
Onderwater -
Radio Communicatie

Onderwater- radio communicatie

Voorwoord:

In het behandelen van propagatie hebben we een paar weinig bekende terreinen nog niet besproken zoals onderwater- en ondergrondse radio (cave radio) communicatie. Onderwater radio communicatie zal hier eerst behandeld worden waarna op een later tijdstip ondergrondse radio communicatie aan bod komt. Elektromagnetische propagatie doorheen water is zeer verschillend van propagatie doorheen lucht, te wijten aan de hoge permittiviteit en elektrische geleidbaarheid en heeft een betekenisvolle impact op de refractiehoek bij het grensvlak lucht/water. Daar de relatieve permeabiliteit gelijk is aan 1, is er praktisch weinig effect op het magnetisch veldcomponent. Verliezen zijn groot, te wijten aan het effect van de geleidbaarheid op het elektrisch veldcomponent.

Onderwater communicatie heeft een groot gebied van toepassingen inclusief op afstand bestuurd en zelfs autonome toestellen. Gangbare onderwater transmissietechnieken zijn geluidsgolven en laagfrequentie radiogolven voor lange afstanden. De snelheid van geluid in water is 1440m/s, maar resulteert in problemen met multi-path propagatie en lage bandbreedtes. Het gebruik van elektromagnetische technieken geeft dan weer problemen van damping of verzwakking te wijten aan de geleidbaarheid van water, en waarschijnlijk niet verwacht, dat atmosferische ruis hier een groter probleem is dan thermische ruis.

Alhoewel er voor bepaalde toepassingen met hogere frequenties (MHz) en dus hogere snelheden mogelijkheden zijn ("blue laser flashes"= laser communicatie satelliet), wordt er nog steeds gebruik gemaakt van lagere frequenties zoals VLF; ULF; en ELF. Maar zoals hierboven reeds vermeld is de bandbreedte een spelbreker om spraak over te brengen (zie de Nyquist frequentie: $2f_0$).

Als voorbeeld gebruiken de US Navy het systeem "Seafarer" dat werkt op 76Hz en het Russisch systeem "Zeus" dat op 82Hz werkt. Men verkrijgt hierdoor een zeer groot bereik dankzij de geleiding tussen de aarde en de ionosfeer, waarbij de atmosfeer zich gedraagt als een golfgeleider.

Multi-path propagatie in water omvat reflectie en refractie. Reflecties ontstaan wanneer de richting van het golffront verandert door overgang tussen twee verschillende mediums en het golffront terugkeert in het oorspronkelijk medium.

Refractie ontstaan wanneer golven van het ene medium overgaan in een ander medium waarbij de richting van de golf verandert. Dit resulteert in verschillende propagatie paths van de zender naar de ontvanger (zie fig. A).

d is het directe pad, d1 en d2 zijn mogelijks indirecte paden. Dit betekent dat het signaal dat d1 of d2 volgt, met verschillende tijden aankomt dan het directe pad (faseverschil, constructieve of destructieve interferentie). Dit resulteert ook in pulsspreiding, deze pulsspreiding beperkt data snelheid van transmissie en is oorzaak van mogelijke fouten.

De snelheid van elektromagnetische golven (EM) in vacuüm is 3×10^8 m/s. De snelheid van EM golven in water wordt beïnvloed door een factor $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, waarbij ϵ_r de relatieve permittiviteit, en μ_r de relatieve permeabiliteit is.

ϵ_r voor water bij beschouwende frequentie is ongeveer 80, μ_r is 1.

De snelheid van EM golven is aldus:

$$C_{\text{water}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{80.1}} = 3,33 \times 10^7 \text{ m/s}$$

Daaruit volgt dat de EM propagatie 9 keer trager is in water dan in lucht, dus ook de frequentie, de bandbreedte en de afmetingen van de antenne (met de voor de antenne dezelfde resultaten dan deze in de lucht) alsook de input impedantie van de antenne.

Daar het hier in wezen over de geleidbaarheid gaat wordt in de Amerikaanse literatuur alsook in de halfgeleiderindustrie al eenheid de **Mho/cm** gebruikt. De mho kan ook uitgedrukt worden als de omgekeerde hoofdletter van omega Ω . Daartegenover staat dat in de industrie de **Siemens/cm** gebruikt wordt, deze wordt normaal uitgedrukt in milli- of microSiemens omdat geleiding van 1S zeer groot is.

Er bestaat uiteraard een relatie tussen deze twee eenheden: neemt de geleidbaarheid met een factor 10 toe, dan vermindert de weerstand met dezelfde factor.

Elektrische geleidbaarheid (σ sigma) of soortelijke geleidbaarheid of conductiviteit is de eigenschap om elektrische stroom te geleiden en is uitgedrukt in Siemens/m. Deze elektrische geleidbaarheid is in feite de reciproke waarde (ofwel: één gedeeld door) van de soortelijke weerstand of resistiviteit van het materiaal:

$$\sigma = 1/\rho$$

σ (sigma) = de soortelijke geleidbaarheid in S/m
 ρ (rho) = de soortelijke weerstand van een materiaal

Hier is mho = siemens en de reciproke van ohm = $1/\Omega$

De geleidbaarheid of conductantie (G), eenheid Siemens van een materiaal is dus het omgekeerde van zijn weerstand $G = 1/R$

voorbeeld 1: de geleidbaarheid van een weerstand van 6Ω is $G = 1/(6\Omega) = 0,167S = 167mS$

voorbeeld 2: een weerstand van 100Ω is equivalent aan een geleidbaarheid van $1/100$ mhos/cm

opmerking: in zoet water is de geleidbaarheid naar verhouding laag en wordt de eenheid microSiemens (μS) gebruikt. In zeewater is de geleidbaarheid veel hoger en wordt de waarde uitgedrukt in milliSiemens (mS).

Het hierna volgende is als leidraad gebruikt en is een vertaling van "Underwater Radio Communication" door Lloyd Butler VK5BR.

P.S. In bijlage worden enkele begrippen betreffende gebruikte termen toegelicht.

on4apn maurits

Onderwater Radio Communicatie:

Inleiding:

Hoever kunnen we communiceren onder water in de zee of in een meer? Hoe groot is de signaaldemping en wat is de bruikbare frequentie? Is 1,8MHz bruikbaar?

Men kan zich afvragen waarom een radioamateur interesse kan hebben in duiken en een radioverbinding kan hebben met het oppervlak, of we kunnen geïnteresseerd zijn in radiocontrole voor schepen bvb. modelonderzeeërs.

Dit artikel gaat over transmissie karakteristieken van radiogolven onder water en wat de radioamateur kan doen met deze karakteristieken. Het bevat ook het bestuderen van de transmissie opties voor wat betreft 1,8MHz.

Geleidbaarheid van water:

In zuivere vorm is water een isolator, maar in zijn natuurlijke staat bevat het oplosmiddelen, zouten en andere materie wat het tot een gedeeltelijke geleider maakt. Hoe groter de geleidbaarheid hoe groter de demping van radiosignalen.

Geleidbaarheid (σ sigma) varieert met de hoeveelheid zout en temperatuur. Zeewater bevat een hoog zoutgehalte en een hoge geleidbaarheid variërend van 2 mhos/cm in koude artic regio's tot 8 mhos/m in warm water en hoog zoutgehalte (Rode Zee). De gemiddelde geleidbaarheid van zeewater wordt normaal beschouwd als 4 mhos/m. Dit betekent dat 1 kubieke meter zeewater een geleidbaarheid heeft van 4 mhos of een weerstand van 0,25 ohm (dit is reciproke).

Zoet water heeft een lagere geleidbaarheid. Het geanalyseerde water van het Barossa reservoir in Australië toont aan dat de hoeveelheid opgeloste zouten gelijk is aan 300mg/l en de geleidbaarheid gelijk is aan 0,0546 mhos/m.

Verzwakking:

Verzwakking of demping van radiogolven in water (en in feite in alle geleidbaar medium) stijgt met stijgende geleidbaarheid en met stijgende frequentie. Het kan berekend worden met volgende formule:

demping (α) in dB/m = $0,0173V(f\sigma)$

waarbij: f in hertz

σ = geleidbaarheid in mhos/m

fig.1 illustreert de demping in functie van de frequentie in zeewater en zoetwater. De demping in zeewater is zeer hoog en om te communiceren op elke diepte is het nodig gebruik te maken van zeer lage frequenties (10 tot 30 KHz) waarbij de demping dan in de orde is van 3,5 tot 5 dB/m. Werken op de laagste frequentie van de amateurband (1,8MHz) is dus onmogelijk (46dB/m).

De mogelijkheid in zoet water is stukken beter. Gebruikmakende van het watermonster uit Aldelaide (Australië) geeft dit een demping bij 10KHz van maar 0,4dB/m stijgende tot 5,4dB/m bij 1,8MHz.

Refractie of raakvlakverlies aan het oppervlak:

Wanneer elektromagnetische golven zich bewegen van lucht naar water of van water naar lucht is er een refractieverlies te wijten aan de verandering van het medium (zie ook mijn artikel in CQ-QSO 12-2003 Ionosferische reflectie en refractie in een notendop). Dit verlies kan berekend worden met volgende formule:

Refraction loss (dB) = $-20dB[(7,4586/10^6) \times V(f/\sigma)]$

In zeewater is dit verlies vrij hoog en dichtbij 60dB voor de normaal gebruikte lage frequenties.

Wanneer communicatie vereist is van het oppervlak naar onder water kan men de verliezen verminderen door de apparatuur aan de oppervlakte te verbinden met de antenne onder water.

fig.2 illustreert de refraction loss in functie van de frequentie voor zeewater en zoet water (Aldelaide).

Je merkt op dat de refractieverliezen verminderen met stijgende frequentie en in het geval van zoet water zijn de verliezen gedaald tot 27dB bij 1,8MHz, wat aantrekkelijk is voor de radioamateur.

Golflengte in water

Golflengte in water is maar een fractie dan deze in de ruimte en wordt berekend met de volgende formule:

$$\text{Golflengte } (\lambda) \text{ in meter} = 1000 \sqrt{10/(f/\sigma)}$$

fig.3 geeft de golflengte versus frequentie. In zee water is de golflengte bij 10KHz maar 15,8m vergeleken met 30km in de ruimte. In zoetwater is de vermindering in golflengte niet zo dramatisch maar nog altijd aanzienlijk. Bij 1,8MHz is de golflengte 10,1m vergeleken met 167m in de ruimte. Deze vermindering leidt soms tot aanzienlijke verschillen in antennebouw met onder andere een onderwater dipool van 1,8MHz zijnde dan maar enkele meters lang.

Transmissie opties:

Hoe lager de frequentie, hoe lager de demping in water en hoe groter de mogelijkheid tot communicatie. Tenzij een band voor frequenties in de VLF kan gebruikt worden voor radioamateurs, zijn de opties voor de radioamateur voor communicatie in zoet water beperkt tot 1,8MHz.

Enkele transmissie voorbeelden voor deze toepassing zijn gebaseerd op volgende onderstelling:

1 Uitgestraald vermogen is 0dBw (referentie naar 1W ontwikkelt in een halve dipool). Alle andere metingen zijn in dB refererend naar dit niveau.

2 Ontvangst bandbreedte = 3KHz.

3 Minimum te onderscheiden ontvangstniveau aan de ontvangstantenne = 10dB boven de thermische ruis is -153dBw (voor 3KHz bandbreedte).

4 Atmosferische ruis bij 1,8MHz = 35dB boven KTB(*) (genomen van een gepubliceerde ruiskaart gelijk aan -128dBw voor 3KHz bandbreedte).

5 Demping in zoet water = 5,4dB/m (van fig.1 bij 1,8MHz).

6 Water/lucht refraction loss = 27dB (van fig.2).

(*) voor een bepaalde bandbreedte en een gegeven temperatuur ontstaat een zeker ruisvermogen

$$P = K.T.B.$$

P = vermogen in watt, K = constante van Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23}$, B = doorlaatband in Hz, T = temperatuur in °K. Het ruisvermogen gaat evenredig met de temperatuur. $K = C+273,15$ (on4apn)

fig.4 toont de ondergedompelde ontvanger en de ontvanger aan de oppervlakte. Het signaalpad is onderworpen aan 27dB lucht/water raakvlak verlies. Atmosferische ruis is ook gedempt door het raakvlak en path loss een minimum ontvangstniveau is bepaald door de gevoeligheid van het ontvangststelsel (niet beïnvloed door atmosferische ruis) Maximale lengte van het transmissiepad werkt tot 23m.

fig.5 omgekeerde transmissierichting is zo dat de zender onder water en de ontvanger boven de oppervlakte is. In dit geval is het minimum ontvangstniveau bepaald door atmosferische ruis (wel boven de gevoeligheid van het ontvangststelsel). Daardoor is de maximum lengte van het water transmissiepad vermindert tot 18,7m.

fig.6 daar beiden, zender en ontvanger zich onder water bevinden, schakelen ze het lucht/water raakvlakverlies van 27dB uit. Dit verlengt de maximum onderwater transmissieafstand tot 28m.

we richten nu onze aandacht naar transmissie in de ruimte. Na 1 golflengte van onze zendantenne, varieert de veldsterkte omgekeerd met de afstand, het signaal vermindert met 6dB iedere keer de afstand verdubbeld en de demping van een punt 1 golflengte van de antenne tot de afstand d is gelijk aan $20 \log(d/\lambda)$.

Refereren we nu naar fig.7, we hebben een zender met een vermogenreferentie van 0dBW op 1 golflengte en dit punt is 1000 meter (of 6 golflengtes) van het wateroppervlak.

Vermogen niveau bij lucht/water raakvlak is $-20 \log 6 = -15,6 \text{dBW}$ en transmissie voor een verdere 20m onderwater is nog mogelijk.

Bekijken we dit type van transmissie een beetje verder, en onderzoeken fig.8. Hier hebben we zender en ontvanger onderwater maar 1000m uit elkaar. Communicatie over deze afstand via water is niet mogelijk maar het signaal kan het water verlaten dichtbij de zender, gaat via de lucht en keert terug in het water dichtbij de ontvanger. Het signaal ondergaat 2 maal het raakvlakverlies (54dB) maar de demping over de 1000m is beperkt tot dat over het luchtpad.

Hier is echter een andere techniek bij dewelke twee onderwater stations kunnen communiceren over vrij lange afstand, beperkt tot de diepte waar zich de stations bevinden. In gegeven voorbeelden is de actuele transmissie onderwater beperkt van 18 tot 30m. Deze afstand kan toenemen met toenemend vermogen of met een kleinere frequentie. Stijging van het uitgestraalde vermogen tot 100W zou 20 dB winst geven of een extra onderwater afstand van 3,7m (geen grote stijging). Wanneer een frequentie van 100KHz beschikbaar zou zijn, dan zou de demping 1,28dB/m zijn, en we het voorbeeld van fig.6 zouden nemen, zou de afstand een waarde hebben van 120m. Bij deze frequentie echter zou het raakvlakverlies stijgen tot 40dB en in voorbeeld van fig.4 (met inbegrip van het raakvlakverlies) zou de afstand minder zijn dan 88m, maar toch groter dan bij 1,8MHz. Wel moeten we nog rekening houden met het gebruikte water van Aldelaide als monster.

Antennes:

Tekeningen van onderwater antennes ligt buiten dit artikel, maar een paar interessante details kunnen bekeken worden. Gepubliceerde referenties tonen aan dat loop-antennes, lange draad en dipolen succes hebben onder water bij VLF- frequenties, hun fysische afmetingen, in termen van ruimte golflengtes, zijn veel minder dan hun equivalent in de ruimte.

Antenne geleiders zijn geïsoleerd voor water om te vermijden dat lekkende stromen direct met het geleidend medium in contact zouden komen. Maar er is toch gekoppelde geleiding in het medium wat geeft dat de stralingsweerstand lager kan beschouwd worden dan het equivalent van een antenne in de ruimte. Een stralingsweerstand van enkele ohms kan voor een halve dipool verwacht worden.

Er is ook nog de kwestie van polarisatie en richtingsgevoeligheid. Volgens Moore (ref.2) is een onderwater horizontale elektrische dipool equivalent aan een veld dat zwakker is dan een verticale antenne aan het oppervlak. Het grootste deel van de energie, opwaarts gestraald van de antenne is gereflecteerd aan het oppervlak tot een verticale polarisatie die zich meestal horizontaal gaat bewegen boven het oppervlak. Dit fenomeen helpt ons uitleg te geven over de gebruikte techniek in fig.8 dat horizontale signalen boven water uitzend en ze te ontvangen in het omgekeerde proces.

De in zee gebruikte antennes maken gebruik van het geleidende zeewater als actueel stralings element. Het signaal is in elk geval met de zee gekoppeld via verbonden elektrodes of door inductieve koppeling van een geïsoleerde loop. Deze technieken zijn niet bruikbaar voor zoet water wegens de veel mindere geleidbaarheid.

Een veel gebruikte antenne bij duikboten is de Buoyant Wire Antenna System, ontvangst: VLF/LF/MF/HF (10KHz-35MHz) transmissie: 2-10MHz band. Hierbij is de antenne 610m of 730m lang, met een diameter van 16,5mm. Deze wordt dan met een inwendig of uitwendig systeem af-of opgewonden. (on4apn)

Zeewater:

De demping van radiosignalen in zeewater is zo groot dat communicatie verder dan juist onder het oppervlak niet mogelijk is zonder gebruik te maken van VLF frequenties (10 tot 30KHz). Zelfs wanneer deze frequenties zijn toegelaten zijn er nog andere moeilijkheden:

1 Lucht naar water refraction loss in deze band is in de orde van 60 tot 70dB.

2 Massieve antenne afmetingen zijn vereist, in het bijzonder voor antennes boven het oppervlak (zelfs bij 30KHz, waarbij de golflengte 10Km is). Grote zendvermogens zijn vereist om de hoge antenne verliezen te compenseren, eigen aan de korte laagfrequent antenne.

3 Atmosferische ruis pieken tot boven de 160 dB boven de thermische ruis (KTB) bij 10KHz en begrenzen het minimum waarneembare ontvangstniveau.

Andere geleidbare mediums:

Terwijl deze bespreking geconcentreerd was op transmissie doorheen water, kunnen deze hoofdlijnen toegepast worden bij andere geleidbare mediums zoals de aardkorst. Typische toepassingen inbegrepen radio communicatie in ondergrondse schachten en kelders.

De geleidbaarheid van de aardkorst verschilt sterk met geleidende overbelasting tussen 10^{-4} en 10^{-5} mhos/m en de lage geleidbare rots, minder dan 10^{-5} mhos/m. Het is klaar dat het succes van de ondergrondse communicatie afhankelijk is van het omgevende terrein.

Conclusies:

Radio communicatie onder zee is geen aantrekkelijke optie voor experimenten voor radioamateurs daar het gebruik van VLF frequenties grote antennesystemen en zeer hoge vermogens vereist.

Zoetwater, meren en rivieren hebben een veel lagere elektrische geleidbaarheid dan zeewater en onderwater transmissie afstanden (of dieptes) tot 30m schijnen haalbaar door gebruik van de lage frequentie amateurband van 1,8MHz. Zelfs grotere afstand (of dieptes) kunnen behaald worden wanneer een lagere frequentieband beschikbaar is. (*) (demping bij 180KHz is beperkt tot ongeveer 18dB/m in zeewater en 2,2dB voor zoetwater.

Communicatie tussen onderwater stations of tussen oppervlakte - en onderwater stations kunnen behaald worden over grotere afstanden door gebruik te maken van een transmissiepad boven het oppervlak, mits het dulden van de lucht/water refraction loss. Similaire communicatie kan ondergronds uitgevoerd worden, afhankelijk van de geleidbaarheid van de omgevende belasting of rots.

(*) Na de publicatie van dit artikel hebben een aantal landen amateurbanden van 130 tot 190KHz toegewezen om te zorgen voor een beter medium voor onderwater transmissie dan 1.8MHz.

Referenties:

1 reference data for radio engineers, ITT Chapter 27 Radio noise and interference.

2 Moore, Richard R. Radio Communications in the Sea, IEE Spectrum, Vol4, Nov 1967, pp 42-51.

3 Hansen, R C Radiation and Reception with Buried and Submerged Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, May 1963.

4 Watt, Leydorf and Smith. Notes regarding possible field strength versus, distance in earth crust waves guides.

Bronvermelding:

Underwater radio communication Lloyd Butler VK5BR

Underwater wireless communication system J.H.Goh, A.Shaw A.I.Shamma's

on4apn maurits
november 2011

Biilage:

ELF 3-30Hz
SLF 30-300Hz
ULF 300Hz-3KHz
VLF 3-30KHz

Elektrische geleiding of conductiviteit: omrekenen van factoren

Mhos/cm = Siemens/cm = 10^6 μ Mhos/cm = 10^6 μ Siemens/cm

μ Siemens/cm = μ mhos/cm

μ Siemens/m = μ mhos/cm x100 μ mhos/cm = μ Siemens/m

100

milliSiemens/m x10 = μ mhos/cm μ mhos/cm = milliSiemens/m

10

conductiviteit zeewater $\sigma = 4\text{S/m}$

conductiviteit zoetwater $\sigma = 0,01\text{S/m}$

$\sigma = 1/\rho$

absorptie coëfficiënt in zoetwater voor EM propagatie is ongeveer

$$\alpha \approx \sigma/2 \sqrt{\mu/\epsilon}$$

absorptie coëfficiënt in zoutwater

$$\alpha \approx \sqrt{\pi} f \mu \sigma$$

snelheid EM in zoetwater

$$c \approx 1/\sqrt{\epsilon\mu}$$

snelheid EM golven in zoutwater

$$c \approx \sqrt{2\pi f/\mu\sigma}$$

Het elektromagnetisch veld plant zich voort in een medium dat gekarakteriseerd wordt door 3 factoren: permeabiliteit μ , permittiviteit ϵ en conductiviteit σ . Deze factoren bepalen de eigenschappen van de propagatie.

Permittiviteit: (ϵ) (vroeger dielektrische constante) is een fysische grootte die aangeeft hoe een elektrisch veld een medium beïnvloed en er door beïnvloed wordt.

Relatieve Permittiviteit: (ϵ_r) wordt bepaald door het vermogen van een materiaal om te polariseren door toedoen van het aanleggen van een elektrisch veld, waardoor dat veld gedeeltelijk vermindert binnen het materiaal. Polariseren betekent dat losse ladingdragers (elektronen, protonen) in het materiaal vrij bewegen met het elektrisch veld en dat elektrisch veld is het veld van de EM golf zelf. Dus hoe meer "echte vrije" ladingen het materiaal bevat, hoe hoger de permittiviteit en hoe lager de lichtsnelheid. De polariseerbaarheid hangt af van de frequentie en golflengte van de EM golven.

Magnetische Permeabiliteit: (μ) de (absolute) permeabiliteit van een medium is de mate waarin het medium een magnetisch veld geleidt.

Relatieve Permeabiliteit: (μ_r) van een materiaal is een dimensieloos getal, zijnde de absolute permeabiliteit van het materiaal gedeeld door die in het luchtledige.

eenvoudiger: μ_r van een materiaal drukt uit hoeveel keer liever de magnetische veldlijnen door dat materiaal gaan dan door vacuüm en is afhankelijk van de temperatuur van het materiaal en de frequentie.

De permittiviteit (ϵ) en de magnetische permeabiliteit (μ) van een medium bepalen samen de fasesnelheid (v) van de elektromagnetische straling door het medium. $\epsilon\mu = 1/v^2$

Fasesnelheid en groepssnelheid: doordat een golf meestal bestaat uit een superpositie van harmonische golven, kunnen de snelheden van de afzonderlijke componenten uiteen lopen. Men maakt daarom onderscheid in fasesnelheid en groepssnelheid.

De fasesnelheid is dan de snelheid waarmee een punt met vaste fase zich voortplant en de groepssnelheid de snelheid waarmee het omhullende van de golf zich voortplant.

Loop antenne:

de loop antenne is een directionele antenne met één of meer volledige toeren van geleiders. Ze heeft een zeer lage stralingsweerstand en treedt op als een inductief component. Het voordeel van de loop antenne is dat ze sterk reageert op het magnetisch veld (H) van de EM golven en minder op de man-made interferentie die een sterk elektrisch veld (E) hebben.

De loop antenne neemt minder ruis op en heeft een betere signaal/ruis verhouding (SNR). De golflengte vergelijking van een loop antenne is gegeven als $\lambda = \pi d$ waarbij d de diameter is van de loop antenne in meter. Om een idee te hebben van de invloed van de factor $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ wordt hierna verwezen. Noteer dat de permittiviteit (ϵ) voor water (80) de grootste waarde heeft op onze aarde, vochtige kleigrond (30) droge grond (4) en rotsgrond (7).

Als voorbeeld een dubbele loop antenne met diameter van 32cm en gebruikt voor een experiment. Theoretisch kan de golflengte van deze antenne berekend worden met bovenstaande formule. Deze dubbele loop antenne heeft twee toeren en de omtrek is $2\pi d$, het is een halve golf antenne, daarom:

$$\pi/2 = 2\pi d = 4\pi (0,32) = 4,02m \text{ en de frequentie is: } f = c/\lambda = 3 \times 10^8 / 4,02 \approx 75\text{MHz}$$

wanneer deze antenne in het water is, zal de golflengte van de antenne beïnvloed worden door de factor $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, daarom kan de golflengte in water berekend worden als:

$$f = c / \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \lambda = 3 \times 10^8 / \sqrt{80 \times 1} \times 4,02 \approx 8\text{MHz}$$

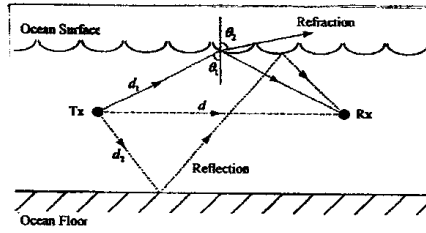


Figure 1: Multi-path Propagation in Water

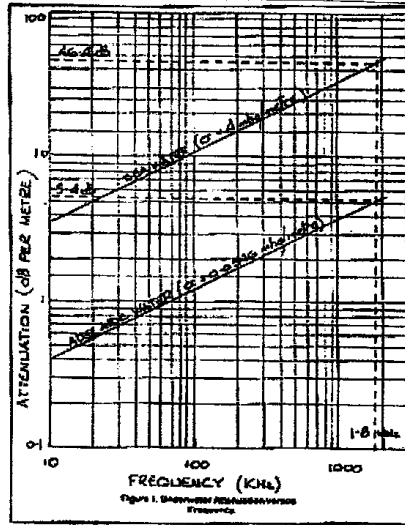


Figure 1: Underwater Attenuation versus Frequency.

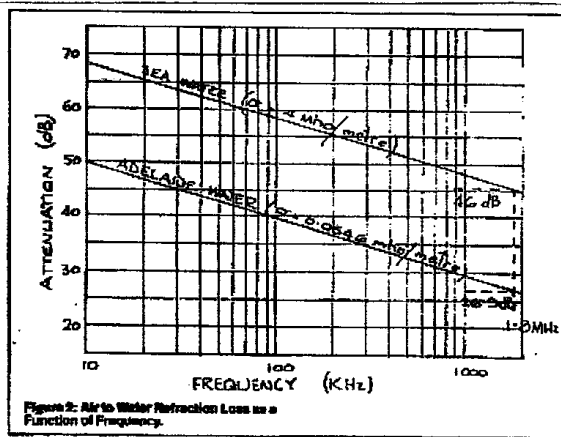


Figure 2: Air to Water Refraction Loss as a Function of Frequency.

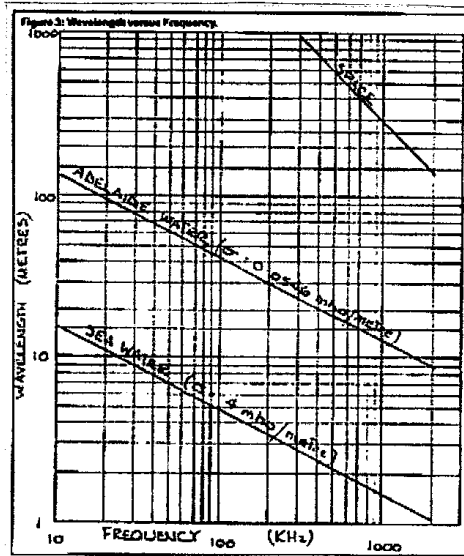


Figure 3: Wavelength versus Frequency

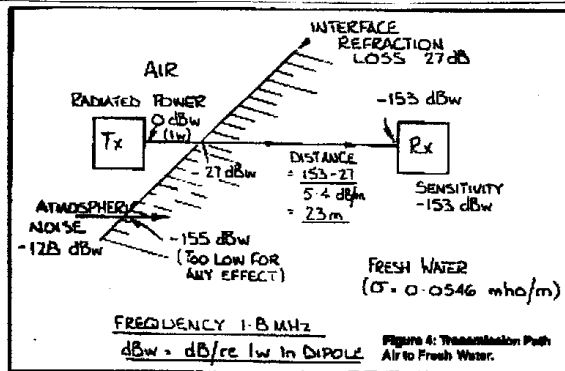


Figure 4: Transmission Path Air to Fresh Water.

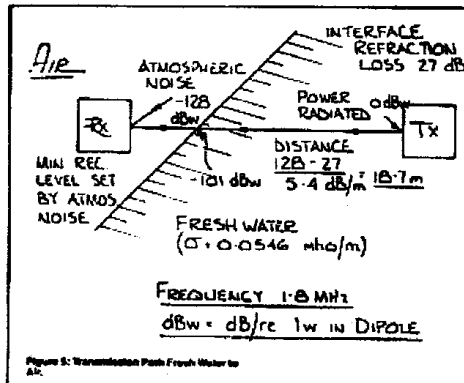


Figure 5: Transmission Path Fresh Water to Air.

Figure 4: Transmission Path - Air to Fresh Water.
Fresh Water to Air.

Figure 5: Transmission Path -

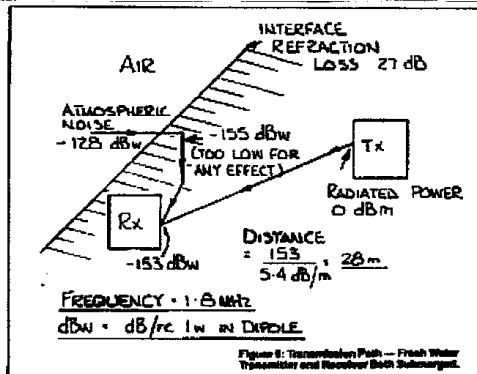


Figure 6: Transmission Path - Fresh Water, Transmitter and Receiver Both Submerged.

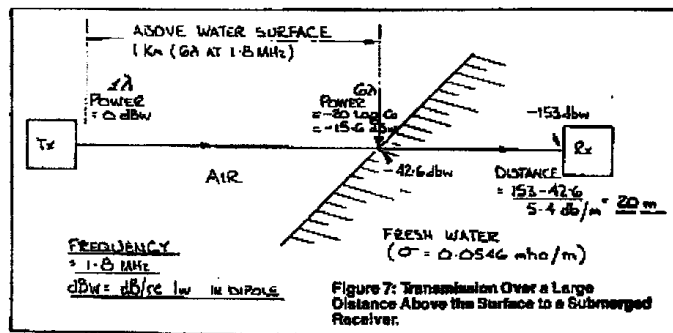


Figure 7: Transmission Over a Large Distance Above the Surface to a Submerged Receiver.

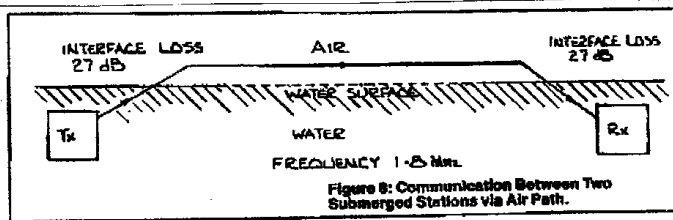


Figure 8. Communication Between Two Submerged Stations via Air Path.