ПРИКЛАДНА ФІЗИКА І МАТЕМАТИКА

УДК 534.231.2

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ ПОМЕХ

Е.В. Азаренко, д.ф.-м.н., проф., Т.В. Лагуткина, препод. Т.В. Яшутина

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Показано, что выходной сигнал приемного акустического устройства определяется вектором истинных значений параметров принимаемого акустического сигнала. Соотношение выходного полезного сигнала к помехе изменяется в зависимости от значений весовых функций, которые определяются видом обработки принимаемого сигнала.

Введение

Выделение полезного сигнала на фоне помех было и остается одной из сложнейших задач фундаментальной науки [1]. Ее решение представляется достаточно сложным вследствие влияния на этот процесс множества факторов, а именно в зависимости от вида и интенсивности помех, их изменения в пространстве и во времени, выбранного способа обработки принимаемых сигналов, параметров устройств и элементов регистрации первичного поля и т.д. [2]. Кроме этого, необходимо отметить, что математическое решение таких задач ограничивается конкретными физическими условиями, в которых происходит обнаружение, и которые, в свою очередь, определяют специфику решения задачи [3]. Например, регистрация оптических и электромагнитных сигналов, измерение характеристик тепловых и акустических полей, безусловно, имеют свои особенности, учет которых обеспечивает и решение математической задачи в общем виде, и последующую техническую реализацию на основе полученного решения [4, 5]. Особенности обнаружения акустических сигналов состоят в том, что скорость их распространения в атмосфере не превышает 330 м/с, в водной среде – 1500 м/с, а в грунте – 3000 м/с. Эти значения не соизмеримы со скоростью распространения электромагнитных и оптических волн, равной $3 \cdot 10^9$ м/с. Поэтому решение задачи выделения полезного акустического сигнала на фоне помех требует отдельных формулировок и поиска новых специфических решений.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является получение в общем виде нового решения задачи выделения полезного акустического сигнала на фоне помех. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих научных задач. Во-первых, определить условия решения задачи. Во-вторых, описать функционал плотности вероятности регулярного процесса, поступающего на вход щумопеленгаторной станции. В-третьих, определить функцию правдоподобия полученного сигнала при приеме в гауссовом шуме.

Определение условий решения задачи

Акустический сигнал, генерируемый источником, является случайным процессом $x(t)$, который распространяется в пространстве, ограниченном определенными геометрическими масштабами: горизонтальными $L_Г$ и вертикальными $L_В$. На вход приемного акустического устройства может поступать любая случайная реализация $S(t)$ акустического сигнала.

Акустический сигнал ограничен по частоте. Он может быть низкочастотным, средней или высокой частоты. Принимаемый сигнал может подвергаться фильтрации узкополосными фильтрами. Помеха $n(t)$, воздействующая на принимаемое акустическое устройство, по спектру гораздо шире акустического сигнала и по своим свойствам может приближаться к белому шуму $\left(f_{\min} \to 0,\ f_{\max} \to \infty\right)$. Интенсивность помех и полезного сигнала соизмеримы. Кроме этого, полезный акустический сигнал определяется совокупностью параметров $\Lambda = \left(l_1, \mathbf{K}, l_n\right)$, в конечном итоге зависящих от условий генерации акустического сигнала, что позволяет считать регулярным процесс приема акустического сигнала, а помеху, препятствующую приему, белым или гауссовым шумом.

Функционал плотности вероятности регулярного процесса, поступающего на вход шумопеленгаторной станции

Рассмотрим некоторый случайный процесс $x(t)$, произвольная реализация которого равна $s(t)$, при этом одномерная плотность вероятности описывается d -функцией вида $P\left(x_j\right) = d\left(x_j - s_j\right)$, где $s_j = s\left(t_j\right)$, а n-мерная плотность вероятности равна

$$P\left(x_1, \mathbf{K}, x_n\right) = \prod_{j=1}^{n} d\left(x_j - s_j\right). \quad (1)$$

Заменим для удобства вычисления d -функцию ее предельным выражением:

$$d(x) = \lim_{a \to 0} \frac{1}{a\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right). \quad (2)$$

Переходя в выражении (1) к пределу при условии, что интервал времени $\Delta \to 0$, а $n \to \infty$, и с учетом выражения (2) получим функционал плотности вероятности регулярного процесса $s(t)$, поступающего на вход шумопеленгатора, вида

$$F[x(t)] = \lim_{\substack{a \to 0 \\ \Delta \to 0 \\ n \to \infty}} \left(\frac{1}{a\sqrt{2p}}\right)^n \exp\left(-\frac{1}{2a^2\Delta}\sum_{j=1}^{n}\left(x_j - s_j\right)^2 \Delta\right) = h \lim_{e^2 \to \infty} \exp\left(-e^2 \int_T \left(x(t) - s(t)\right)^2 dt\right). \quad (3)$$

Если сигнал зависит от нескольких случайных параметров $l_1, \mathbf{K}, l_m$, для которых известна совместная плотность вероятности $P\left(l_1, \mathbf{K}, l_m\right)$, то выражение (3) примет вид

$$\begin{aligned} F[x(t)] &= h \lim_{e^2 \to \infty} \exp\left(-e^2 \int_T \left(x(t) - s(t, l_1, \mathbf{K}, l_m)\right)^2 dt\right) = \\ &= h \lim_{e^2 \to \infty} \int \mathbf{K} \int d l_1 \,\mathbf{K}\, d l_m P(l_1, \mathbf{K}, l_m) \times \exp\left(-e^2 \int_T \left(x(t) - s(t, l_1, \mathbf{K}, l_m)\right)^2 dt\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Функция правдоподобия параметров сигнала при приеме в гауссовом шуме

Допустим, что на вход приемного устройства поступает сумма $x(t)$ гауссова шума $n(t)$ и сигнала $s(t,\Lambda)$, где $\Lambda=(l_1,\mathbf{K},l_k)$ зависит от нескольких параметров, т.е.

$$x(t)=n(t)+s(t,\Lambda). \tag{5}$$

Определим функцию правдоподобия вектора параметров Λ. Исходя из того, что функция плотности вероятности гауссова шума имеет вид

$$F[n(t)]=k\exp\left(-\frac{1}{2}\iint_T n(t_1)n(t_2)q(t_1,t_2)dt_1dt_2\right), \tag{6}$$

где $\int_T K(t_1,t)q(t,t_2)dt=d(t_1-t_2)$,

с учетом выражения (5) функция правдоподобия вектора параметров Λ будет иметь вид

$$L(\Lambda)=P[x(t)|\Lambda]=k\exp\left(\iint_T s(t_1,\Lambda)x(t_2)q(t_1,t_2)dt_1dt_2\right). \tag{7}$$

Здесь предполагается, что $\iint_T s(t_1,\Lambda)s(t_2,\Lambda)q(t_1,t_2)dt_1dt_2$ не зависит от величины Λ, что означает, что параметры $\Lambda=(l_1,\mathbf{K},l_k)$ не влияют на величины энергий, содержащихся в сигнале и в производных сигнала.

Рассмотрим весовую функцию $J(t,\Lambda)=\int_T s(t_1,\Lambda)q(t_1,t)dt_1$, удовлетворяющую интегральному уравнению

$$\int_T K(t,t)J(t,\Lambda)dt=s(t,\Lambda), \tag{8}$$

тогда функция правдоподобия преобразуется в выражение

$$L(\Lambda)=k\exp\left(\int_T J(t,\Lambda)x(t)qdt\right). \tag{9}$$

Рассмотрим весовые функции для случайных процессов различных типов. Так, для низкочастотного шума весовая функции равна

$$J(t,\Lambda)=\frac{a}{2s^2}\left(s(t)-\frac{s''(t)}{a^2}\right)+\frac{1}{s^2}\left(s_0-\frac{1}{a}s_0'\right)d(t)+\frac{1}{s^2}\left(s_T+\frac{1}{a}s_T'\right)d(t-T), \tag{10}$$

где $s^2\exp(-a|t|)$, а для узкополосного шума

$$\begin{aligned}J(t,\Lambda)=&\frac{1}{2s^2a_0w_0^2}\left[s^{IV}(t)+(2w_0^2-a_0^2)s''(t)+w_0^4s(t)\right]+\frac{1}{s^2a_0w_0^2}\Big\{d(t)\left[s_0'''+(w_0^2-a_0^2)s_0'+a_0w_0^2s_0\right]+\\&+d(t-T)\left[-s_T'''-(w_0^2-a_0^2)s_T'+a_0w_0^2s_T\right]+d'(t)\left[s_0''-a_0s_0'+w_0^2s_0\right]+\\&+d'(t-T)\left[-s_T''-a_0s_T'-w_0^2s_T\right]\Big\},\end{aligned} \tag{11}$$

где $s^2\exp(-a|t|)\times\left[\cos w_1t+\frac{a}{w_1}\sin w_1|t|\right]$, $w_1^2=w_0^2-a^2$, $a=a_0/2$.

Здесь d -функции и их производные рассматриваются при выполнении краевых условий в точках $t=0$ и $t=T$; $s_0, s_0', s_0'', s_0''', s_T, s_T', s_T'', s_T'''$ - краевые значения сигнала и его производных.

Если при всех возможных значениях параметров $\Lambda=\left(l_1,\mathbf{K},l_k\right)$ сигнал «затухает» к концам интервала времени наблюдения T, то коэффициенты при d -функциях и производных от d -функций равны нулю.

Допустим, что $x(t)=n(t)+s(t,\Lambda_0)$, где $\Lambda_0=\left(l_{10},\mathbf{K},l_{k0}\right)$ – вектор истинных значений параметров принимаемого шумопеленгаторной станцией сигнала, тогда показатель экспоненты является суммой «шумовой» и «сигнальной» функций:

$$\ln L(\Lambda)+C=N(\Lambda)+s(\Lambda,\Lambda_0)=\int_T J(t,\Lambda)s(t,\Lambda_0)dt+\int_T J(t,\Lambda)n(t)dt, \tag{12}$$

где постоянная C не зависит от Λ.

В этом случае сигнальная функция $S(\Lambda,\Lambda_0)$ для низкочастотных шумов будет иметь вид

$$S(\Lambda,\Lambda_0)=\frac{a}{2s^2}\left(\int_T s(t,\Lambda)s(t,\Lambda_0 dt)+\frac{1}{a^2}\int_T s'(t,\Lambda)s'(t,\Lambda_0 dt)\right), \tag{13}$$

а для узкополосного шума

$$\begin{gathered}S(\Lambda,\Lambda_0)=\frac{a}{2s^2 a_0 w_0^2}\times\\ \times\left(\int_T s''(t,\Lambda)s''(t,\Lambda_0)dt-\left(2w_0^2-a_0^2\right)\int_T s'(t,\Lambda)s'(t,\Lambda_0)dt+w_0^4\int_T s(t,\Lambda)s(t,\Lambda_0)dt\right).\end{gathered} \tag{14}$$

Для выходного шума $N(\Lambda)$ характерны такие статистические характеристики:

$$\left\langle N(\Lambda)\right\rangle=0,\left\langle N^2(\Lambda)\right\rangle=\int_T J(t,\Lambda)s(t,\Lambda)dt,\quad \left\langle N(\Lambda_1)N(\Lambda_2)\right\rangle=\int_T J(t,\Lambda_1)s(t,\Lambda_2)dt. \tag{15}$$

Получили, что выходной шум имеет корреляционную функцию, аналогичную по форме выходному сигналу $S(\Lambda,\Lambda_0)$, при этом отношение сигнал/шум в максимуме выходного сигнала равно

$$r^2=\frac{\frac{1}{2}S^2(\Lambda_0,\Lambda_0)}{\left\langle N^2(\Lambda)\right\rangle}=\frac{1}{2}\int_T J(t,\Lambda)s(t,\Lambda)dt. \tag{16}$$

Вывод

Выходной шум имеет корреляционную функцию, повторяющую по форме выходной сигнал, определяемый вектором истинных значений параметров принимаемого акустического сигнала, следовательно, манипулируя весовыми функциями, характеристики которых зависят от способов и методов обработки принимаемых акустических сигналов, можно обеспечить устойчивый прием пеленгуемого акустического сигнала.

РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИДІЛЕННЯ КОРИСНОГО АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ НА ФОНІ ПЕРЕШКОД

О.В. Азаренко, Т.В. Лагуткіна, Т.В. Яшутіна

Показано, що вихідний сигнал приймального акустичного пристрою визначається вектором істинних значень параметрів акустичного сигналу, що приймається. Співвідношення вихідного корисного сигналу до перешкоди змінюється залежно від значень вагових функцій, які визначаються видом обробки сигналу, що приймається.

DECISION of TASK of SELECTION of USEFUL ACOUSTIC SIGNAL on BACKGROUND of HINDRANCES

O. Azarenko, T. Lahutkina, T. Jashutina

It is shown that the output signal of acoustic takers-off is determined by the vector of truth values of parameters of the accepted acoustic signal. Correlation of output useful signal to the hindrance changes depending on the values of gravimetric functions which are determined by the type of the accepted signal processing.

Список использованных источников

1. *Агреновский К.Ю.* Основы теории радиоэлектронных систем морских объектов / К.Ю. Агреновский, П.И. Киселев, Е.А. Сведощ. – Л.: Судостроение, 1974. – 351 с.
2. *Азаренко Е.В.* Акустическое обнаружение объектов в водной среде: монография / Е.В. Азаренко. – Севастополь: Гос. океанариум, 2003. – 71 с.
3. *Дивизинюк М.М.* Акустические поля Черного моря: монография / М.М. Дивизинюк. – Севастополь: Гос. океанариум, 1998. – 352 с.
4. *Азаренко Е.В.* Устройство для обнаружения шума, сопровождающего природные и технические катастрофы / Е.В. Азаренко [и др.] // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2011. – Вип. 4 (40). – С. 75 – 80.
5. *Азаренко Е.В.* Устройство для определения направления на акустические сигналы / Е.В. Азаренко, Ю.Ю. Гончаренко, М.М. Дивизинюк // Вісник ДУІКТ. – К.: ДУІКТ, 2011. – Т. 9. – № 4. – С. 349 – 355.

Надійшла до редакції 17.12.2003 р.

УДК 534.6.08

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПОЛЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

М.М. Дивизинюк, д.ф.-м.н., проф., С.А. Чернявская, к.ф.-м.н., доц.

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Предлагается новый подход к описанию структуры поля скорости звука на основе методов вычислительной томографии. Показано, что восстановление структуры поля скорости звука достигается посредством обратных преобразований Радона.

Введение

Украина является морской державой – более двух пятых акватории Черного моря и две трети Азовского моря составляют ее территориальные воды и исключительную (морскую) экономическую зону. Благодаря этому статусу в Украине возникают такие