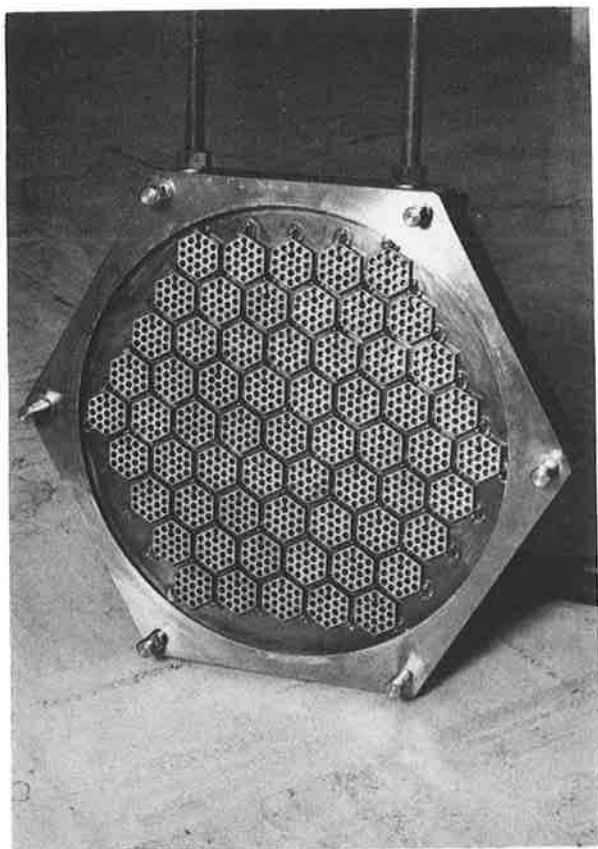


fig. 7 Transducent voor 200 kHz, vervaardigd door het Fysisch Laboratorium TNO, type 61ZE200.

is opgebouwd uit 61 zeshoekige schijven loodzirconaat, voorzien van

gaatjes en volgelingen met polyuretaanhars. De bandbreedte van deze transducent bedraagt ruim 50 kHz.

Bij 200 kHz is de bundelbreedte $1,5^\circ$ wat overeenkomt met de diameter van de transducent die gelijk is aan ongeveer 40 golflengten van $7,5 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$. Het nabije veld van deze transducent strekt zich bij deze frequentie uit over een lengte van 12 meter.

De figuren 8 en 9 geven de primaire richtingsdiagrammen bij 175 en 200 kHz. Deze metingen werden uitgevoerd in het nabije veld, op een afstand van 6 meter. Als gevolg daarvan toont de hoofdlob van beide diagrammen enkele sprongetjes die op grotere afstand verdwijnen.

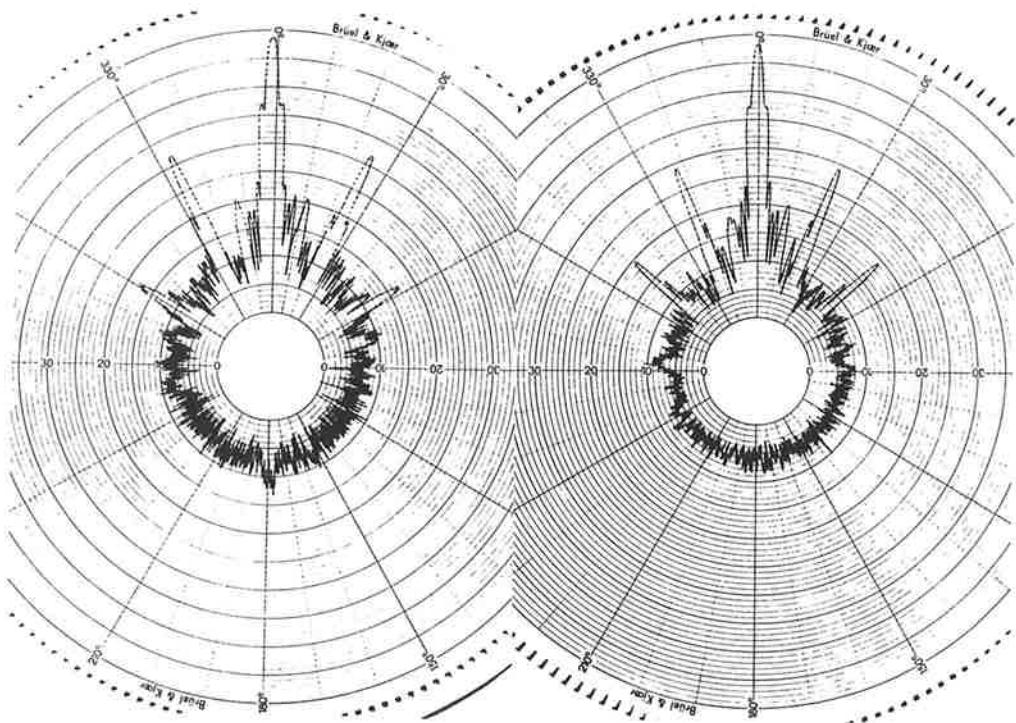


fig. 8 Richtingsdiagram van transducent 61ZE200, bij 175 kHz gemeten op een afstand van 6 meter.

fig. 9 Richtingsdiagram van transducent 61ZE200, bij 200 kHz, gemeten op een afstand van 6 m.

De secundaire bundel, met een frequentie van 25 kHz en eveneens gemeten op een afstand van 6 meter, wordt getoond in figuur 10. Het blijkt dat de zijlobben reeds sterk onderdrukt zijn.

Een beter beeld geeft figuur 11, gemeten bij dezelfde frequentie op een afstand van 21 meter. Hier zijn de zijlobben gedaald tot onder -40 dB ten opzichte van de hoofdbundel.

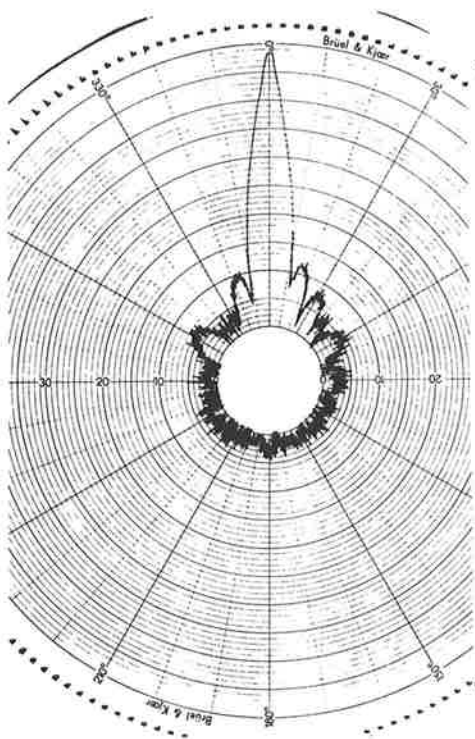


fig. 10 Secundair richtingsdiagram met een frequentie van 25 kHz, gemeten op een afstand van 6 m.

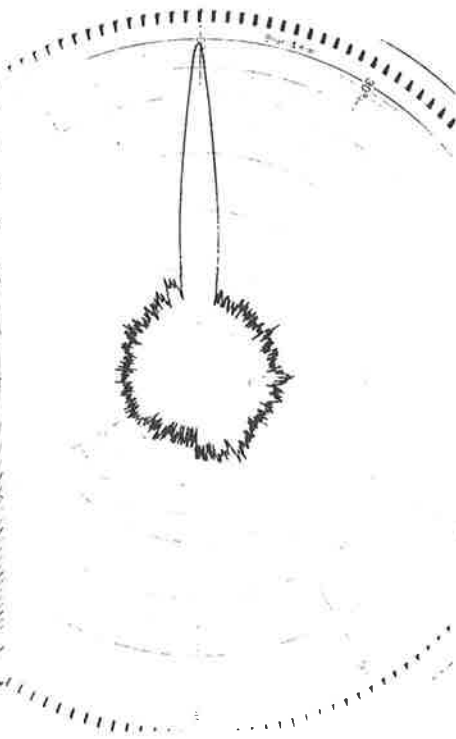


fig. 11 Secundair richtingsdiagram met een frequentie van 25 kHz, gemeten op een afstand van ruim 21 m.

Figuur 12 geeft tenslotte het verloop van de geluidsdruk langs de as van deze transducent, zowel voor de beide primaire frequenties (in dit geval 185 en 210 kHz) als voor de secundaire frequentie van 25 kHz.

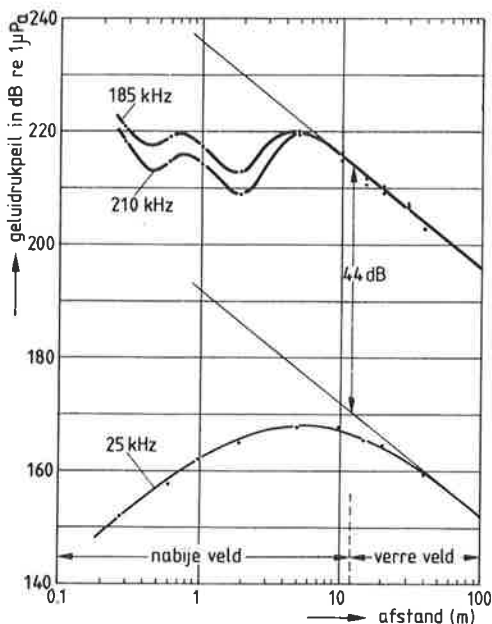


fig. 12 Geluidpeil op de as van de transducent 61ZE200 voor de primaire frequenties van 185 en 210 kHz en voor de secundaire frequentie van 25 kHz, als functie van de afstand tot de transducent.

Uit deze krommen volgt een conversie-rendement van -44 dB, wat gelijk is aan 0,004%.

De beide primaire signalen werden elk uitgezonden met een akoestisch vermogen van ongeveer 200 watt. Dit vermogen bleek dicht tegen de cavitatiegrens aan te liggen, want in het nabije veld werd op 30 cm afstand vóór de transducent een geluidsdruk gemeten van 220 dB re 1 μPa, wat overeenkomt met een druk van 1 atmosfeer.

9. Problemen

Ik wil deze voordracht besluiten met een opsomming van enkele problemen waarmede wij tijdens de experimenten werden geconfronteerd. Door niet-lineairiteit van de eindversterker treedt ook hierin modulatie op tussen de beide primaire frequenties, zodat aan de transducent bovendien reeds de verschilfrequentie in elektrische vorm wordt aangeboden, die dan ook wordt uitgezonden. Al is de amplitude hiervan klein, en al heeft de transducent bij die verschilfrequentie een laag rendement, de amplitude van het parametrisch opgewekte laagfrequente signaal is zo klein, vooral buiten de hoofdbundel, dat de bijdrage van het elektrische modulatieproduct niet verwaarloosbaar is. Voor deze lage frequenties heeft de transducent een breed richtingsdiagram, zodat de scherpte van de parametrisch gegenereerde bundel, vooral aan de voeten daarvan, lelijk wordt bedorven. Zie figuur 13.

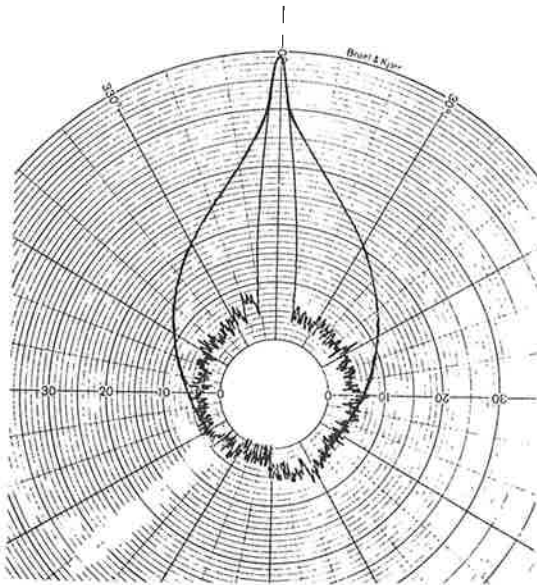


fig. 13 Secundair richtingsdiagram bij 25 kHz, wanneer de transducent gevoed wordt door een niet-lineaire eindversterker.

Wij hebben dit probleem opgelost door de transducent te voeden door twee gescheiden versterkers, elk met een vermogen van 1400 watt, die beide via weerstanden met de transducent werden gekoppeld. In deze weerstanden ging weliswaar een aanzienlijk deel van het beschikbare vermogen verloren, maar voor de proefnemingen was dat geen bezwaar.

Een meer elegante oplossing kan worden gevonden door toepassing van een (kostbare) lineaire versterker, door tussenschakeling van een selectief bandfilter tussen versterker en transducent, of door de transducent als een schaakbord in twee afzonderlijk gevoede delen te splitsen.

10. Toepassingen

De mogelijke toepassingen van parametrische SONARs liggen op die gebieden waar een hoge ruimtelijke resolutie wordt vereist, zoals bij het in kaart brengen van details van de zeebodem, het inspecteren van dammen en dijkvoeten onder water en als geleide-hulp voor duikers in troebel water.

De scherpe bundel, de korte zendpuls en de mogelijkheid om de frequentie over een ruim gebied te wijzigen zijn hierbij van groot voordeel. Het lage rendement hoeft voor deze toepassingen geen overwegend bezwaar te zijn.

11. Samenvatting

Aangetoond werd hoe het principe van niet-lineaire interactie van twee samenlopende geluidgolven kan worden toegepast voor het opwekken van zeer korte geluidsignalen onder water binnen een zeer nauwe bundel, met een frequentie die nog niet in sterke mate door het water wordt geabsorbeerd, en met behulp van een transducent met hanteerbare afmetingen. Aan de lineairiteit van de eindversterker worden zware eisen gesteld.

Een ontvanger die op hetzelfde principe berust heeft nog zoveel nadelen dat het praktische nut daarvan twijfelachtig is.

ONDERWATERAKOESTIEK

**een bijeenkomst gehouden op
9 maart 1977 te 's-Gravenhage**

NEDERLANDS AKOESTISCH GENOOTSCHAP

**PUBLIKATIE NR. 41
juli 1977**

ONDERWATERAKOESTIEK

<u>INHOUD</u>	PAGINA
HISTORISCHE ONTWIKKELING OP HET GEBIED VAN GELUID ONDER WATER M. W. van Batenburg	1
NIET-LINEAIRE AKOESTIEK H. J. A. Rijnja	11
AKOESTISCHE DEBIETMETING IN HET BUITENWATER Ch. J. M. Wolff	29
BODEM INSPECTIE ONDER WATER MET EEN ACOUSTISCHE INTERFEROMETER A. J. van der Steld	41

Uitgave: Nederlands Akoestisch Genootschap
Postbus 162, Delft
juli 1977

© Alle rechten voorbehouden