

Имитационная модель нестационарного акустического шума морского прибоя

В.И. Луценко¹, И.В. Луценко¹, Иян Ло (Yi-yang Luo)², М.Ф. Бабаков³,
А.В. Соболяк⁴

¹ Институт Радиофизики и Электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, 61085, Харьков, ул. Проскуры, 12, e-mail: secretar@ire.kharkov.ua

² Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4, e-mail: yiyangluo@163.com

³ Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, 61070, Харьков, ул. Чкалова 17, e-mail: AutonomEnergy@khai.edu

⁴ ГП Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А. А. Морозова Украина, 61001, Харьков, ул. Плехановская, 126, e-mail: sobolyak@ukr.net

Предложена имитационная модель нестационарных акустических шумов, создаваемых прибойной полосой, использующая вложенные полумарковские процессы. Проанализированы статистические характеристики шумов прибоя (уровни, законы распределения, спектры) при разных высотах и дистанциях расположения микрофона от зоны прибоя. Показано, что акустические шумы морского прибоя удовлетворительно описываются предложенной моделью, причем в каждом из фазовых состояний закон распределения гауссов, а спектры аппроксимируются степенными функциями.

A simulation model of unsteady acoustic noise created by the surf strip, using nested semi-Markov processes, is proposed. Statistical characteristics of the surf noise (levels, distribution laws, spectra) are analyzed at different heights and distances of the microphone from the surf zone. It is shown that the acoustic noise of the sea surf is satisfactorily described by the proposed model, and in each of the phase states the distribution law is Gaussian, and the spectra are approximated by power-law functions.

Введение

В последнее время все больший интерес проявляется к пассивным акустическим системам, использующим для решения задач обнаружения и определения координат собственные шумы объектов техники. Обнаружение этих сигналов происходит в условиях шумов естественного (шум ветра, листвы, дождя) и антропогенного (шумы движущихся людей, животных) происхождения. Для них характерна существенная нестационарность во времени и, как правило, негауссов характер статистик. Кроме того, в ряде случаев полезные сигналы также являются существенно нестационарным процессом. Поэтому необходима разработка моделей, позволяющих имитировать нестационарную помехово-сигнальную обстановку и методов оценки в ней рабочих характеристик систем акустической разведки. В работах [1-6] предложено использовать вложенные полумарковские процессы [7] для нестационарных негауссовых помех, создаваемых отражениями радиоволн от поверхности моря [1], суши [3], «ясного неба» [2]. Предложенный подход оказался продуктивным и для описания радиолокационных отражений от малоразмерных надводных целей [6]. В работе [8] подобный подход использовался для описания акустических шумов, вызванных ветром, дождем, листвой деревьев, шагами людей и животных, а также звуками выстрелов. В настоящей работе рассмотрена возможность использования его для описания акустических шумов, морского прибоя.

Прибойные волны образуются из ветровых волн или волн зыби при достижении последними берега. Сила их давления на крутой берег достигает десятков тонн на м². Прибойные волны совершают большую геологическую работу, разрушая берег на расстоянии действия приливной волны, в результате чего возникают эрозионные

равнины. На плоском берегу волны перетирают, перемещают материал и образуют пересыпи, береговые валы, косы и другие формы рельефа. К прибойным волнам относятся волны, бегущие по мелководью в направлении постепенного уменьшения глубины воды, несущие на своем переднем склоне бурун вследствие их постепенного разрушения из-за недостаточности глубины воды. [9]. Шум, создаваемый ветром, и разрушением волн в прибойной зоне может существенно усложнять работу систем акустической разведки и мониторинга ситуаций. Следует отметить, что оба эти процесса существенно не стационарны. Причем если для турбулентных пульсаций атмосферы и связанных с ними ветром изучение статистических характеристик имеет давнюю историю, то для шума, создаваемого прибойной волной данные практически отсутствуют. В настоящей работе мы рассмотрим статистические характеристики акустических шумов прибойной волны (спектры, законы распределения) и влияние на них состояния морской поверхности, дальности и высоты наблюдения, а также имитационную модель пригодную для описания акустического сигнала, создаваемого прибойной волной. Проблема выделения полезных акустических сигналов на фоне шумов, прибойной полосы моря, возникает при создании автоматических систем акустической охраны работающих в прибрежной зоне моря.

1. Математическая формулировка модели

Статистическое описание основано на использовании вложенных двухкомпонентных случайных процессов $\{\overline{S}(t), \theta(t)\}$, у которых одна компонента $\overline{S}(t)$ непрерывна, а другая $\theta(t) = \nu_i$ дискретна [6]. Здесь t обобщенная координата, в качестве которой могут выступать время и пространственные координаты. Эти компоненты являются зависимыми и, в общем случае, не Марковскими [7]. Это означает, что не накладывается никаких ограничений на распределение времен существования процесса в каждом из фазовых состояний. Для каждого момента времени, в общем случае, процесс находится в одном из K возможных фазовых состояний $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$. Частным случаем является система с двумя фазовыми состояниями. Полагается известным начальное состояние $\theta_0 = \nu_i$ в момент времени $t = 0$ и одношаговые вероятности перехода π_{ij} , где $i, j = \overline{1 \dots K}$. Сопоставим каждому ненулевому элементу π_{ij} матрицы вероятности перехода случайную величину T_{ij} с плотностью распределения $f_{ij}(t)$, которую будем называть временем ожидания в состоянии ν_i до перехода в состояние ν_j . Если величины T_{ij} распределены по экспоненциальному закону, то такой процесс будет Марковским. На практике, во многих случаях, такое предположение не выполняется, в частности, для отражений от суши и моря [6]. Тогда процесс, у которого смена состояний описывается Марковской цепью, а плотность распределения времен существования в каждом из них отличается от экспоненциальной, относится к классу полумарковских [7]. Внутри каждого из ν_i состояний процесс будем полагать квазистационарным, описывающийся своей плотностью распределения значений $[P_i(S)]$ и спектром $[S_i(\omega)]$. Для описания процесса внутри фазового состояния, в ряде случаев, могут быть использованы стандартные модели гауссовых процессов. Однако могут использоваться и финитные атомарные функции [5, 6].

Для k -фазных процессов с детерминированной сменой фазовых состояний процесса матрица $|\pi_{ij}|$ вероятности перехода будет иметь вид:

$$|\pi_{ij}| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

для двухфазных процессов, таких как отражения от моря, шум ветра, дождя, шум шагов человека звука выстрела $|\pi_{ij}|$ вероятности перехода имеет вид:

$$|\pi_{ij}| = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

В качестве многофазных процессов с детерминированной сменой состояний могут выступать, например, шумы работающего двигателя, многоствольных систем оружия, движущегося человека с дефектами походки и многие другие механические и биологические системы, имеющие циклограмму с количеством состояний более двух. В тоже время для очень большого количества процессов достаточно использование двух фазовых состояний с различными интенсивностями, спектрами и законами распределения значений. Это и радиолокационное отражение от моря и от достаточно однородных участков суши с растительностью, «ясного неба», акустические шумы ветра, шагов движущегося человека (без дефектов походки), выстрелы из одноствольного оружия и т.п. Шумы прибойной волны также могут рассматриваться как двухфазный процесс, одному из фазовых состояний которого соответствует моменты разрушения морской волны, а другому - интервалы между ними. По видимому для описания времен распределения выбросов, связанных с шумом разрушающейся морской волны и пауз - интервалов между ними будут характерны те же особенности, что и для радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности. Это обстоятельство можно использовать для получения статистических характеристик выбросов и интервалов между ними отражений от моря, связанных с отражениями от гребней морских волн с использованием акустического шума прибойной полосы.

2. Пространственное распределение интенсивности излучаемого прибором акустического сигнала

Пусть приемник акустического шума прибора располагается в начале координат, на удалении L_0 и высоте h от линии прибора. Полагая, что интенсивность излучаемого единицей длины разрушающейся морской волны сигнала постоянна и равна σ^0 можно записать интенсивность шума прибора в точке начала координат, как:

$$P_N(L_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_0 dx}{4\pi R^2}, \quad (3)$$

где $R^2 = L_0^2 + x^2$ - дальность до излучающего элемента прибойной волны.

Тогда получаем

$$P_N(L_0, h) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_0 dx}{4\pi(L_0^2 + x^2)} = \frac{\sigma_0 \pi}{4\pi L_0} = \frac{\sigma_0}{4L_0}, \quad (4)$$

т.е. при удалении от линии прибора мощность шума будет уменьшаться пропорционально дальности.

Влияние поверхности моря на уровень шума можно учесть, введя в соотношение (4) интерференционный множитель ослабления поверхности

$$P_N(h) = \frac{\sigma_0}{4L_0} V^2(h) \quad (5)$$

Можно учесть, что интенсивность акустического шума, создаваемого разрушающейся морской волной будет пропорциональна потенциальной и кинетической энергии частиц воды в волне, которые связаны с ее высотой волны H_W^n :

$$\sigma_0 \approx \alpha H_W^n \quad (6)$$

где α и n – характеризуют эту зависимость.

В тоже время для развитого волнения высота морской волны определяется скоростью ветра U :

$$H_{1/3} = 7,2 \cdot 10^{-3} U^{2,5}, \quad (7)$$

$$T = 0,56U, \quad (8)$$

где $H_{1/3}$, T – высота одной трети самых высоких волн и их период, причем

$$H_{1/3} \approx 2H_W, \text{ а } H_W = \sqrt{2\pi\sigma_w}, \quad (9)$$

где H_W , σ_w - средняя и среднеквадратичная высоты морских волн.

Соотношения (4-9) могут быть полезны при анализе характеристик акустического шума прибора.

3. Аппаратура и методика исследований

Измерение уровня шума осуществлялось с использованием стандартного шумомера типа JTS-1357, внешний вид которого показан на рис.1а, а технические характеристики приведены в табл.1. Для изучения статистических характеристик (спектров и законов распределения) излучаемых сигналов осуществлялась их запись на цифровой диктофон типа Olympus VN-480 PC внешний вид, которого показан на рис.1б, а характеристики, приведены в табл. 2.

Измерения шума приборной полосы осуществлялись при различных волнениях моря на разных удалениях от линии прибора и высотах размещения микрофона. Это позволило исследовать зависимость уровня шума и его статистических характеристик (спектров и законов распределения) от геометрии размещения (высоты и дальности до прибора) микрофона и шумомера, а также состояния морской поверхности.



Рис. 1. Внешний вид шумомера (а) и диктофона (б).

Высота расположения микрофона варьировалась от 0,15м до 2м от поверхности раздела, дистанция от 0 до 8м до уреза воды. Фиксируемыми параметрами являлись: высота и дальность до источника шума (зоны приборя), погодные условия во время

эксперимента (температура, влажность воздуха, скорость ветра и состояние волнения (средний период и высота волны)).

Таблица 1. Технические характеристики шумомера JTS-1357

Измеряемый параметр	Величина
Разрешение	0,1 дБ
Точность	± 1,5 дБ
Частотный диапазон:	31.5Гц...8.5КГц
Диапазон измерений	30...130 дБ
Линейный диапазон	50 дБ

Таблица 2. Основные технические характеристики цифрового диктофона Olympus VN-480 PC

Измеряемый параметр	Величина
Продолжительность записи	
• HQ (высокое качество)	около 177 минут
• SP (обычное качество)	около 267 минут
• LP (длительное качество)	около 493 минут
Частоты дискретизации:	
• Режим HQ	16,0 кГц
• Режим SP	10,6 кГц
• Режим LP	5,75 кГц
Общие частотные характеристики:	
• Режим HQ	300...7200 Гц
• Режим SP	300...4700 Гц
• Режим LP	300...2600 Гц
Подключение к компьютеру	порт USB
Объем памяти	64 МБ

4. Экспериментальное изучение влияния высоты и дальности до приборной полосы на статистические характеристики шума

Осуществлялось измерение на фиксированных дальностях уровня шума при различных высотах размещения приемного устройства. На рис.2 приведены примеры временных реализаций шума, снятые на различных высотах от поверхности - рис. 2а,б,в и дальностях - рис. 2г,д,е до приборной полосы. Видно, что при возрастании высоты размещения микрофона происходит увеличение, как среднего уровня акустического шума, так и изменяются его статистические характеристики.

Он становится менее импульсным, а в большей степени подобен шуму. Это проявляется и в его функциях распределения - рис. 3а,б. Функции распределения построены в масштабах линеаризующих нормальный закон распределения, на так называемой нормальной бумаге. Если экспериментальные данные на такой бумаге ложатся на прямую линию, то это означает, что их распределение удовлетворительно описывается – нормальным законом. Степень отклонения от прямой линии свидетельствует об негауссовости экспериментальных данных. Ранее нами было показано [1,6], что если внутри каждого из фазовых состояний процесс описывается гауссовой функцией распределения, то результирующая функция распределения будет полигауссовой, а в случае двухфазовой системы, например, шума приборя - будет описываться составным нормальным законом распределения:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1-p}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) + \frac{p}{\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) \right) \cdot \quad (10)$$

где σ_0 , σ_1 – среднеквадратичные значения процесса при паузах и всплесках,
 p – вероятность всплесков.

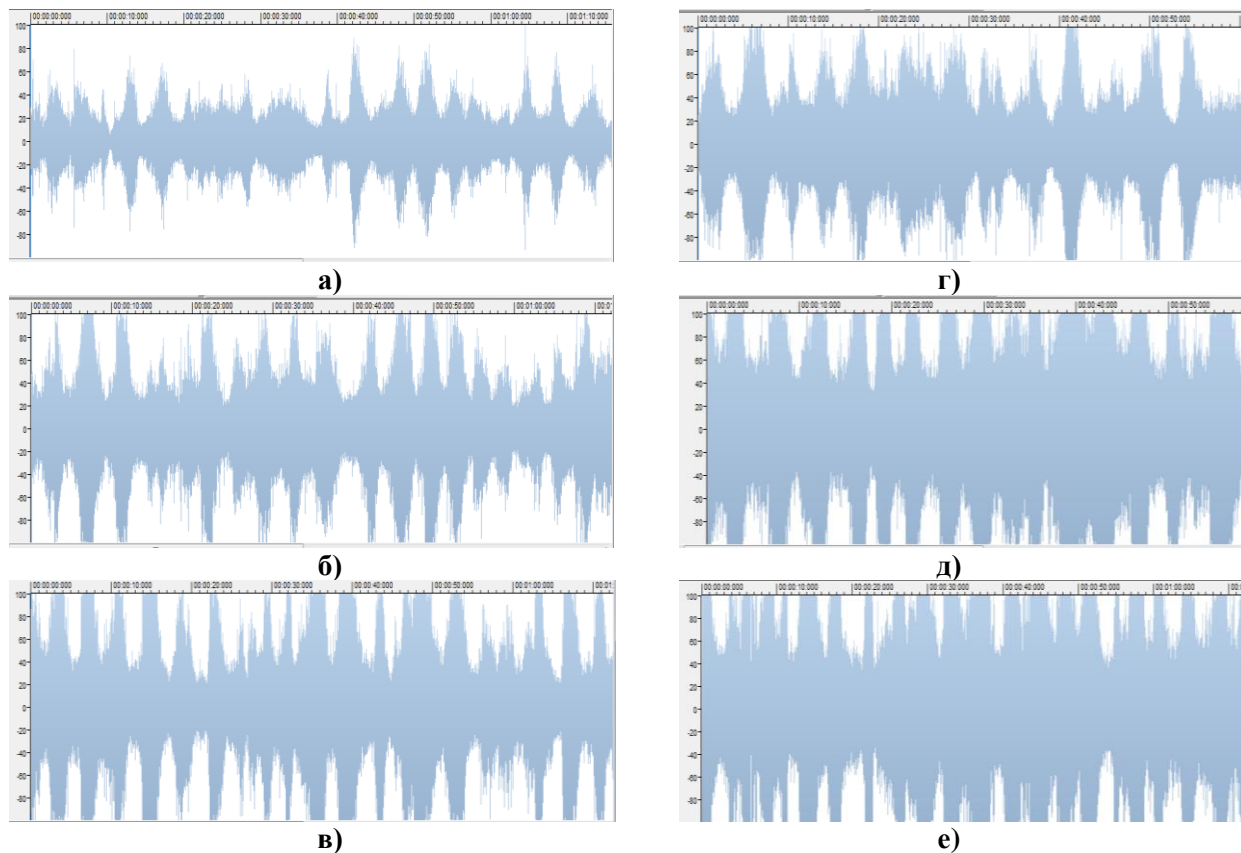


Рис.2. Зависимость уровня акустического шума прибора при разных высотах (а-) размещения приемника и дальностях (д-е) до приборной полосы. Записи 08.08.2018. Средний период волн 3.8 с высота 25-30 см: дальность - $R \approx 8$ м; а- высота - $H \approx 15$ см, б - $H \approx 60$ см, в - $H \approx 100$ см; высота $H \approx 100$ см, г- $R \approx 8$ м, д- $R \approx 4$ м, е- $R \approx 0$ м.

Чем сильнее будут отличаться среднеквадратичные значения, тем в большей степени функция распределения процесса будет отличаться от распределения гауссового шума. Это будет проявляться в большей степени ее S образности. Из рис.2а видно, что снижение высоты расположения микрофона и увеличение дальности до зоны прибора приводит к увеличению степени S образности функции распределения шумов, т.е. при этом происходит возрастание степени их негауссовости. Увеличение степени негауссовости помехи приводит к появлению дополнительных потерь в соотношении сигнал/помеха при обнаружении [10].

На рис.4 приведены спектры акустических шумов, прибора при различных высотах размещения приемника. Видно, что помимо увеличения уровня спектральной плотности шумов при увеличении высоты расположения приемника изменяется и форма спектра. Если в диапазоне частот 150...700Гц разница не превышает 5дБ, то на верхних частотах от 1000Гц до 10000Гц, а также на низких частотах – от 40 до 100Гц она достигает 10дБ. Это связано с влиянием интерференционного ослабления сигнала поверхностью [11].

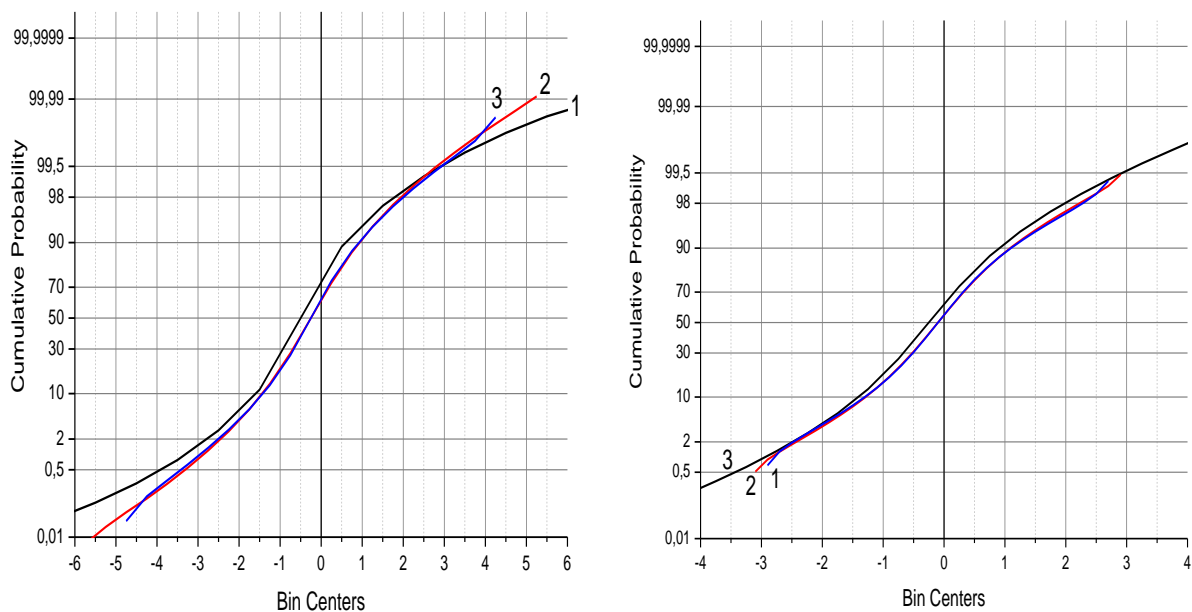


Рис.3. Влияние высоты (а) и дальности (б) до прибойной полосы на функции распределения шума: а – 1- $H \approx 15\text{см}$, 2- $H \approx 60\text{см}$, 3- $H \approx 100\text{см}$; б - 1- $R \approx 0\text{м}$, 2- $R \approx 4\text{м}$, 3- $R \approx 8\text{м}$.

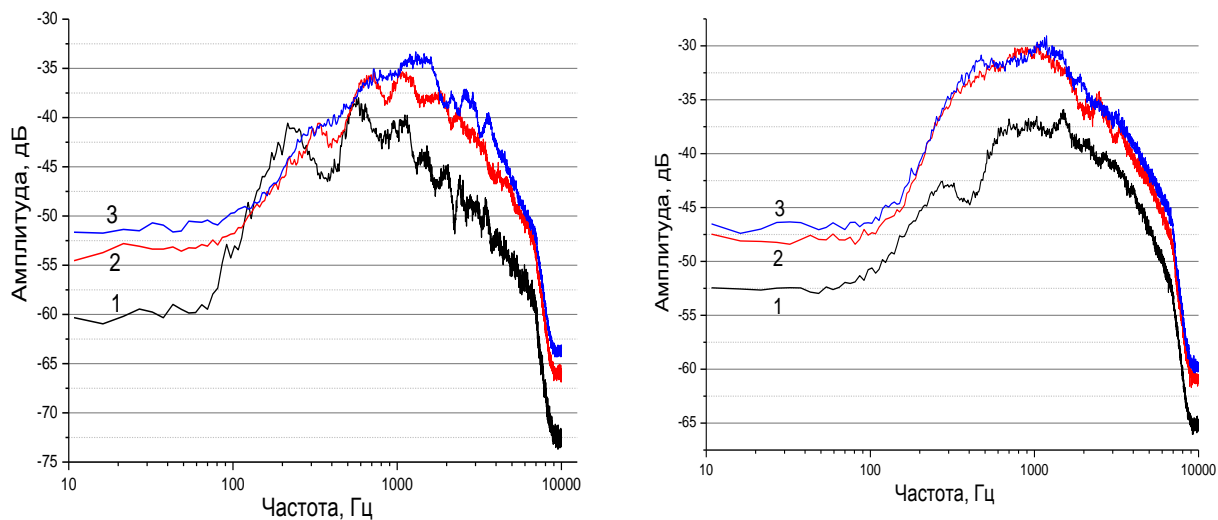


Рис. 4. Влияние высоты (а) и дальности (б) до прибойной полосы на спектры шума: а – 1- $H \approx 15\text{см}$, 2- $H \approx 60\text{см}$, 3- $H \approx 100\text{см}$, 4- $H \approx 150\text{см}$; б - 1- $R \approx 0\text{м}$, 2- $R \approx 4\text{м}$, 3- $R \approx 8\text{м}$.

Увеличение дальности до зоны прибоя также приводит как к уменьшению уровня шума, так и к трансформации его статистик и спектров-рис.2б, 3б.

Различие в наклонах спектров на частотах 1500...6000Гц и 6000...10000Гц связано, по -видимому, с различным спектральным составом процесса при всплесках, связанных с обрушение прибойной волны и паузами. Это подтверждает рис.5, на котором приведены, как временная реализация шума прибоя - рис.5а, так и его спектрограмма - рис.5б.

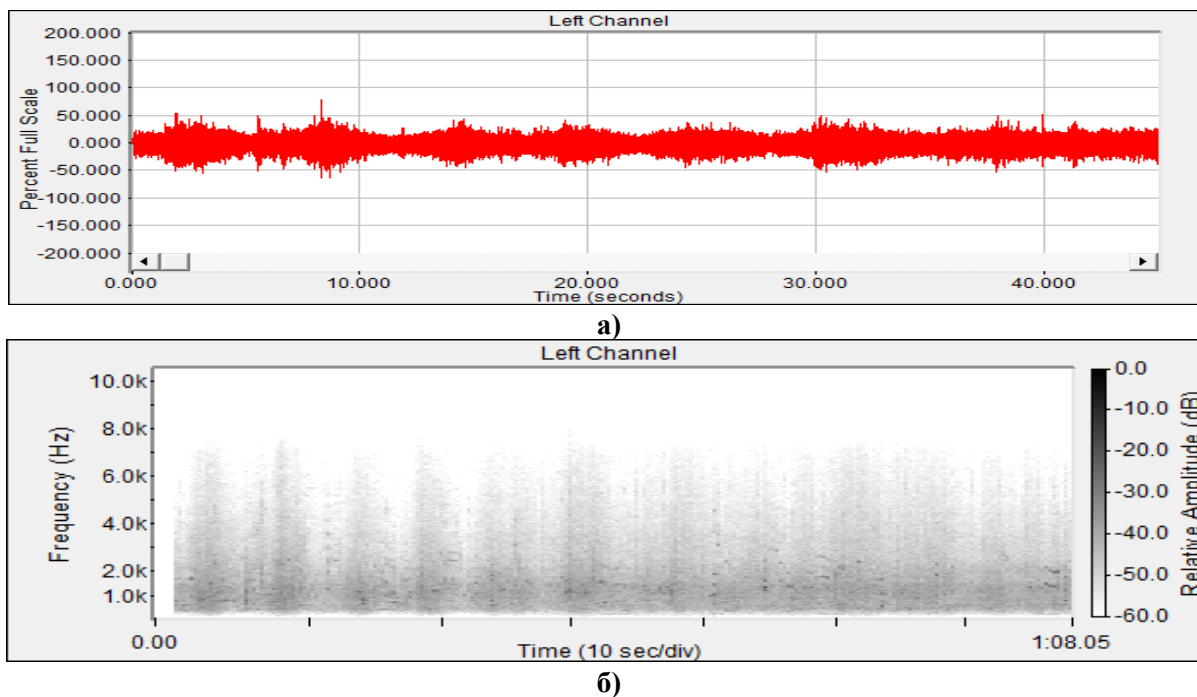


Рис.5. Временная реализация шума прибора (а) и его спектрограмма (б).

Видно, что при возрастании интенсивности шума – рис.5а происходит существенное расширение и его спектра – рис.5б. Так если при паузах спектр прибора сосредоточен в области до 2000Гц, то во время всплесков он расширяется до 6000...8000Гц, т.е. примерно в 3...4 раза. – рис.5б.

Для описания спектра шума прибора при паузах $S_0(f)$ и всплесках $S_1(f)$ можно использовать степенные функции, аналогично тому, как это делалось при описании спектра радиолокационных отражений от моря:

$$S_i(f) = S_{0i} \left[1 + \left(\frac{|F - F_{0i}|}{\Delta F_{0i}} \right)^{n_i} \right]^{-1}, \quad (11)$$

где S_{0i} , F_{0i} , ΔF_{0i} - максимум спектральной плотности, центральное смещение и ширина спектра соответственно в i – фазовом состоянии процесса.

Тогда аналогично (10) спектр двухфазного процесса

Заключение

1. Для описания нестационарных акустических шумов прибора можно использовать вложенные полумарковские процессы с двумя фазовыми состояниями. В каждом из них - паузы или всплески процесс может описываться локально гауссовой моделью. Спектры в каждом из состояний могут аппроксимироваться степенными функциями с различными значениями центральной частоты, ширины спектра и скорости его убывания, причем во время всплесков наблюдается существенное (до 4 раз) расширение спектра, увеличение интенсивности и уровня спектральной плотности и снижение скорости ее убывания.

2. Увеличение дальности и снижение высоты расположения микрофона относительно зоны прибора приводит не только к снижению уровня шума, но и к изменению его статистических характеристик (спектров и законов распределения). Так процесс в большей степени становится импульсным, возрастает его негауссовость. Спектры становятся более узкополосными за счет большего затухания высоких частот

в атмосфере и интерференционного затухания низких частот из-за влияния поверхности.

3. Возрастание волнения и связанное с этим возрастание высоты волны приводит к увеличению шума прибоя, а также периода прибойной волны.

4. Статистические характеристики акустических шумов прибоя (распределение периодов и длительностей выбросов шума прибойной волны могут использоваться при создании имитационных моделей радиолокационных отражений от моря.

Литература

1. Луценко В. И. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от морской поверхности / В. И. Луценко // Успехи современной радиоэлектроники. - 2008. - № 4. - С. 59-73.
2. Lutsenko V. I. Simulation Statistical Model of Reflection from the "Clear-Sky" / V. I. Lutsenko, S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, I. V. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. - 2005. - V. 63, № 5. - P. 371-380.
3. Кравченко В.Ф. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Е.В. Кривенко, А.В. Соболяк // Физические основы приборостроения, 2015, Т.4, №4(17). –С.3-29.
4. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Масалов С.А., Пустовойт В.И. Анализ нестационарных сигналов и полей с использованием вложенных полумарковских процессов. Доклады академии наук. 2013. Т. 453. № 2. С. 151–154.
5. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Луценко В.И., Луценко И.В., Чуриков Д.В. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA-систем функций. Обзор. Часть I. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 2 (11). С. 3-17.
6. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне // М. Физматлит, 2015. -448с.
7. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения В. С. Королюк , А. Ф. Турбин. - Киев: «Наукова думка», 1976. - 184 с.
8. Луценко В.И. Использование полумарковских вложенных процессов для описания нестационарных акустических шумов./ В.И. Луценко, Луценко И.В. , Ло Иян, А.В. Соболяк. // VIII Всероссийские Армандовские чтения IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» [Электронный ресурс]: VIII Всероссийские Армандовские чтения. / Сб. тез. докладов IX научно-практического семинара. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. –С.25-27.
9. Ибрагимов А.М. Нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения для освоения шельфа М.: 1992. 271с.
10. Кравченко В.Ф. Обнаружение сигналов на фоне нестационарных негауссовых помех от подстилающей поверхности / В.Ф. Кравченко О.В. Кравченко В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк. // Физические основы приборостроения, 2016, Т.5, №4(21). –С.23-39.
11. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника, 2015, Том 14, № 2.- С.125-136