

УДК 551.463(284+256):551.46.0:004.

Л.Н. Замаренова¹, Е.В. Котельникова², М.И. Скипа¹, канд. техн. наук

Модель потерь энергии для гидроакустической информационной сети на морском шельфе

Рассматривается модель потерь энергии при распространении сигналов в гидроакустическом канале информационной сети на шельфе. Экспериментальные данные о потерях при распространении сигналов описываются трендом, аппроксимируемым функциями экспоненциального и полиномиального вида. Показано, что в случае распространения сигналов в донном звуковом канале тренд описывается этими аппроксимирующими функциями с достоверностью не менее 0,9.

The power loss model when the signals propagating in the information network hydroacoustic channel on the shelf is considered. The experimental signal propagation power loss data are described by the trend approximated using the functions of the exponential and polynomial type. It is shown that in the case of the signal propagation in the bottom sound channel the trend is described by this approximating functions with the confidence no less than 0,9.

Ключевые слова: гидроакустические информационные сети, подводные сети связи, шельф, распространение сигналов, гидроакустический канал, модель потерь энергии, расширение фронта волны, тренд, вид аппроксимирующей функции.

Введение

Гидроакустические исследования Черного моря связаны с приоритетными для Украины задачами освоения сырьевых и рекреационных ресурсов, экологии, океанологии, робототехники, навигации. Гидроакустический канал связи не имеет альтернативы для подводных информационных сетей, применяемых в акустико-океанологических исследованиях. В настоящее время гидроакустические информационные сети стали составной частью подводных сетей связи, обеспечивающих функционирование автономных необитаемых аппаратов (по международной классификации к ним относят и STD-станции) в общем информационном пространстве [1–5]. Градация частотных диапазонов гидроакустических сетей связи соответствует их зонам действия и решаемым задачам: связь между сетями информационных систем осуще-

ствляется в диапазоне частот 1...5 кГц, связь между информационными системами – 5...20 кГц, связь между их элементами – 20...50 кГц [4]. Сложность реализации подводных сетей связана со свойствами гидроакустического канала – высокой динамикой изменения параметров, ограниченной полосой частот, низкой скоростью передачи данных, многолучевым распространением сигналов, их затуханием и рассеянием. Использование сетевых алгоритмов, разработанных для одной акватории, в других акваториях проблематично в силу региональных особенностей гидроакустического канала, чем и объясняется отсутствие стандартов протоколов связи для подводных сетей [6].

Исследования подводных сетей осуществлялись в различных районах Мирового океана. Реализованными являются проекты подводных сетей военного назначения (Telesonar и Seaweb), применяемых также в телеметрии для задач океанологии (Seaweb) [1]. В заливах Базардс и Санта-Каталина исследовались сетевые алгоритмы подводной связи, а также характеристики гидроакустического канала – многолучевость и потери при распространении сигналов с полосой частот 5...16 кГц на расстоянии 1...10 км в различных гидрологических условиях (проекты Seaweb и Sublink) [2, 3]. В заливе Базардс также испытана подводная сеть связи на дистанциях 1 км с использованием BPSK-сигналов (Binary Phase Shift Keying – двоичная фазовая манипуляция) с несущей частотой 15 кГц (проект Alan) [7]. В условиях уклона дна и двухслойной геоакустической модели канала в районе о. Эльба проводились исследования сети для сигналов типа BPSK и QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – квадратурная фазовая манипуляция) с несущей частотой 3,5 кГц и полосой частот 0,5 кГц на дистанции 10 км при отрицательной рефракции [8]. Осуществлялись и модельные эксперименты дуплексного канала в диапазоне частот 2...9 кГц [9]. Обзор состояния развития подводных сетей позволяет отметить следующее: исследования относятся к шельфу и включают две взаимно связанные составляющие – сетевые алгоритмы и характеристики гидроакустического канала; разделение частотных диапазонов и зон действия не является строгим. Исследования в Черном море подвод-

ных сетей связи и гидроакустических информационных сетей не проводились. Всесторонне рассматривалось звуковое поле и задачи гидролокации [10], в российском секторе шельфа – методы акустического мониторинга [11]. На украинском шельфе, с позиций информационной акустики, теоретически и экспериментально нами исследовался гидроакустический канал – распространение звука на квазистационарных трассах, их акустическая модель, особенности нижней границы [12–15].

С возрастанием роли охраны окружающей среды создание гидроакустических информационных сетей на шельфе Черного моря является задачей ближайшего времени. Поэтому актуальны дальнейшие исследования гидроакустического канала этой акватории как одной из составляющих подводных информационных сетей. Целью данной работы является описание модели потерь энергии при распространении сигнала в гидроакустическом канале шельфа Черного моря между двумя узлами связи подводной информационной сети, основанное на экспериментальных данных, ранее не рассматривавшихся. Модели потерь энергии описаны в разделе 1 для подводных сетей, в разделе 2 – для гидроакустического канала шельфа Черного моря, в заключение сформулированы выводы.

1. Модель потерь энергии в подводных сетях

Расстояние, на которое распространяются сигналы в гидроакустическом канале, определяется потерями их энергии, оценку которых в случае мелководного канала из-за недостатка априорных данных о параметрах и сложности математической постановки задачи можно выполнить только для относительно простой модели канала [16]. Поэтому с целью прогноза потерь энергии в качестве источника достоверной информации должны быть использованы экспериментальные данные.

Каждая составляющая излучаемого цифрового сигнала представляет собой ограниченный во времени пакет. Потери энергии между двумя узлами связи можно описать в виде модели [2] –

$$E_T = E_0 T_p A(r, f), \quad (1)$$

где E_T – уровень излученной энергии; E_0 – уровень принятой энергии, позволяющий декодировать принятый пакет; T_p – длительность пакета.

Здесь $A(r, f)$ – потери при распространении сигнала частотой f [16]:

$$A(r, f) = r^k a^r, \quad (2)$$

где r – расстояние от источника до приемника; $k = 1, 3/2, 2$ – фактор расширения фронта волны для цилиндрического, модифицированного и сферического закона их распространения, соответственно; $a = 10^{\beta(f)/10}$ – компонента, учитывающая коэффициент поглощения звука в воде $\beta(f)$.

В уравнении (1) нас интересует составляющая $A(r, f)$, описываемая уравнением (2), где однозначно определяются только диссипативные потери [16]. Представление же потерь в виде степенной зависимости от расстояния для мелководных гидроакустических каналов не учитывает частотный фактор и является упрощенным [16, 17]. Сферический закон справедлив в условиях свободного поля, цилиндрический характеризует глубоководные коммуникации в условиях канального распространения в горизонтально-слоистой среде, а модифицированный – мелководные коммуникации. Для мелководных каналов необходимо учитывать влияние нижней границы [16, 17], поэтому уравнение (2) дополняют сомножителями. Опуская диссипативную составляющую, приведем ряд эмпирических зависимостей потерь от расстояния, которые одним из первых предложил D.E. Weston [18].

Цилиндрический закон распространения звуковых волн с учетом критического угла скольжения звуковой волны φ_c описывается зависимостью вида

$$\lg A(r, f) = 10 \lg \frac{rH}{2\varphi_c}, \quad (3)$$

где H – глубина моря.

При этом с учетом потерь при отражении от дна δ_b выражение для $A(r, f)$ имеет вид

$$A(r, f) = 10 \lg r^{3/2} \frac{\sqrt{\delta_b H}}{5,2}. \quad (4)$$

Закон, определяющий расхождение фронта волны и затухание одной моды, описывается формулой

$$A(r, f) = 10 \lg \frac{rH^2}{\lambda} + \frac{r\lambda^2 \delta_b}{8H^3}, \quad (5)$$

где λ – длина волны.

Модель потерь в виде уравнений типа (3)–(5) часто носит региональный характер. Однако механизмы возникновения потерь до конца не ясны, а потери оказываются выше ожидаемых, что наблюдается и на шельфе Черного моря [13–15]. В то же время применительно к

задачам подводных сетей связи, в том числе гидроакустических информационных сетей, достаточно обобщенного описания экспериментально полученных данных о потерях при распространении сигналов в гидроакустическом канале данной акватории.

2. Модель потерь в гидроакустическом канале шельфа Черного моря

Для описания экспериментальных данных о потерях при распространении сигналов в гидроакустическом канале морского шельфа используем формальный подход, не связывая потери с механизмами их возникновения. В качестве модели потерь энергии примем тренд их изменения с расстоянием. Функция, аппроксимирующая тренд, должна удовлетворять следующим критериям: описывать тренд с достоверностью не менее 0,8; иметь минимальное число неизвестных и область определения в виде всего интервала наблюдений по расстоянию.

Базу данных составляют измерения вдоль квазистационарных трасс, направленных на ЗСЗ и ЮЮЗ от о. Тендра. Частоты сигналов составляют – 0,516; 1,55 и 3,16 кГц, и могут использоваться в подводных сетях [8]. Результаты измерений представляют собой зависимость от расстояния усредненного звукового давления $\bar{p}(r)$, нормированного на величину $p_0 = 10^{-6}$ Па, – $p(r) = 20 \lg(\bar{p}(r) / p_0)$ [12]. Распространение сигналов сопровождается взаимодействием звуковой волны с нижней границей канала и интерференцией мод, что проявляется в пространственных изменениях поля с различными периодами. Скорость спада уровня звукового поля с расстоянием $p(r)$ и интерференционная картина зависят от частоты сигнала, глубины трансиверов и трассы. Обратимся к описанию тренда изменения с расстоянием зависимости $p(r)$. Предъявляемым критериям отвечают экспоненциальная и полиномиальная аппроксимирующие функции, которые представляют весь интервал расстояний и описывают тренд изменения $p(r)$ с высокой достоверностью. Они имеют вид, соответственно, –

$$y(r) = K \cdot e^{-b \cdot r}, \quad (6)$$

где K – коэффициент; b – показатель затухания энергии;

$$y(r) = c_0 r^n + c_1 r^{n-1} + \dots + c_{n-1} r + c_n, \quad (7)$$

где c_0, c_1, \dots, c_n – коэффициенты; $n = \overline{3, 5}$ – степень полинома.

Рассмотрим донный звуковой канал, характеризующийся неблагоприятными условиями для распространения звука с большими потерями энергии [12–15]. В качестве характерного примера рассмотрим описание тренда зависимости $p(r)$ на трассе о. Тендра – ЮЮЗ при глубине излучателя 6 м, приемника – 4,85 м аппроксимируемыми функциями (6), (7). Расчеты показали, что для частоты 0,516 кГц на двух трассах, а на частотах 1,55 и 3,16 кГц на одной трассе, о. Тендра – ЮЮЗ, функция (6) описывает тренд изменения экспериментальной зависимости $p(r)$ с высокой достоверностью. На рис. 1 (и далее) зависимости $p(r)$ с указанием частоты сигнала показаны сплошными линиями, тренд $y(r)$ – пунктиром, с указанием частоты и уравнения. Коэффициенты K соответствуют уровню излучения, показатель экспоненты характеризует затухание энергии с расстоянием. При достоверности аппроксимации R^2 равной 0,965; 0,913 и 0,904 соответственно для частот 0,516; 1,55 и 3,16 кГц показатель экспоненты b составляет 0,210; 0,242 и 0,386 и учитывает все процессы в водной среде и на границах канала, которые приводят к потерям энергии. Потери растут при увеличении расстояния и частоты, что проявляется в увеличении показателя экспоненты b , описывающей тренд. Однако, на другой трассе, О. Тендра – ЗСЗ, на частотах 1,55 и 3,16 кГц аппроксимация экспоненциальной зависимостью дает менее точное описание тренда – $R^2 \approx 0,8$ и несколько меньше.

Рассмотрим аппроксимацию тренда полиномами. Полином третьей степени с высокой достоверностью описывает наблюдаемые с расстоянием изменения потерь, как показано на рис. 2, а, – R^2 0,967; 0,930 и 0,942 соответственно для частот 0,516; 1,55 и 3,16 кГц. Полином пятой степени лучше описывает тренд, в определенной мере отслеживая длиннопериодные изменения, особенно на высоких частотах – рис. 2, б. В этом случае R^2 равна 0,968, 0,937 и 0,960 соответственно для частот 0,516; 1,55 и 3,16 кГц. Степень полинома можно выбрать, исходя из сложности интерференционной структуры звукового поля. Полиномиальная аппроксимирующая функция отражает степенную зависимость потерь при распространении звука от расстояния, однако содержит переменные по знаку коэффициенты, зависящие от частоты, глубины трансиверов, трассы, что относится к недостаткам аппроксимации тренда функцией этого вида.

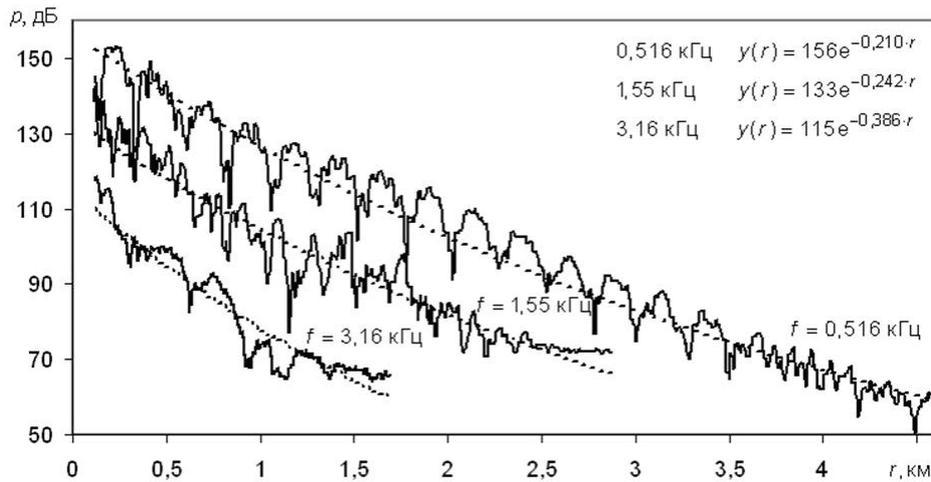
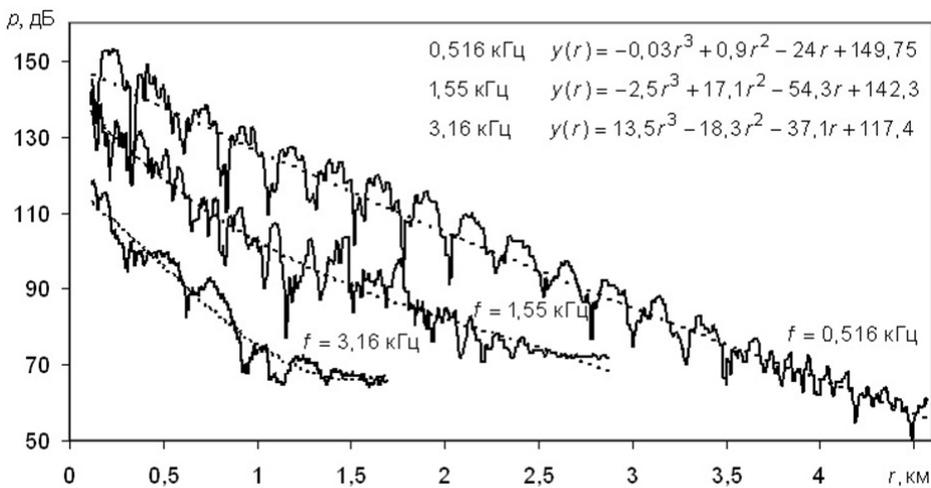
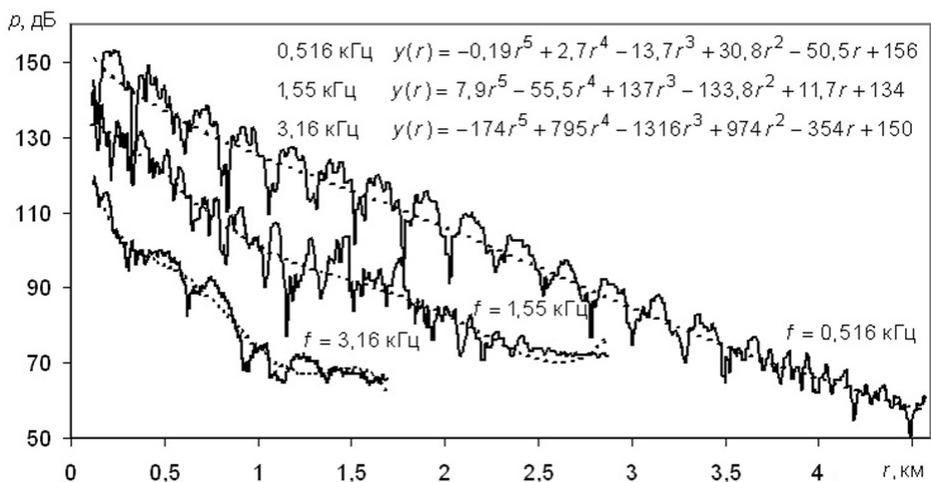


Рис. 1. Зависимость потерь $\rho(r)$ при распространении сигналов трех частот и аппроксимирующие тренд функции $y(r)$ экспоненциального вида



а



б

Рис. 2. Зависимость потерь $\rho(r)$ при распространении сигналов трех частот и аппроксимирующие тренд функции $y(r)$ в виде: а – полинома третьей степени; б – полинома пятой степени

Таким образом, предложены аппроксимирующие функции экспоненциального и полиномиального вида для описания тренда изменения с рас-

стоянием экспериментальных данных о потерях при распространении сигналов трех частот на шельфе Черного моря. Преимуществом экспо-

нentiallyй функции является зависимость исключительно от расстояния, возможность отождествления потерь звуковой энергии с ее экспоненциальным затуханием и подбора для данной частоты показателя экспоненты, одинакового для различных глубин трансиверов и различных трасс. Полиномиальная функция лучше отражает тренд пространственной зависимости потерь, но содержит коэффициенты, которые следует рассматривать в качестве параметров функции.

Выводы

1. Предложена модель потерь энергии при распространении сигналов для гидроакустической информационной сети на шельфе Черного моря в виде тренда изменения потерь, аппроксимируемого функциями экспоненциального и полиномиального вида.

2. Аппроксимирующие функции описывают тренд изменения потерь с достоверностью не менее 0,9 на всем интервале наблюдений по расстоянию при одном неизвестном – расстоянии.

Дальнейшее развитие работы направлено на апробацию модели потерь энергии для всей базы данных и прогнозирование тренда.

Литература

1. Proakis J.G., Sozer E.M., Rice J.A., Stojanovic M.. Shallow water acoustic networks // IEEE Com. Mag. – 2001. – Nov. – P. 114–119.
2. Sozer M., Stojanovic M., Proakis J.G. Underwater acoustic networks // IEEE Journ. Oceanic Eng. – 2000. – Vol. 25, № 1. – P. 72–83.
3. Rice J.A. Telesonar signaling and seaweb underwater wireless networks. – <ftp://ftp.rta.nato.int/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-049/MP-049-17.pdf> (1.05.10)
4. *Безопасность судоходства*. – http://www.tubing.omicro.ru/navigation_safety.html (20.02.10)
5. *Терминологический словарь-справочник по гидроакустике* / Под ред. А.Е. Колесникова. – Л.: Судостроение, 1989. – 368 с.
6. *Плахотный Н.В., Тихановский В.В., Кебкел А.Г.* Особенности широкополосной передачи данных в подводных акустических сенсорных сетях // Проблемы информатизации та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2009. – Вип 1(25). – С.151–158.
7. Stojanovic M., Zvonar Z. Multichannel processing of broad-band multiuser communication signals in shallow water acoustic channels // IEEE Journ. Oceanic Eng. – 1996. – Vol. 21, № 2. – P. 156–166.
8. Edelmann G.F., Song H.C., Kim S., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A., Akal T. Underwater acoustic communications using time reversal // IEEE Journ. Oceanic Eng. – 2005. – Vol. 30, № 4. – P. 852–864.
9. Gibson J., Larraza A., Rice J., Smith K., Xie G. On the impacts and benefits of implementing full-duplex communications links in an underwater acoustic network. – <http://www.demine.org/SCOT/Papers/Gibson.pdf> (29.10.10)
10. *Дивизинюк М.М.* Акустические поля Черного моря – Севастополь: Госокеанариум, 1998. – 352 с.
11. *Фурдуйев А.В.* Акустический мониторинг изменчивости подводной среды. Экспериментальная проверка новых методов // Акуст. ж. – 2001. – Т. 47, № 3. – С. 422–430.
12. *Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 1. Концепция исследований // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАНУ, 2009. – № 6. – С. 10–23.
13. *Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 2. Оценка физической адекватности акустической модели // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАНУ, 2010. – № 7. – С. 58–72
14. *Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Структура звукового поля на шельфе северо-западной части Черного моря: Эксперимент // Консонанс-2009. Акустичний симпозіум (29 вересня – 1 жовтня 2009 р.): Зб. праць – К.: Інститут гідромеханіки НАНУ, 2009. – С. 182–188.
15. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Особенности влияния нижней границы волновода на угловую структуру звукового поля в шельфовых районах северо-западной части Черного моря // Морской гидрофиз. ж. – 2003. – № 5. – С. 40–46.
16. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
17. *Акустика дна океана* / Под ред. У. Купермана, Ф. Енсена. – М.: Мир, 1984. – 454 с.
18. Weston D.E. Intensity range relations in oceanographic acoustic // Journ. Sound and Vibr. – 1971. – Vol. 18, № 2. – P. 271–287.

¹ Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины

² ЧП «Тотнет»