



Компютърно моделиране на подводен комуникационен канал

Александър Пенчев Андонов

Computer Modeling of Underwater Communication Channel

Alexander Penchev Andonov

Abstract: *On the basis of the latest developments, an improved model of underwater communication channel is presented. A set of programs to allow calculation of the basic parameters of the channel over a wide range of parameters has been created. Mathematical models for calculating the spreading factor are developed.*

A process of creating the model is reviewed, so that the resulting model should become easily expandable. User-friendly information-transfer interface is set between the programs and input and output data files.

Keywords: *communications, underwater acoustics, software model, sound channel.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Комуникационните канали се формират във всички възможни среди: атмосферата, космическото пространство, Световния океан. Отделно съществуват различни видове проводни канали, формирани на различни физични принципи: проводимост на металите (медни проводници), оптична проводимост (разпространение на светлината в различни видове оптични влакна) и др. Всички те трябва да имат голяма пропускателна способност, тоест да предават голямо количество информация за единица време. В настоящия момент безжичните комуникации се реализират основно чрез електромагнитни вълни поради редица техни предимства и най-вече поради скоростта им на разпространение, равна на тази на светлината. Това се отнася обаче само за атмосферата и безвъздушното пространство. Тъй като океанската среда е проводяща, електромагнитните вълни много бързо затихват. Затова ефективната комуникация на големи разстояния във водна среда се основава на акустичните вълни, които всъщност са механични. Скоростта на разпространение на звука във водна среда е около 1500 m/s. Тя е много по-малка от скоростта на разпространение на електромагнитните вълни, но е около 5 пъти по-голяма от скоростта на акустичните във въздуха.

Океанът може да се апроксимира като акустичен вълновод, в двумерния случай ограничен отгоре от морската повърхност и отдолу от морското дъно. Водата може да бъде моделирана като идеален флуид, в който звуковите колебания се разпространяват добре. Поради характерни нееднородности във вертикално направление на Световния океан се появява възможност вътрешни слоеве да отразяват звуковите вълни. Така се появяват звукови канали, които задържат звуковата енергия в себе си, давайки възможност за разпространението ѝ на огромни разстояния (няколко хиляди километра). В общия случай за възникването на подводен звуков канал е необходимо такова разпределение на скоростта на звука във вертикалната плоскост, при което на някаква дълбочина се наблюдава минимум. Слойт с минимална скорост на звука се нарича ос на подводния звуковия канал. В близост до оста звуковите лъчи рефрактират и се концентрират в слоя с минимална скорост. Това явление се наблюдава във всички океани на дълбочина от няколко стотин до хиляда и петстотин метра и се нарича свръхдалечно разпространение на звука в звуков канал. Този феномен е открит от американския учен Юинг през 1943 г. и независимо от него от руския академик Л. Бреховских през 1946 г. по време на проучвания в Японско море [1, 3–10].

Към настоящия момент са разработени голям брой модели на звукови канали с различна степен на детайлизация. Целта на настоящата статия е да се предложи опростен и в същото време приложим в практиката модел и да се разработи пакет от програми за неговата реализация при широк диапазон на въвежданите параметри.

* Процесът на моделиране включва следните етапи:

- 1- избор на модел; опростяване на модела;
- 2- избор на разглеждани параметри/величини;
- 3- софтуерно реализиране на модела; кодиране на класове (тип данни), представящи параметрите на средата и канала за комуникация; обединяване на класовете в работещи програми;
- 4- тестване на модела; осъществяване на конкретни изследвания – изчисления чрез разработените програми;
- 5- анализ на получените резултати; настройване на параметри; модифициране на модела с цел подобряването му или за осъществяване на конкретни симулации;
- 6- връщане към {-4- и -5-} или към {-3-, -4- и -5-};

МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ

* Математически контекст

Разпространението на акустичните вълни във водна среда се описва от вълновото уравнение [1, 45–56]:

$$\nabla^2 u(r, t) = \nabla^2 u(x, y, z, t) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

Където $u(r, t)$ е потенциал на скоростта на звука, ∇^2 е диференциалният оператор на Лаплас, а $\{x, y, z, t\}$ са пространствени и времева координати, c е скоростта на разпространение.

Видът на едномерното вълново уравнение е:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2),$$

а на двумерното:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3).$$

При зададени подходящи гранични условия уравнение (3) може да се реши. За хармонични звукови вълни при движение в плитководен звуков канал с акустически твърди граници чрез разделяне на променливите се стига до уравнението на Хелмхолц и се получава поредица от решения:

$$u_n(x, z, t) = B_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{h} \cdot z\right) \cdot e^{i \cdot (wt - k_n \cdot x)} \quad (4),$$

които, като се обединят, дават общото решение:

$$u(x, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{h} \cdot z\right) \cdot e^{i \cdot (wt - k_n \cdot x)} \quad (5).$$

Тук $u(x, z, t)$ описва параметрите на вълна – сума от звукови вълни, z е вертикалната координата, h е дълбочината на канала, n е поредността на решението, k_n са вълнови числа, w е ъгловата честота. Поредицата амплитуди B_n остава неопределена, те описват възможните вълни, които могат да се разпространяват в канала, зависят от източниците на звук, а не от параметрите и средата в звуковия канал.

* Математическо моделиране на размерен фактор

Едно от най-важните явления при разпространение на звук, което трябва да се оцени при моделиране, е затихването. Загубите се измерват в децибели (dB). Общо загубите се разделят на загубите

при разпространение (Propagation Loss или Path Loss = PL) и загубите от отражение (Reflection Loss = RL). Общите загуби се наричат още загуби при предаване (Transmission Loss = TL) и се пресмятат по:

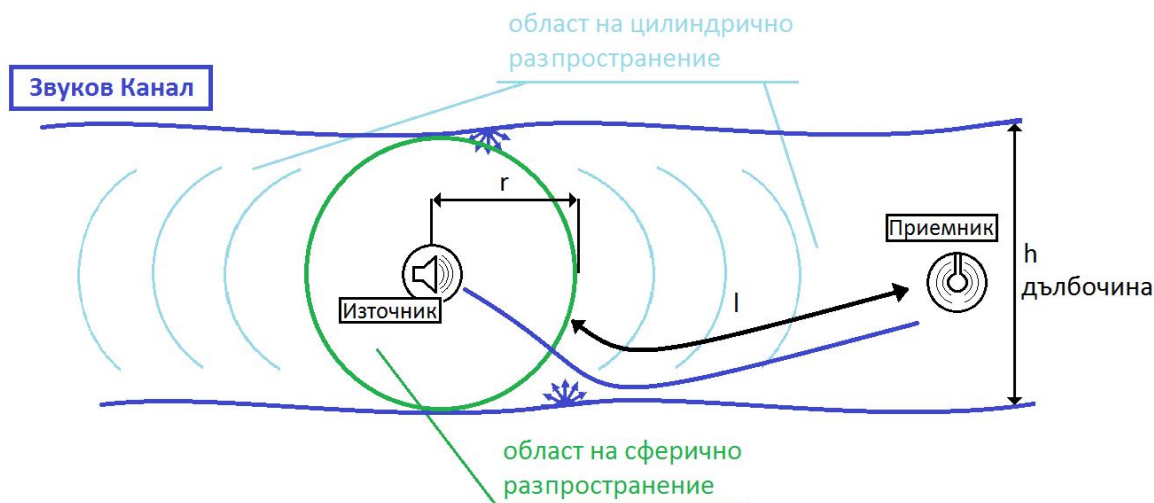
$$TL = PL + RL \text{ [dB]} \quad (6)$$

При оценяването на загубите при разпространение се използва величината размерен фактор – k (spreading factor или power expansion factor). Това е безразмерна величина [—], която отразява геометричния модел на разпространението на звука. Използва се при изчисляване на геометрично затихване (Spreading Loss), част от загубите при разпространение (PL). В литературата [2, 146–153], [3, 2149-2156], [9, 34–43] размерният

множител k се оценява по следния начин:

$$k = \begin{cases} 2 & \text{сферичен_множител} \\ 1,5 & \text{практичен_множител} \\ 1 & \text{цилиндричен_множител} \end{cases}$$

При комбинирано разпространение на звука (на част от дистанцията разпространението е по сферичен закон, а на друга част – цилиндричен), което е и най-често срещаният случай в практиката, се приема множител $k = 1,5$. Но това е много неточна оценка, неотчитаща в каква част от пътя е валиден единият модел, и в каква част е другият. Примерна постановка е представена на фигура 1.



Фиг. 1. Геометрични модели на разпространение на звука

В настоящата статия се предлагат две алтернативи на практичния множител – претеглени множители k_w .

Нека $d = d_s + d_c = r + l$ е област на комбинирано разпространение. Необходимата информация при определяне на размерния множител k се дава от дълбочината на канала (h) и дължината на изминатия от звука път (d). От тях се определят обхватите на геометричните модели (r – сферично разпространение) и (l – цилиндрично разпространение). За настройване на модела се допуска, че областта на сферично разпространение е не повече от дълбочината на звуковия канал (или средната дълбочина h).

$$d_s = r = h/2 \text{ е област на сферично разпространение} \quad (7)$$

$$d_c = l = d - r \text{ е област на цилиндрично разпространение} \quad (8)$$

** критерии за приемливо решение

– да позволява нулиране – при нулиране на областта на действие на някой модел ($\{r=0\}$ или $\{l=0\}$), да се получават граничните стойности за k ($\{k=1\}$ или $\{k=2\}$ съответно).

– да зависи от относителните области (разстояния) на действие на моделите (сферичен и цилиндричен) на разпространение ($k = k(r;l)$) – представени чрез показателите $\{b_s = r/d\}$ и $\{b_c = l/d\}$. Като $b_s + b_c = 1$;

– да не зависи от други величини – като например големината на коефициента на затихване **a** или честотата **f**.

Следващите два варианта отговарят на поставените условия:

** геометрично претеглен множител

$$\begin{aligned} \{r^2 \cdot a^r\}(s) \text{ и } \{l^1 \cdot a^l\}(c) & \quad - \text{множители на затихване;} \\ \{d^2 \cdot a^d\}(s) \text{ и } \{d^1 \cdot a^d\}(c) & \quad - \text{гранични условия } (d = r \text{ и } d = l); \\ (d^2 \cdot a^d)^{r/d} \cdot (d^1 \cdot a^d)^{l/d} = (d^{kw} \cdot a^d)^{d/d} & \quad - \text{геометрично комбинирание;} \\ d^{\frac{2r}{d}} \cdot a^r \cdot d^{\frac{l}{d}} \cdot a^l = d^{kw} \cdot a^d & \\ d^{\frac{2r+l}{d}} = d^{kw} & \quad - \text{оттук следва } \Rightarrow \end{aligned}$$

$$kw = \frac{2 \cdot r + 1 \cdot l}{d} = 2b_s + b_c ; [-] \quad (9)$$

** аритметично претеглен множител

$$\begin{aligned} \{r^2 \cdot a^r\}(s) \text{ и } \{l^1 \cdot a^l\}(c) & \quad - \text{множители на затихване;} \\ \{d^2 \cdot a^d\}(s) \text{ и } \{d^1 \cdot a^d\}(c) & \quad - \text{гранични условия } (d = r \text{ и } d = l); \\ (d^2 \cdot a^d) \cdot \frac{r}{d} + (d^1 \cdot a^d) \cdot \frac{l}{d} = (d^{kw} \cdot a^d) \cdot \frac{d}{d} & \quad - \text{аритметично комбинирание;} \\ r \cdot d^{2-1} + l \cdot d^{1-1} = d^{kw} & \quad - \text{оттук следва } \Rightarrow \end{aligned}$$

$$kw = \log_d(r \cdot d + l) = \log_d(b_s \cdot d^2 + b_c \cdot d) ; [-] \quad (10)$$

** ако трябва да се отчете фактът, че силата на звука и съответно мощността се измерват/привеждат към стандартния 1 [m] от източника, то трябва да се използва:

$$r = h/2 - 1 \text{ [m];} \quad \text{за дълбочина } h > 2,0 \text{ [m];} \quad (11)$$

** тези модели на изчисление на размерен множител **kw** са лесно разширими – например при въвеждане на трета област с различен модел на разпространение (равнинна вълна), със съответен показател $\{b_f\}$. Като $b_s + b_c + b_f = 1$;

** лесно могат да се добавят още модели за изчисляване на **kw**, базирани на друг тип осредняване; след това да се направят изследвания какъв тип резултати дават различните модели и да се сравнят помежду си и с експерименталните данни;

** в разгледания по-долу клас MultiPathRay са реализирани три weiFac() функции, които връщат практичен множител, геометрично претеглен множител или аритметично претеглен множител. Те могат да се използват по избор;

* Математическо моделиране на загубите при разпространение

Загубите при разпространение (PL) се изчисляват по следни начин

$$PL = PL(d) = k \cdot 10 \cdot \lg(d) + d \cdot 10 \cdot \lg(a(f)) \text{ [dB];} \quad (12)$$

Тук **k** е размерният множител. Коефициентът на затихване **a(f)** е и се изчислява чрез **b(f)** – обемния коефициент на поглъщане:

$$a(f) = 10^{\frac{b(f)}{10}} \text{ [dB]; } b(f) = 10 \cdot \lg(a(f)) \text{ [dB/km];} \quad (13),$$

където $\alpha(f)$ е обемният коефициент на поглъщане [dB/km], който може да се изчисли по формулата на Торп (1965), формулата на Франсоа-Гарисън (1982), формулата на Шулкин-Марш (1962), формулата на Мелен-Браунинг (1976), формулата на Фишър-Симънс (1977) или някоя друга известна зависимост; (в източници [2, 146–153], [3, 2149–2156], [9, 34–43] се използва формулата на Торп).

Формула на Торп – $\alpha(f)$ зависи само от честотата, като f е в [kHz]:

$$\alpha(f) = 0,11 \cdot \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \cdot \frac{f^2}{4100+f^2} + 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0,003 \text{ [dB/km];} \quad (14)$$

Тъй като формулата не е в сила при ниски честоти ($f < 0,1$ [kHz]), то се използва допълващата формула от [9, 34-43]:

$$\alpha(f) = 0,002 + 0,11 \cdot \frac{f^2}{1+f^2} + 0,011 \cdot f^2 \text{ [dB/km];} \quad (15)$$

Беше установявано обаче, че формула (12) не е подходяща при малки стойности на d ($d \leq 1$ [km]). При $d=0$ може да се съобрази каква е стойността на PL: PL=0; няма загуби; Едно възможно решение на този проблем е линейна интерполация при $0 \leq d \leq 2$ [km]. Тогава ще се получи:

$$PL(d) = \begin{cases} d \cdot \alpha(f) + 1,50515 \cdot k \cdot d & \dots // d \leq 2,0 \text{ [km]} \\ k \cdot 10 \cdot \lg(d) + d \cdot \alpha(f) & \dots // d \geq 2,0 \text{ [km]} \end{cases} \text{ [dB];} \quad (16)$$

СОФТУЕРНО МОДЕЛИРАНЕ НА ПОДВОДЕН ЗВУКОВ КАНАЛ

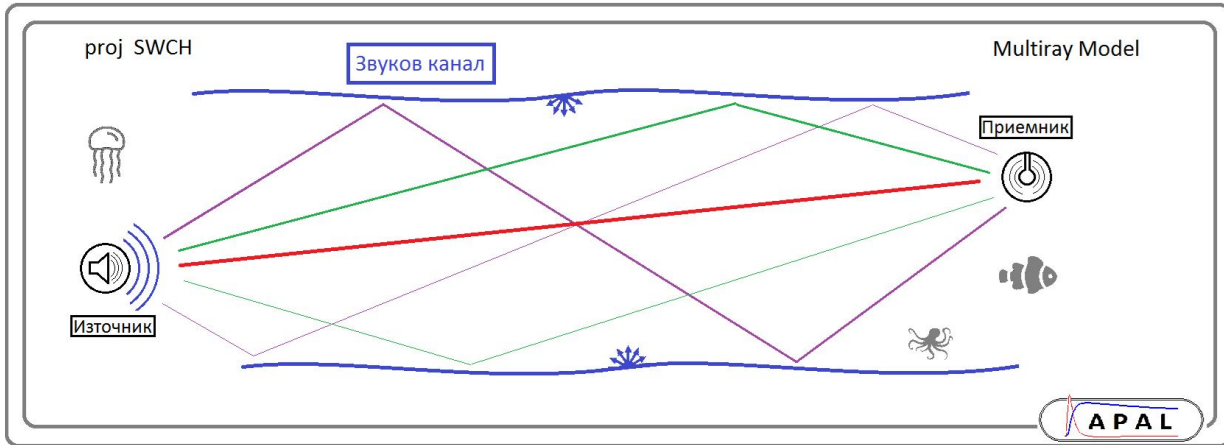
Както беше подчертано по-горе, разпространението на звука под водата се описва от вълновото уравнение, решено при подходящи гранични условия. Разработени са редица модели за опростяване на изчисленията [6, 244–252], [7, 1760–1767]. Тези модели включват лъчева теория, решения чрез нормални моди и използване на параболични уравнения вместо вълновото уравнение. Всеки набор от решения (на вълновото уравнение) е валиден и ефективно изчислим в ограничен спектър на честота и пространствен обхват.

* Избор на модел

Проследяването на лъчите (ray tracing) е метод за изчисляване на пътя на вълни или частици през хетерогенна среда с региони с различна скорост на разпространение (променлив скоростен градиент), различни абсорбционни характеристики и отразяващи повърхности. При такава постановка вълновите фронтове могат да се изкривяват, да променят посоката си и да се отразяват от повърхности и така се усложнява анализът. Рей-тресинга опростява проблема, като въвежда идеализирани тесни лъчи и проследява пътя им през средата. По-простите задачи могат да бъдат анализирани чрез изследване на няколко лъча, като се използват не особено сложни математически изрази. По-подробен анализ може да се изпълни при използване на компютър за проследяване на много повече лъчи.

Лъчевата теория не описва явления като интерференция и дифракция, които изискват вълнова теория (включваща фазата на вълната).

Звуковият канал, който беше моделиран за тестване на програмите, е плитководен. За основа на модела се използват основните параметри на модела от [8, 3–10] чрез проследяване на лъчите (ray tracing) при многолъчево разпространение (multipath propagation). При моделиране на затихването на акустични сигнали съгласно източници [2, 146–153], [3, 2149–2156], [9, 34–43] се използват формули (6), (12), (14), (15).



Фиг. 2. Многолъчево разпространение на звука

В плитководния канал акустичните вълни преминават по директния лъч, а също така и по други лъчи след отражения от повърхността и дъното. Може грубо да се пресметне разпространението на акустични сигнали по отделните лъчи, като се опростят параметрите на средата. Приемат се допусканията:

- (1) скоростта на звука е почти постоянна,
- (2) повърхността и дъното са без значителни неравности,

Изчисляват се траекториите на лъчите (ray tracing) за акустичните вълни. Загубите при отражение могат да се приемат за постоянни (в [dB]) и да се съдържат в две константи (една за горно и една за долно отражение) като част от характеристиките на канала.

* Избор на параметри

Солеността на водата, температурата и налягането в дадена точка са определящи за акустичните свойства на средата. При разглеждания модел те са представени чрез локалната скорост на звука c , затова не се обсъждат отделно. При работа със структури/класове от данни може много лесно да се добави нов тип данни, който да включва и тези променливи, когато се наложи.

След като се определят пътищата на разпространение (multipath), може да се оцени интензивността и мощността на звука, като се имат предвид параметрите на излъчения сигнал и местоположенията на източника и приемника. Съгласно модела от [8, 3–10] за всеки лъч се разглеждат изминат път, изминало време, загуби при разпространение.

Излъчвателите и приемниците през своите характеристики (OCRR, TVR, предусилвател и постусилвател) преобразуват електрически сигнал в звук, и обратно.

Примерен списък от разглеждани величини: напрежение $\{V_{in}\}$, сила на звука $\{SILs/източник/\}$, изминат път $\{d_i\}$, време $\{t_i\}$, загуби $\{RL, PL, TL\}$, сила на звука $\{SILr/приемник/\}$, изходно напрежение $\{V_{out}\}$.

* Софтуерна реализация

За софтуерното моделиране на характеристиките на звукови канали е разработен пакет от класове на езика C++ (Cpp). За компилатор се използва Code::Blocks – свободен софтуер. Изпълнимите програми са компилация (преработка в машинен код) на сорс-код, който е компилация (съставен от) от разработените класове. Стойностите на входните данни могат да се четат от входен файл, който е леснодостъпен за потребителя.

** организация на данните

class Swch – физически данни за канала – дълбочина, загуби при отражение, скорост на звука;
class SpAllocation – данни за местоположението; дълбочина на източника на звук, дълбочина на приемника, хоризонтално разстояние между тях;

class RayTravel – данни за лъча – измината дистанция, време, загуби при разпространение;

class RayProp – данни за лъча – честота, брой отражения при движение;
class RayPath – данни за един лъч – сила на звука при източника и при приемника, RayTravel,
RayProp;

class MultiPathRay – данни за многолъчево изследване – група лъчи с един източник;

class SigTravel – цялостно изследване – интегрира всички класове от по-горе;

** решавани типове задачи

Права задача: Излъчва се сигнал със сила SILs при източника. Каква е силата на получения сигнал при приемника – silR? Каква е разбивката на силата на звуковия сигнал по лъчи и какво е времезакъснението?

Обратна задача: Даден е канал (тип Swch), местоположение (тип SpAllocation), получен е сигнал със сила silR по директния лъч; каква е силата на излъчения сигнал SILs?

Задача за обхват: За даден канал (Swch) на какво разстояние излъченият сигнал с дадена честота (freq) ще отслабне с 20[dB]? На какво разстояние сигналът ще отслабне с 40[dB]? На какво разстояние сигналът ще отслабне с 60[dB]? Каква е зависимостта на разстоянието от критерия TL[dB] при дадена честота (freq)? Същият въпрос при спектър от честоти (freq_min . . . freq_max); Същият въпрос при спектър от критерии (TL_min . . . TL_max);

Задача за честота: За даден канал (Swch) при каква честота излъченият сигнал ще загуби дадени TL[dB] на дадено разстояние (dist)?

Задача freq-range-loss: За даден канал (Swch) при дадени две от величините (честота, обхват, загуби) да се определи третата; същият въпрос може да се реши при даден спектър от стойности; данните могат да се представят графично;

* Входно-изходна комуникация

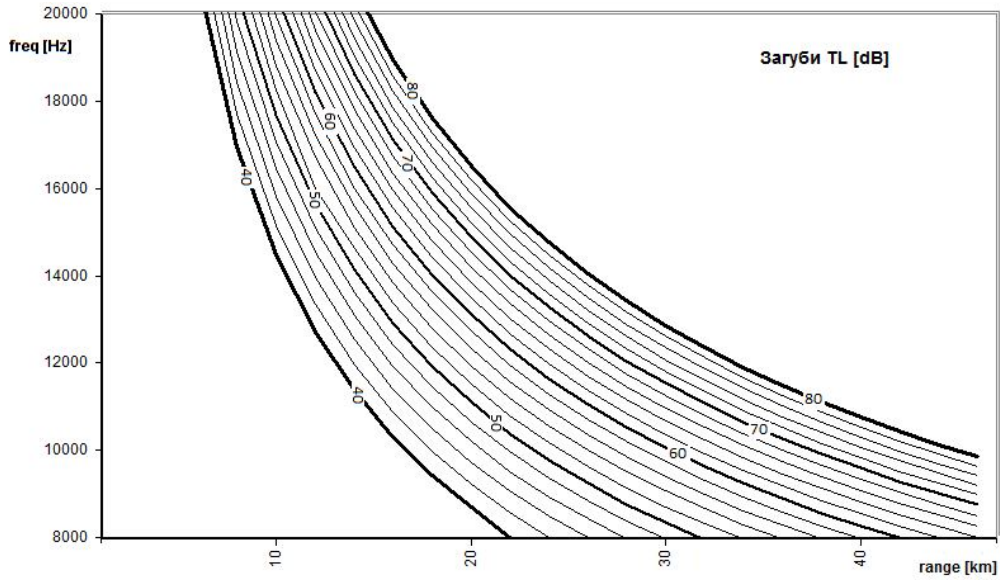
Разработените класове четат и извеждат данни, като за удобство са снабдени с възможности за файлове вход/изход. В случая е реализиран текстов (а не бинарен) запис. Програмата работи с файлове с разширение “.swch”, като тези файлове могат да се създават и редактират с всеки текстов редактор, включително Notepad. Данните от файла могат да се копират в буфера и да се поставят във всякакви други файлове или приложения. Самите “.swch” файлове могат да се конвертират в “.txt” или друг тип.

Във файловете могат да се пишат коментари. Когато те не засягат данните, програмите ще четат входа и ще пренебрегват коментарите. Това позволява онагледяване на резултатите, внасяне на бележки и други способности за презентация.

ИЗСЛЕДВАНИЯ И ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

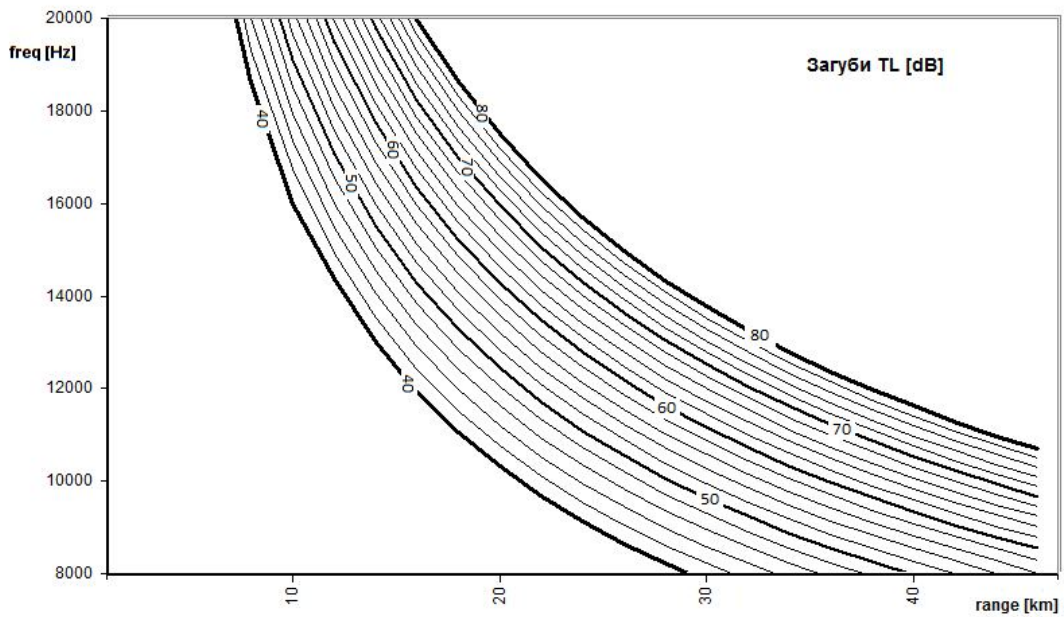
* Сравнение на резултати при различни размерни фактори **k**

Параметри – ДИ е дълбочина на източника на звукови сигнали [m]; ДП е дълбочина на приемника [m]; дълбочина е дълбочината на канала **h** [m]; Получените данни са нанесени върху координатна система freq= freq(range) за различни загуби TL;



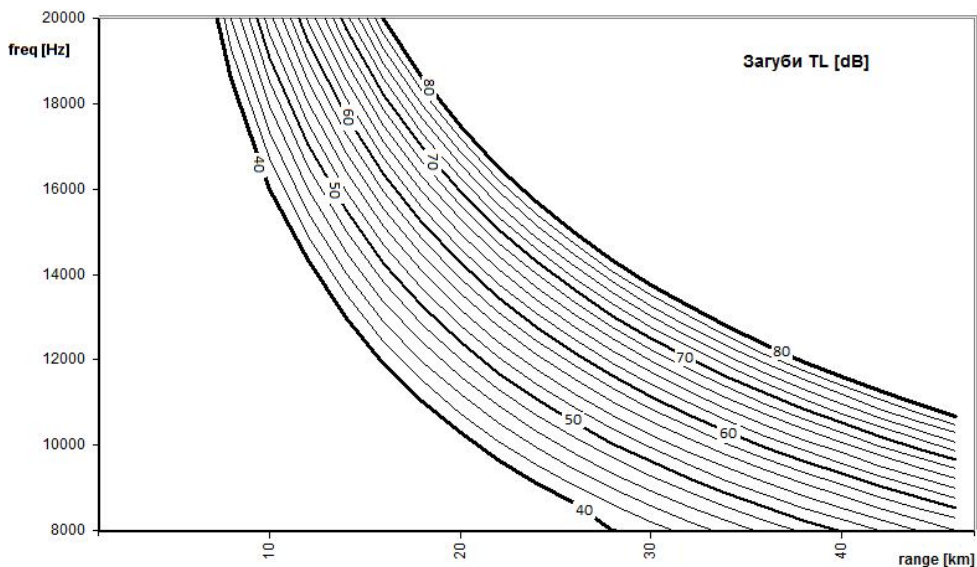
ДИ 50 [m]
ДП 50 [m] дълбочина 60 [m]

Фиг. 3. Загуби TL при практически размерен фактор $k = 1,5$



ДИ 50 [m]
ДП 50 [m] дълбочина 60 [m]

Фиг. 4. Загуби TL при геометрично-претеглен фактор $k_w = (2r+l)/d$

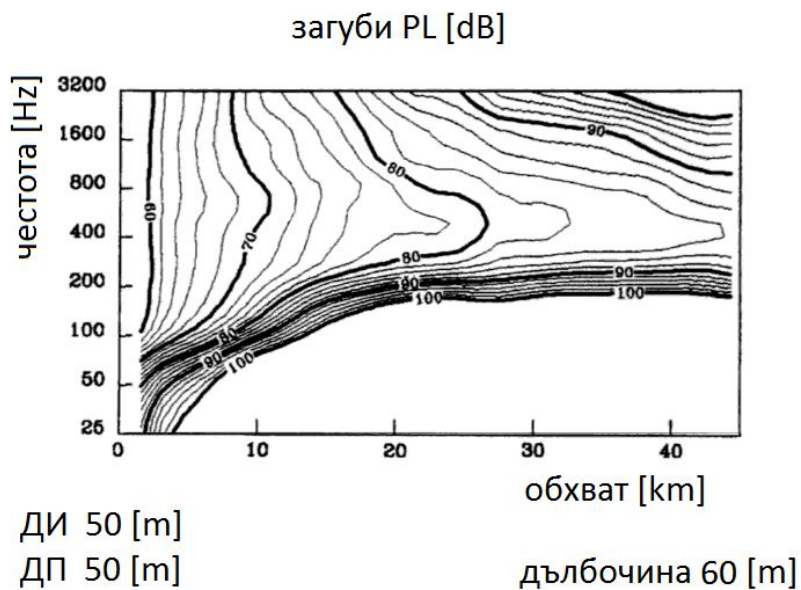


ДИ 50 [m]
 ДП 50 [m] дълбочина 60 [m]

Фиг. 5. Загуби TL при аритметично-претеглен фактор $kw = \log_d(r \cdot d + l)$

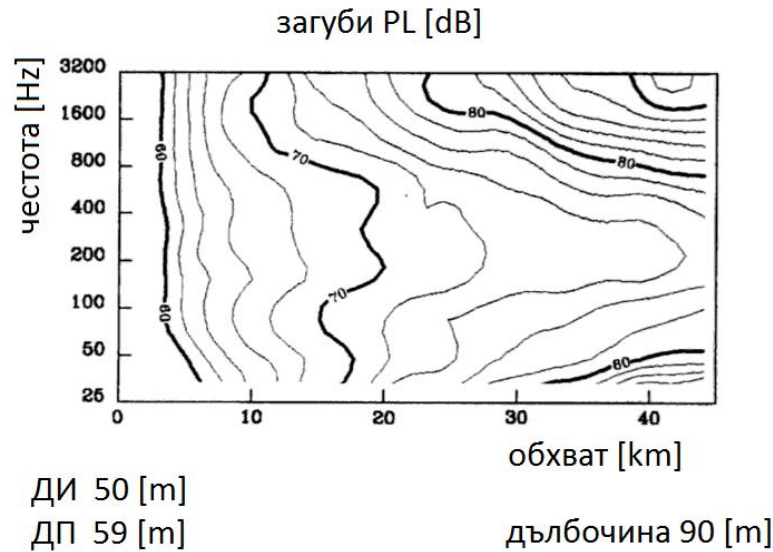
Забелязват се малко по-големи загуби при моделиране с практичен размерен фактор. При $f \text{ H}''$ 8 [kHz] разликата в обхвата е близо 7 [km], а при загубите е приблизително 7 [dB], което означава близо 5 пъти по-слаб сигнал. При $f \text{ H}''$ 16 [kHz] разликата в обхвата е близо 2 [km], а при загубите е приблизително 5 [dB], което означава близо 3 пъти по-слаб сигнал. При толкова голям обseg и такава малка дълбочина обхватът на сферичното разпространение на сигнала е много малък и размерният фактор е $kw \text{ H}''$ 1, което е много далеч от практичен размерен фактор $k = 1,5$.

* Сравнение на резултати на изчисления на модела с експериментални данни от източник [5, 28–32].



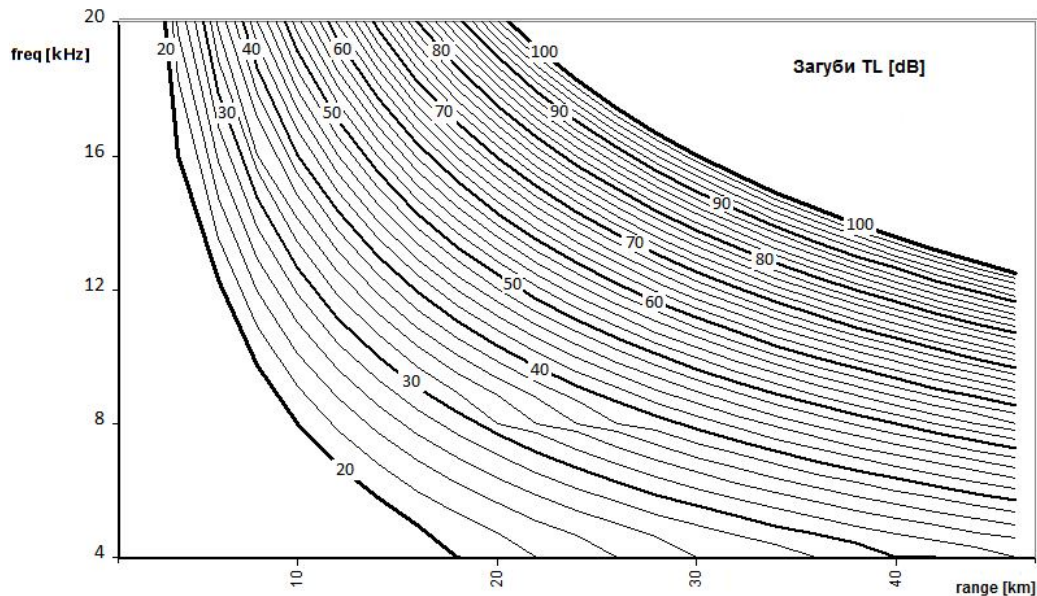
Фиг. 6. Изследване на загубите при движение на звук в плитки води за различни честоти и обхвати, Проведено в Баренцево море;

На фиг. 6., от измерванията проведени в Баренцево море се забелязват много големи загуби при ниските честоти $f < 200$ [Hz]. Най-големи обхвати се постигат при честоти f : 300–800 [Hz].



Фиг. 7. Изследване на загубите при движение на звук в плитки води, за различни честоти и обхвати, проведено в Ламанш

На фиг. 7., от измерванията проведени в Ламанш се вижда по-нормално поведение при ниските честоти. Най-малки загуби се получават при честоти f : 150–500 [Hz].



Фиг. 8. Изчисления при ДИ 50[m]; ДП 50[m]; Дълбочина канал 100[m]

Измерванията в Баренцево море и в Ламанш показват много по-големи загуби от изчисленията. Същевременно изчисленията отговарят точно на стойностите на обемния коефициент на поглъщане $b(f)$ [dB/km], които са дадени графично в [4, 8–10], както и на формулата на Торп от източници [2, 146–153], [3, 2149–2156], [9, 34–43]. Възможно е в реална среда да се получава много по-голямо обемно разсейване поради нееднородности, флуктуации на температура, налягане, плътност, соленост, малки обекти във водата (сравними с дължината на вълната на звука), планктон, риба, мехурчета и др.

Друга разлика между експерименталните данни и изчисленията се вижда при ниски честоти $f < 200$ [Hz], измерванията показват увеличение на загубите при намаляване на честотата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на съвременни разработки е представен подобрен модел на подводен комуникационен канал. Създаден е пакет от програми, позволяващи да се получават основни параметри на канала при широк диапазон на въвежданите параметри. Предложен е нов начин за определяне на размерния фактор при изчисляване на загубите при разпространение.

Сравненията между изчисления и измервания показват, че при ниските честоти моделът не отразява добре разпространението на звука. Основната причина според автора е, че лъчевата теория, която е в основата на модела, е по-подходяща при малки дистанции и висока честота на сигнала.

За подобряване на настоящия програмен пакет могат да се добавят допълнителни функции. Това е лесно изпълнимо, тъй като класовете са удобни за редакция, преработка и осъвременяване. По отношение на входно-изходната комуникация е уместно добавяне на управляем офсет на функциите за извеждане. За подобряване на извеждането на резултатите може да се направи допълнителна настройка на `setprecision`. Подходящо е да се разработят класове `Transducer` и `Hydrophone`, свързващи акустичната комуникация с входните и изходни електрически сигнали.

В бъдеще се предвижда адаптирането на модела към подводния звуков канал в Черно море, който, както е известно, има редица специфични особености. По този начин би било възможно да се провеждат числени експерименти, важни за гражданската и отбранителната сфера на Република България.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Бархатов, Горская, Горюнов, др. 1996.** Бархатов, А. Н., Горская, Н. В., Горюнов, А. А. др. *Акустика в задачах*. Москва: Наука. // A. N. Barhatov, N. V. Gorskaja, A. A. Gorjunov, dr. 1996. *Akustika v zadachah*. Moscow: Nauka.
- [2] **Al-Dharrab, Uysal, Duman. 2013.** Al-Dharrab, S., Uysal, M., Duman, Tolga M. Cooperative Underwater Acoustic Communications, *IEEE Communications Magazine*, 51(7), 146–153.
- [3] **Pan Chengsheng, Jia Liangchen, Cai Ruiyan, Ding Yuanming. 2012.** Modeling and Simulation of Channel for Underwater Communication Network, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(3(B)), 2149–2156.
- [4] **Gerstoff. 1999.** Gerstoff, P. *Introduction to Hydroacoustics*. International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization.
- [5] **Jensen, Kuperman, Porter, Schmidt. 2000.** Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., Schmidt, H. *Computational Ocean Acoustics*, Springer, New York.
- [6] **Porter, Reiss. 1984.** Porter, M. B., Reiss, E. L. A numerical method for ocean-acoustic normal modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 76 (1), 244–252.
- [7] **Porter, Reiss. 1985.** Porter, M. B., Reiss, E. L. A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 77 (5), 1760–1767.
- [8] **Sözer. 2011.** Sözer, E. M. *Underwater Acoustics. A Brief Introduction*. MIT Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA-USA.
- [9] **Stojanovic. 2007.** Stojanovic, M. On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 11(4), 34–43.