

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ШУМОВЫХ СПЕКТРОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Е. В. АЗАРЕНКО, Л. В. ТРЕТЬЯКОВА, О. В. МАТУЗАЕВА

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Обнаружение и идентификация шумящих объектов (водных транспортных средств) производится шумопеленгаторными станциями, установленными на кораблях и научно исследовательских судах. В основе обнаружения и идентификации положен процесс выделения специфических характеристик шумовых спектров различных плавсредств. Анализируются результаты экспериментов, выполненных по обнаружению водных транспортных средств в различных регионах Черного моря в разные климатические сезоны. Показано, что дальность гидроакустического обнаружения значительно превышает радиолокационное.

ВВЕДЕНИЕ

Морская водная среда насыщена акустическими шумами, которые генерируются земной корой (сейсмические шумы), биологическими организмами (биологические шумы), движением морской воды, вызванной волнением, метеорологическими осадками и др. (шумы синоптического происхождения), а также движением водных транспортных средств [1].

В общем случае водные транспортные средства разделяются на суда, боевые корабли, маломерные плавсредства [2].

Решение целого ряда прикладных задач сопряжено с обнаружением и идентификацией шумящих объектов, которые принято также называть гидроакустическими целями [3]. Каждая гидроакустическая цель обладает присущим только ей шумовым спектром, который имеет такие же звуковые особенности как индивидуальный голос, речь человека [4].

Процесс обнаружения и идентификации шумовых спектров – гидроакустических целей является многофакторным нестационарным процессом, формализация которого позволила бы автоматизировать его составные части, повысить эффективность использования поисковых гидроакустических средств и аппаратуры специального назначения.

ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является математическая формализация процесса обнаружения и идентификации шумовых спектров в Черном море для последующей автоматизации этого процесса или его составных частей, а также повышения эффективности использования шумопеленгаторных средств различного назначения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, разработать математическую модель обнаружения и идентификации шумовых спектров. Во-вторых, разработать методику реализации разработанной модели. В-третьих, проанализировать результаты численных и натурных экспериментов по обнаружению и идентификации гидроакустических целей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ШУМОВЫХ СПЕКТРОВ

Рассмотрим начальные условия создаваемой модели. Энергетический спектр (S) шумов в море по частотному диапазону изменяется от долей Гц до сотен кГц, по звуковому давлению от 10^{-8} Па до сотен Па, которые составляют шумы естественного $S_E(f)$ и искусственного $S_I(f)$ происхождения, т.е.

$$S_{\text{моря}}(f) = S_E(f) + S_I(f) \quad (1)$$

В свою очередь естественные шумы включают в себя шумы динамические (вызванные течением, волнением, турбулентностью, осадками и др.), сейсмические, биологические и шумы искусственной деятельности человека (шумы судоходства, взрывов, специально подаваемых сигналов и др.). Если под спектром естественных и искусственных шумов понимать все множество акустических источников и создаваемых ими шумов, то шум моря – это объединение двух множеств естественных и искусственных шумов, т.е.

$$S_{\text{моря}} = S_E \cup S_I,$$

а для отдельного региона это подмножество S_M^P , которое также определяется объединением двух региональных подмножеств

$$S_M^P = S_E^P \cup S_I^P \quad (2)$$

Если под шумами искусственного происхождения рассматривать только шумы судоходства, то $S_E^D = MS_{jik}$ – множество судовых спектров, где j – класс, i – вид, k – тип транспортного средства. Например: класс – пассажирское судно, вид – сухогруз, тип – Волгобалт; класс – боевой корабль, вид – «корвет», тип – Sprease и т.д.

На распространение звука в водной среде оказывает влияние множество региональных параметров среды, т.е. $МП_{cp}^P$, а на прием гидроакустических сигналов множество параметров гидроакустических станций, с помощью которых ведется обследование водной среды $MR_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}$.

В случае если гидроакустическую цель мы будем рассматривать как один из спектров множества MS_{jik} , то условием его обнаружения будет следующее условие

$$\left[(S_E^P \cup MS_{jik}) \cap МП_{cp}^P \right] \cap MR_{ГАС} \quad (3)$$

Сведем условие обнаружения гидроакустической цели к превышению определенного энергетического порога, то есть

$$MR_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}} \rightarrow G(y) \leq I(y) \quad (4)$$

где $I(y)$ – совокупность шумовых сигналов поступающих на вход ГАС.

Допуская, что

$$I(y) = \left[(S_E^P \cup MS_{jik}) \cap МП_{cp}^P \right] \quad (5)$$

получаем классическую задачу вариационного исчисления, а именно

$$I(y) \geq G(y) \quad \forall y \in D(I) \quad (6)$$

где D – область определения функции I .

Поиск экстремума функционала $I(y)$ может осуществляться по аналогии с задачей

Лагранжа и тогда функционал $I(y)$ предстанет в виде

$$I(y) = \int_{f_n}^{f_v} F(f, y, y') df \quad (7)$$

где f – частота (f_n – нижняя, f_v – верхняя) в полосе пропускания ГАС; y – значение интенсивности входного сигнала.

Локальный экстремум функционала (7), находится как решение дифференциального уравнения Эйлера – Лагранжа, которое для большого класса задач является существенным.

Таким образом, математическая модель поступающих на вход гидроакустической станции шумов описывается функционалом, учитывающего совокупность всех энергетических спектров присутствующих в данном регионе и региональных особенностей распространения акустических волн. Условия появления локальных экстремумов функционала являются условием обнаружения и идентификации шумового спектра.

МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

Пусть в рассматриваемой акватории имеется только одно водное транспортное средство с шумовым спектром S_k . Здесь в этой же акватории имеются шумы естественного происхождения и второго судна – носителя гидроакустической станции – S_n . В полосе частот приемного тракта их спектральные характеристики будут определяться как $I_{S\Delta f}$ – интенсивность гидроакустических помех в полосе станции. Тогда условие обнаружения полезного сигнала будет определяться как

$$I_{SK\Delta f} \geq \delta^2 I_{S\Delta f} \quad (8)$$

где δ – коэффициент распознавания, отношение сигнал-помеха на входе гидроакустической станции, обеспечивающей регистрацию сигнала с заданными значениями правильного обнаружения и ложной тревоги.

Энергетические характеристики распространяющихся акустических волн, генерируемых водным транспортным средством, будут подвергаться следующим изменениям. Во-первых, это расширение фронта акустической волны за счет сферического распространения и соответственно уменьшение ее интенсивности пропорционально удалению D от источника звука, т.е. $\frac{1}{4\pi D^2}$. Во-вторых, это затухание акустических волн за счет релаксационных процессов, которые учитывает коэффициент β , а общее затухание равно $10^{-\beta \times D \times 10^{-4}}$. В-третьих, это влияние стратификации водной среды, которое учитывается множителем A , получившего название фактора аномалии водной среды.

Энергетическое воздействие акустических помех на систему ГАС уменьшается на величину равную коэффициенту направленного действия антенн – j . С учетом вышеизложенного выражения 8 примет вид

$$\frac{I_{SK\Delta f} \times A \times 10^{-\beta \times D \times 10^{-4}}}{4\pi D^2} \geq \delta^2 \frac{I_{S\Delta f}}{j} \quad (9)$$

Произведя логарифмирование обеих частей, умножение на 10 и перегруппировку получим

$$10\lg A - (20\lg D + \beta D \times 10^{-3} + 10\lg 4\pi) \geq 20\lg \delta + 10\lg I_{\text{спл}} - 10\lg I_{\text{скл}} - 10\lg j \quad (10)$$

Левая часть этого неравенства состоит из двух частей – закономерности спада акустического поля в однородной безграничной среде и коэффициента аномалии, который зависит от коэффициента акустического поля, рассчитывается с помощью различных программных продуктов пошагово в зависимости от удаления от источника звука.

Правая часть этого неравенства представляет собой совокупность факторов, определяющих порог обнаружения полезного сигнала.

Дистанция D при которой неравенство (10) становится равенством принимается за максимальную ожидаемую дальность обнаружения. Именно на этом удалении в данной (рассматриваемой) акватории возможно обнаружение определенного водного транспортного средства.

Рассмотрим в качестве примера маломерное плавсредство – катер на подводных крыльях (КПК) «Волна». Спектральные характеристики КПК «Волна» на полном ходу представлены на рис. 1.

Максимальная интенсивность шумов на частоте 3 кГц равна 8,35 Па. Спектр шумов по уровню 0 дБ (и 1 Па) составляет примерно 39,3 кГц от 0,35 до 40 кГц. В низкочастотной части спектра кратно 1,5 кГц, 1 кГц и 2 кГц имеются характерные ступеньки, которые вызваны навигацией на крыльевых системах катера. Высокочастотная часть спектра имеет резкий спад. Если на частоте 5 кГц уровень шума составляет 7,7 Па, то на частоте 10 кГц он уменьшается до 5,2 Па, а на частоте 15 кГц – до 3,2 Па.

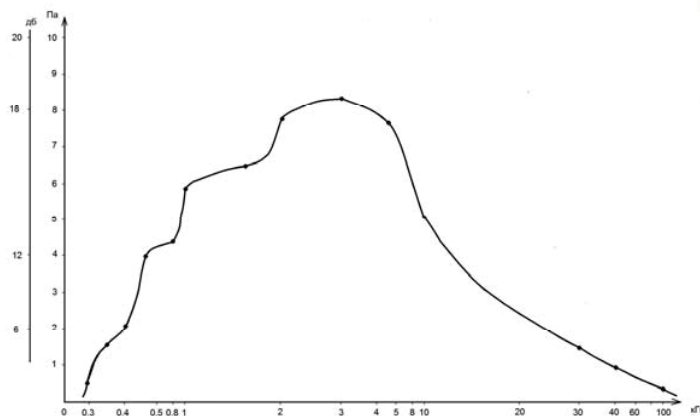


Рис. 1.

Применительно к одному из наиболее распространенных шумопеленгаторов в полосе от 2 до 5 кГц приведенный уровень шумов цели будет определяться как

$$I_{\text{скл}} = \int_{f_n}^{f_6} S(f) df \quad (11)$$

и составит 7,85 Па (18 дБ). Уровень помех в полосе станции при погружении антенны на глубину 30 м составляет $4,75 \times 10^{-4}$ Па, а на глубине 40 м – 1×10^{-4} Па.

Тогда, без учета фактора фокусировки ($A=1$) при имеемых спектральных

соотношениях, решая уравнение (10), получим энергетическую дальность обнаружения КПК Волна, равную 57 кбт при погружении антенн на глубину 30 м и 95 кбт при заглублении ее на 40 м.

Таким образом, методика реализации разработанной математической модели путем решения трансцендентного неравенства соотношения энергетических спектров полезного сигнала (водного транспортного средства) и гидроакустической помехи гидроакустической станции позволяет определить ожидаемую дальность обнаружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО И НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ КПК «ВОЛНА».

Для проведения экспериментов был выбран один из районов Черного моря. В районе проведения эксперимента, при погружении антенны ГАС на глубину 30 м с учетом конфигурации акустического поля фактор аномалии не превышал – 10 дБ на дистанции до 5 км. На расстоянии от 5 до 10 км его величина составила – 11 дБ, а от 10 до 15 км – 12 дБ, и далее – 13 дБ.

Приведенное значение шумов КПК «Волна» в полосе гидроакустической станции диапазон составляет 20 дБ, на скорости хода 27 узлов. Коэффициент осевой концентрации ГАС в режиме шумопеленгования – 100, а коэффициент распознавания – 2.

Приведенное значение помех в полосе гидроакустической станции было равным – (76 – 80) дБ.

Суммируя все перечисленные параметры, получим – (103 – 110) дБ. Составляя эту величину со значениями спада акустического поля, приведенными в таблице 1, получим ожидаемые значения дальностей обнаружения КПК «Волна», которое составляет 45,8 и 75,6 кбт. Следовательно, методика реализации разработанной модели позволяет определить ожидаемые дальности обнаружения шумящих объектов.

Табл. 1

Дальность		Составляющие, дБ			Фактор аномалии, дБ	Итоговое дискретное значение
км	кбт	20lgD	$\beta D_{км}$	Σ		
1	5,4	60,0	0,288	71,278	- 10	- 81
3	16,4	69,54	0,864	81,394	-10	- 91
6	32,8	75,56	1,728	88,278	- 11	- 99
8	43,8	78,06	2,304	81,894	- 11	-102
12	65,6	81,58	3,456	96,026	- 12	- 108
14	76,5	82,92	4,032	97,942	- 12	- 110
16	87,4	84,08	4,608	99,678	- 13	- 113

Методикой проведения натурального эксперимента предусматривалось следующее. Катер, следующий на скорости 27 узлов, сопровождался визуальной и навигационной радиолокационной станцией. В момент, когда катер удалялся от корабля на расстояние 15 кбт, включался секундомер, и выключался, когда контакт с катером на гидроакустической станции пропадал. Дистанция гидроакустического сопровождения D_c определялся как

$$D_c = 15 \text{кбт} + V_k (t_2 - t_1) \quad (12)$$

где V_k – скорость катера (27 узлов = 3 кбт×мин⁻¹); t_1 – время включения секундомера; t_2 – время выключения секундомера.

По радиокоманде с корабля катер разворачивался на обратный курс и следовал к

кораблю. Тепер секундомер запускався в момент гідроакустического обнаружения и останавливался в момент радиолокационного обнаружения. Дистанция гидроакустического обнаружения ($D_{0ГАО}$) в этом случае определялась как

$$D_{0ГАО} = D_{0РЛО} + V_k (t_2 - t_1) \quad (13)$$

где $D_{0РЛО}$ – дистанция радиолокационного обнаружения.

Планом проведения эксперимента предусматривалось выполнение четырех галсов, на восток, на юго-запад.

Результаты первой группы экспериментов представлены в таблице 2.

Табл 2.

№ галса	$t_2 - t_1$	$V_k (t_2 - t_1)$	Дс, кбт	$t_2 - t_1$	$V_k (t_2 - t_1)$	$D_{0РЛО}$	$D_{0ГАС}$
1	14м30с	65,25	80,3	12м	54,0	19,0	73,0
2	14м05с	63,36	78,4	11м	49,5	20,5	70,0
3	14м50с	66,735	81,4	13м	58,5	18	76,5
4	14м20с	64,485	79,5	11м	49,5	21	70,5

Средняя дальность гидроакустического сопровождения составила 80 кбт, а обнаружения – 72,5 кбт, что соответствует теоретическим расчетам.

Таким образом, совпадения результатов численного и натурального экспериментов подтверждают правильность методики реализации разработанной математической модели обнаружения и идентификации шумовых спектров.

ВЫВОДЫ

1. Математическая модель поступающих на вход гидроакустической станции шумов описывается функционалом, учитывающего совокупность всех энергетических спектров присутствующих в данном регионе и региональных особенностей распространения акустических волн. Условия появления локальных экстремумов функционала являются условием обнаружения и идентификации шумового спектра.

2. Методика реализации разработанной математической модели путем решения трансцендентного неравенства соотношения энергетических спектров полезного сигнала - водного транспортного средства, и гидроакустической помехи гидроакустической станции, позволяет определить ожидаемую дальность обнаружения.

3. Совпадения результатов численного и натурального экспериментов подтверждают правильность методики реализации разработанной математической модели обнаружения и идентификации шумовых спектров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шулейкин В.В. Физика моря. М. Наука 1968- 1084 с.
2. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря. Севастополь. Государственный Океанариум. 1998.- 352 с.
3. Азаренко Е.В. Акустическое обнаружение объектов в водной среде. Севастополь. Государственный Океанариум. 2003.- 72 с.
4. Karl D. Kryter. Acoustical model and theory for predicting effects of environmental noise on people.// JASA, vol. 125, №6, p.3707-3721.