

УДК 681.883

DOI: 10.37468/2307-1400-2022-1-48-55

К ФОРМИРОВАНИЮ МОДЕЛИ СЛУХОВОЙ ФУНКЦИИ В ЗАДАЧЕ ОСВЕЩЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ

Бутырский Евгений Юрьевич^{1,2}
Меркачев Николай Васильевич³
Яковлев Алексей Иванович²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Военно-морской политехнический институт Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Сонар», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассматривается масштабное-временное представление акустических сигналов и технические решения по их обработке, позволяющие провести визуализацию окружающей обстановки в условиях ограниченной видимости с использованием слухового анализатора оператора. Осуществляется распространение принципа симметрии физических законов на обработку сигналов от объектов, являющихся целями обнаружения и классификации. Предложены модели масштабного-временного представления акустических сигналов и их обработки для визуализации сцены оператором.

Ключевые слова: частотно-временные характеристики, помеха, слуховой анализатор, бинауральный прием, шумопеленгование.

TO THE FORMATION OF A MODEL OF AUDITORY FUNCTION IN THE TASK OF ILLUMINATING THE ENVIRONMENT

Butyrskiy E. Yu.^{1,2}
Mercachev N. V.³
Yakovlev A. I.²

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² VMPI WONC VMA, St. Petersburg, Russia

³ Sonar LLC, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

The large-scale-temporal representation of acoustic signals and technical solutions for their processing, allowing visualization of the environment in conditions of limited visibility using the operator's auditory analyzer, are considered. The principle of symmetry of physical laws is extended to the processing of signals from objects that are the purposes of detection and classification. Models of scale-time representation of acoustic signals and their processing for visualization of the scene by the operator are proposed.

Keywords: frequency-time characteristics, interference, auditory analyzer, binaural reception, noise making.

Введение

Геополитические процессы, протекающие на мировой арене, в настоящее время приобрели характер управляемого хаоса, но при этом сами «управители», а именно США, не до конца понимают, чем это может обернуться для них самих. Но основная тенденция, которой они руководствуются, сводится к маниакальному желанию ослабить Россию любыми средствами, даже в ущерб себе. Особенно международная ситуация обострилась с начала 2022 года. При этом свою агрессивность «коллективный разум» Запада оправдывает ничем неподкрепленными фактами и абсолютно немотивированной ложью, которые выплескиваются из подконтрольных им СМИ. Но во все времена главным союзником любого государства, вне зависимости от формы правления, является Армия и Флот. Именно Вооруженные силы России, а не либеральные политики и готовые на любое предательство представители так называемой «творческой интеллигенции», позволили России стать независимым и суверенным государством, которое не утратило своей цивилизационной самобытности и способности отстаивать свою мораль и нравственные скрепы, которые Запад у себя почти разрушил. Современные Вооруженные силы РФ невозможно представить без современного радиоэлектронного обеспечения. В частности, современные гидроакустические комплексы (ГАК), представляют собой, по сути дела, автоматизированные системы, в кольце управления которыми находятся операторы. И насколько хорошо согласуются между собой оператор и средства вывода информации, во многом определяет эффективность функционирования ГАК. В связи с вышесказанным материал исследования, представленный в статье, является важным и актуальным как с теоретической, так практической точки зрения.

Условия согласования частотно-временных характеристик со слуховой системой человека

При исследовании физических явлений встает важная проблема определения групп преобразований (внутренних автоморфизмов), не изменяющих свойств исследуемых явлений. Инвариантные преобразования, соотнесенные с совокупностью наблюдений, позволяют выявить характери-

стические показатели объекта исследований. Этот общий принцип можно применить для изучения частотно-временных характеристик слуховой системы человека и найти способ ее согласования с входными сигналами. В данной постановке задача может быть сформулирована как выявление преобразований сигналов в среде не меняющих вероятностных характеристик ответных реакций слуха. Класс таких преобразований называют классом слуховых автоморфизмов.

Под согласованием акустических сигналов со слуховым анализатором человека (САЧ) понимается процедура выбора параметров сигналов и шумов, инвариантных относительно слуховых автоморфизмов, и разработки устройств, оптимизирующих задачу приема сигналов слуховой системой человека.

Важно отметить, что в экспериментах с САЧ фиксировалась энергия сигнала. Указанный параметр сигнала инвариантен относительно группы линейных преобразований времени.

Для определения вероятностных характеристик слуховой системы человека в случае тональных импульсных сигналов, была предложена методика [1].

Анализ экспериментальных данных показал, что максимальная вероятность обнаружения достигалась для сигналов, у которых произведение длительности и частоты являлось константой. Таким образом, при увеличении частоты сигнала область наибольшей эффективности слухового приема смещается в сторону меньших длительностей сигнала и наоборот. Максимум эффективности достигался при произведении длительности сигнала на несущую частоту равном 42. При этом эффективность восприятия была высокой в границах $250 < f < 4000$ Гц.

Важно подчеркнуть, что преобразование, согласующее частотно-временные свойства САЧ, является операция сжатия (расширения) сигнала.

При обработке локационных сигналов САЧ важную роль имеет показатель, характеризующий его разрешающую способность. В работах [2, 3] исследовался принцип инвариантности САЧ относительно изменения масштаба при различении тонально импульсных сигналов. Стимулы представляли собой сумму двух тонально импульсных сигналов.

Как показал эксперимент при фиксированных значениях отношения сигнал/шум и количества волн разрешающая способность САЧ в диапазоне изменения частот от 300 до 3600 можно аппроксимировать прямой линией. Сравнивая полученные данные с результатами работ [4], можно сделать следующие выводы:

Способности САЧ к различению тонально-импульсных сигналов и их обнаружению на фоне шума инвариантны к изменению масштаба в одном и том же диапазоне изменения параметра.

1. Максимальная разрешающая способность САЧ достигается в окрестности 256 волн сигналов, в отличие от эффективности восприятия при обнаружении тонально-импульсных сигналов, когда максимум наблюдается для 42 волн импульса.

2. Из анализа экспериментальных исследований следует, что вероятностные характеристики слуха человека близки к идеальному обнаружителю сигналов, поставленному в одинаковые условия по частотно-временной неопределенности.

Таким образом, для согласования отраженного локационного сигнала со слуховой системой оператора необходимо формировать условия, при которых частотно-временные параметры сигналов совпадали с областью эффективного приема САЧ. Следовательно, САЧ как приемник сигналов реализует эффективную обработку только в определенном диапазоне частот и с определенными размерами масштабов (количеством волн) сигналов. По-видимому, причина этого факта заключается в ограниченном размере «частотно-временного окна» когерентной обработки сигнала для акустического канала. Поэтому в результате эволюции слуховой системе не имело смысла формировать правило обработки сигналов

с размерами превосходящими имеемый размер когерентного приема для среды.

В случае если параметры сигнала не согласованы с областью эффективного САЧ, необходимо указанные параметры преобразовать «разместить» в требуемый частотно-временной диапазон.

Модели бинаурального приема сигналов со слуховой системой человека

В качестве операции согласования сигналов со слуховой системой человека можно применить две операции [7]:

- операцию сжатия (транспонирования) сигналов вида:

$$s(t) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\alpha}} s\left(\frac{t}{\alpha}\right),$$

где α – коэффициент сжатия сигнала; $s(t)$ – исходный сигнал,

- операцию гетеродинамирования (смещения спектра сигнала) сигнала:

$$s(t) \rightarrow s(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi).$$

Геометрия частотно-временных преобразований сигнала при его транспонировании с коэффициентом $\alpha > 1$ представлена на рис.1.

Как видно, операция транспонирования изменяется частотный диапазон сигнала и его длительность, в то время как число полных колебаний сигнала остается неизменным.

Очевидно, что при приеме сигналов в области ультразвуковых частот, например, в диапазоне 20–40 кГц, для согласования в диапазоне 200–400 Гц требуется взять коэффициент транспонирования $\alpha = 50$.

Если из соображений технического характера выбираются сигналы с большим количеством

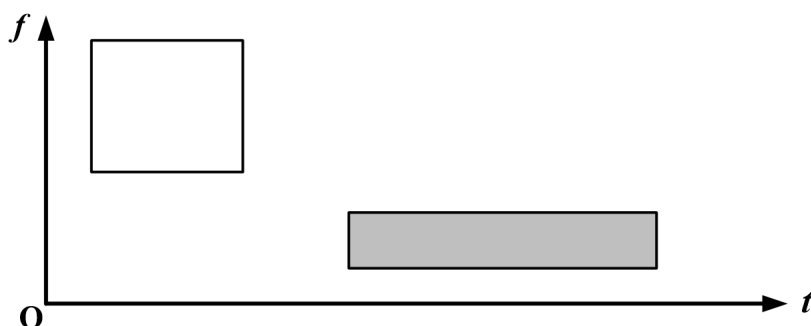


Рисунок 1 – Преобразование частотно-временных свойств сигнала при транспонировании

волн, (сигналы могут иметь в качестве среды распространения не только воздушную среду), то для согласования указанных сигналов недостаточно применение операции транспонирования, т.к. последняя операция изменяет только масштаб сигнала. В этом случае предложено для согласования использовать комбинацию операций транспонирования и гетеродинирования сигналов.

При восприятии окружающей обстановки большая роль принадлежит бинауральному слуху человека. Однако, до настоящего времени в исследованиях САЧ отсутствует модель, позволяющая прогнозировать акустические характеристики анализатора. Для решения задачи проведены сравнительные оценки двух моделей бинаурального слуха с экспериментальными данными САЧ.

Для построения моделей бинаурального слуха особо выделяют методы корреляционного и спектрального анализа, которые широко используют для обнаружения и определения параметров движения целей, измерении динамических характеристик систем и т.д.

Дуальность времени и частоты приводит к тому, что любые функциональные характеристики, полученные с использования корреляционного анализа, могут быть получены также с помощью спектрального анализа. Вместе с тем при представлении результата, а также при проведении практических расчетов выбирают, как правило, запись функциональной характеристики только по одной из переменных, т.е. по координатам времени или частоты. Во многих случаях для построения функциональной характеристики целесообразно руководствоваться следующими простыми соображениями: «короткий» во времени сигнал более предпочтителен для корреляционного анализа, чем длинный сигнал, так как короткий имеет большую энергетическую плотность. Наоборот сигнал, имеющий «узкий» по частотам спектр предпочтителен для спектрального анализа. Поэтому можно ожидать, что при восприятии широкополосных сигналов САЧ реализует временные методы обработки, в то время как при оценке узкополосных сигналов – спектральные методы анализа.

Для выяснения полной физиологической картины этих механизмов САЧ изучим кинематику источников сигналов и параметры сигналов, обе-

спечивающих требуемые свойства САЧ. Для решения указанной задачи воспользуемся принципами, заложенными в основы формирования физических законов – принцип симметрии (инвариантности законов относительно физических групп преобразований) [5]. Для физиологии слуха это означает, что экспериментально определяются группы преобразований сигнала, обуславливающие формирование инвариантных характеристик САЧ.

Для формирования инвариантных характеристик САЧ рассмотрим несколько примеров кинематики источника звука. Предположим, что в начало координат помещена слуховая система, а сигнал от движущегося источника воспринимает сигналы бинаурально. Задача состоит в определении задержки между ушами в функции кинематики источника.

Самый простой пример описывает статическую природу источника звука, т.е. случай, когда скорость источника равна нулю. При гипотезе дальней зоны, т.е. когда фронт волны на приемниках является плоским, задержка между ушами равна:

$$\sin(\psi) = \frac{\tau_0 \cdot c}{L}, \text{ или } \tau_0 = \frac{\sin(\psi)L}{c}, \quad (1)$$

где τ_0 – задержка, L – расстояние между ушами, c – скорость звука в воздухе ($c \approx 330 \text{ м/с}$),

ψ – угол, задающий направление на источник.

В теории слухового приема можно предположить участие в обработке сигналов с целью определения направления на источник звука двух механизмов:

- модель, основанная на гипотезе приеме сигналов САЧ с использованием коррелятора (временная модель),
- модель, основанная на измерении значения фазы узкополосного сигнала (частотная модель).

Остановимся на анализе указанных моделей.

Временная теория основана на гипотезе, что САЧ вычисляет корреляционную функцию и по максимуму ее значения в координате задержки определяет направление на источник звука. Действительно, пусть принимаемые сигналы по двум слуховым каналам $\{y_1, y_2\}$ в интервале $|t| \leq T$ имеют представления:

$$y_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)[s(t - \tau_0) + n_1(t)],$$

$$y_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)[s(t) + n_2(t)],$$

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |t| > \frac{1}{2} \end{cases}$$

где $s(t)$ – сигнал, τ_0 – задержка;

$\text{rect}(t)$ – весовая функция, определяющая интервал наблюдения САЧ;

$n_1(t), n_2(t)$ – шумы 1-го и 2-го каналов соответственно с энергетическими спектральными плотностями $N_1(f)$ и $N_2(f)$.

В качестве оценки направления на источник звука для корреляционной модели бинаурального приема берут оценку взаимной корреляционной функции:

$$\tilde{r}_{y_1 y_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y_1(t) \overline{y_2(t - \tau)} dt. \quad (2)$$

Вычисляя ее среднее, получим:

$$\begin{aligned} \langle \tilde{r}_{y_1 y_2}(\tau) \rangle &= \frac{1}{T} \left\langle \int_{-T/2}^{T/2} y_1(t) \overline{y_2(t - \tau)} dt \right\rangle = \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \langle r_{y_1 y_2}(\tau) \rangle dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \langle (s(t - \tau_0) + n_1(t)) \overline{(s(t - \tau) + n_2(t - \tau))} \rangle dt = \\ &= r_{ss}(\tau - \tau_0), \\ r_{ss}(t - \tau_0) &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t_1) \overline{s(t_1 - t + \tau_0)} dt_1 = \\ &= \frac{1}{T} (s(t) * \overline{s(-t)})(t - \tau_0), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle \dots \rangle$ – оператор усреднения,

Из гипотезы, что САЧ для определения направления на источник широкополосных сигналов прибегает к оценке (3), следует, что максимум взаимной корреляционной функции дает информацию о параметре задержки. Это означает, что при значении $t = \tau_0$ оценка достигает максимума. С другой стороны, значение задержки

связано с направлением на шумящий источник (1).

Для лучшей оценки параметра τ_0 необходимо, чтобы автокорреляционная функция $r_{ss}(t - \tau_0)$ быстро убывала от своего максимума, т.е. желательно, чтобы она стремилась к $\delta(t)$ -функции. Поскольку «протяженность» корреляционной функции по координате τ зависит от ширины спектра сигналов, поступающих на САЧ, видно, что желательно увеличивать ширину полосы сигналов. Математически это условие записывается соотношением:

$$\delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}, \quad (4)$$

где $\delta\tau$ – точность измерения задержки; Δf – полоса анализируемого процесса.

Из анализа (4) можно сделать вывод, что для узкополосных сигналов $\Delta f \rightarrow 0$ разрешающая способность САЧ теоретически при использовании в качестве правила обработки корреляционную функцию (2) будет крайне низкой. С другой стороны известны данные, качественно показывающие, что САЧ эффективно обрабатывает не только широкополосные сигналы, но сигналы с узкой полосой.

Для второй модели бинаурального приема при восприятии узкополосных сигналов переходят к рассмотрению процедуры оценки азимута САЧ в области частот. Применяя преобразование Фурье к автокорреляционной функции, при гипотезе отсутствия дисперсии в акустическом канале передачи сигналов, получим:

$$\begin{aligned} F\{r_{s,s}(t - \tau_0)\} &= F\left\{\frac{1}{T} (s(t) * \overline{s(-t)})(t - \tau_0)\right\} = \\ &= \frac{1}{T} |S(f)|^2 \exp(i2\pi f \tau_0) = \\ &= \frac{1}{T} |S(f)|^2 \exp(i\Psi(\tau_0, f)), \end{aligned} \quad (5)$$

где $2\pi f \tau_0 = \Psi(\tau_0, f)$ – фазовый множитель.

Как видно информация о задержке сигнала содержится только в фазовом множителе $\Psi(\tau_0, f)$. Из соотношения (5) следует:

$$\tau_0 = \frac{\Psi(\tau_0, f)}{2\pi f} \text{ и } \psi = \arcsin\left(\frac{\Psi(\tau_0, f) \cdot \lambda}{2\pi \cdot L}\right). \quad (6)$$

Соотношение (6), по-видимому, составляет основой метода оценки азимута САЧ, так как позволяет судить о направлении на объект даже

при достаточно малом фазовом сдвиге фазы $\Psi(\tau_0, f)$ сигналов на ушных каналах САЧ. Из соотношения $2\pi f \sin(\varphi)L/c$, определяющего набег фазы при бинауральном приеме, следует, что при малых азимутальных углах в процедуре разрешения по углу (при требовании однозначного разрешения) могут участвовать более высокие частоты, в сравнении со случаем приближения азимутальных углов к $\pm 90^\circ$. Непосредственный расчет для азимутальных углов, приближающихся к значению $\pm 90^\circ$, показывает, что частоты, участвующие в разрешении, имеют ограничение верхним значением 900 Гц. Эта картина зависимостей представлена на рис.2.

Указанная зависимость имеет представление

$$f_w = \frac{c}{2\pi L \sin(\psi)},$$

где f_w – верхнее значение частоты принимаемого сигнала.

Запишем правдоподобное правило обработки сигналов в частотной области.

На первом шаге формируется в функции азимутального угла Ψ набор (банк) взаимных спектральных характеристик сигналов $S_{12}(f, \psi)$:

$$S_{12}(f, \psi) = F\{s_1(t)\} \cdot H\{f, \psi\} \overline{F\{s_2(t)\}},$$

На первом шаге формируется в функции азимутального угла Ψ набор (банк) взаимных спектральных характеристик сигналов $S_{12}(f, \psi)$:

$$S_{12}(f, \psi) = F\{s_1(t)\} \cdot H\{f, \psi\} \overline{F\{s_2(t)\}},$$

$$H\{f, \psi\} = \begin{cases} 1 & 0 < |f| \leq \frac{c}{2\pi L \sin(\psi)} \text{ - передаточная} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

ная характеристика фильтра.

где $F\{\dots\}$ – операция преобразования Фурье,

На втором шаге вычислим набор (банк) углов в соответствии с правилом:

$$\Psi(\psi, f) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}\{S_{12}(f, \psi)\}}{\text{Re}\{S_{12}(f, \psi)\}} \right\}.$$

На третьем шаге оценивается дисперсия измененных углов. В случае, когда дисперсия достигает минимума – это является свидетельством об истинном значении угла.

Известно, что окружающий шум вместе с сигналами, как правило, имеют характер спада энергетической характеристики в соответствии с законом $\frac{1}{f}$. С другой стороны эффективная полоса сигнала достигается для «белого» шума, т.е. шума у которого спектральная плотность приближается к константе. Для повышения разрешения по азимуту прибегают к процедуре «отбеливания» поступающего сигнала [6-9]. Можно выдвинуть гипотезу, что в механизмах обработки сигналов САЧ также реализована эта процедура.

Для проверки указанной гипотезы разработаны два алгоритма и сформирована статистическая процедура ее проверки в среде MathCAD. Алгоритм обработки включал процедуры:

1. Вычисления положение максимума корреляционной функции.
2. Формирования сигналов.
3. Оценки данных от моделей.
4. Моделирования механизмов бинаурального приема.

В качестве сигнала в статистическом эксперименте, а затем в эксперименте со САЧ использовался генератор шума с постоянной спектральной

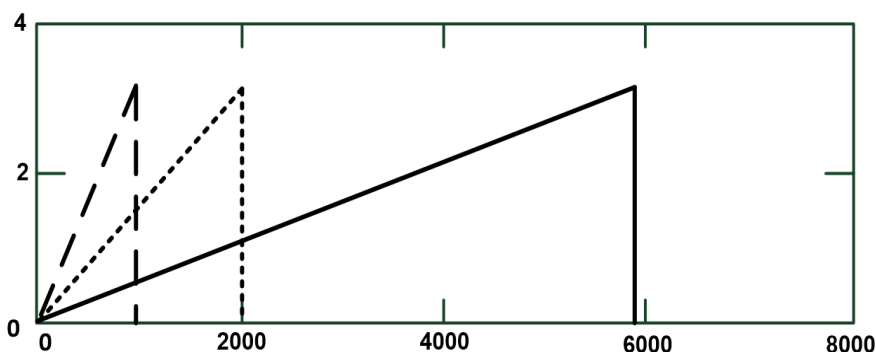


Рисунок 2 – Зависимость изменения набег фазы в функции частоты для различных значений азимута непрерывная линия азимут 9° , мелкий пунктир – азимут 27° , крупный пунктир – азимут 90°

плотностью. Частотные свойства сигнала задавались границами полосы и значением центральной частоты. Для широкополосного сигнала выбиралась широкая полоса, в то время как для узкополосного случая – полоса, локализованная вокруг центральной частоты сигнала:

1. Маскирующая помеха выбиралась в полосе перекрывающей полосу сигнала;
2. Статистическая процедура – стандартная. Задач заключалась в формировании матриц ответов (решений) двух моделей процедур;
3. В качестве мер оценки эффективности моделей и сравнения с данными САЧ были выбраны: информация, переданная через канал с аддитивным шумом, мера расхождения гипотез и отношение $\sqrt{\frac{2E}{N}}$, где E – энергия сигнала, N – спектральная плотность шума маскирующей помехи.

Алгоритмы оптимального согласования акустических сигналов со слухом

Сравнительные оценки моделей и САЧ являлись исходными данными для оптимального согласования локационных сигналов со слухом человека.

Для улучшения распознавания объектов, составляющих акустическую сцену, был разработан метод акустического представления пространственной информации [2], заключающийся в излучении ультразвукового частотно-модулированного импульса, бинауральном приеме эхосигнала на два ультразвуковых микрофона, усилении, преобразовании электрических сигналов в акустические, согласованной фильтрации эхосигналов, временном растяжении полученных откликов в каналах бинаурального приема в a раз, где $a = -a = f1/f2$, $f1$ – несущая частота зондирующего сигнала, $f2$ – средняя частота диапазона воспринимаемого слуховым анализатором человека, последующим восприятием сигналов слуховым анализатором человека, отличающийся использованием после операции согласованной фильтрации многоканальной масштабнo-временной фильтрацией откликов, с последующим весовым суммированием с корректирующими коэффициентами усиления на каждом масштабе.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Излучается ультразвуковой ЧМ импульс. В качестве зондирующего можно использовать

любой сложный или шумоподобный сигнал, для которого выполняется условие $TW \gg 1$, где T – длительность сигнала, W – его полоса. Однако исследования животных, например, летучих мышей, показывает, что животные используют ЧМ сигналы с большой (до 100 кГц) девиацией частоты, в пределах его длительности, которая составляет единицы мс. Входной сигнал $X(x,t)$ с учетом пространственной координаты представляет собой свертку зондирующего импульса $S(x,t)$ с импульсной характеристикой рассеивающего объекта $h(x,t)$:

$$X(x,t) = S(x,t) \otimes h(x,t)$$

При согласованной фильтрации входного процесса отклик будет иметь вид:

$$X(x,t) = S(x,t) \otimes h(x,t) \otimes S(x,-t)$$

При базе сигнала $B \gg 1$, что справедливо, например, для сигнала с девиацией частоты 40 кГц и длительностью 1 мс, корреляционная функция образует весьма острый пик и, следовательно свертка $S(x,t) \otimes S(x,-t)$ близка к δ -функции:

$$S(x,t) \otimes S(x,-t) = \delta(x,t). \tag{7}$$

С учетом (7) отклик согласованного фильтра составит:

$$X(x,t) = h(x,t) \otimes \delta(x,-t) = h(x,t).$$

Другими словами, отклик согласованного фильтра близок к импульсной характеристике рассеивающего объекта.

Для восприятия УЗ сигнала слуховым анализатором оператора производят его временное растяжение по закону

$$X(x,t) \rightarrow X(x/\alpha, t/\alpha),$$

где $\alpha = f1/f2$, $f1$ – несущая частота зондирующего сигнала,

$f2$ – средняя частота диапазона, воспринимаемого слуховым анализатором человека.

Предположим, используются зондирующие импульсы с несущей частотой 80 кГц, а средняя частота слышимого диапазона 1,2 кГц. В этом случае $\alpha \sim 66$. Если сигнал длительностью T испытывает отражение от объекта с протяженностью в пространстве L , длительность отклика

СФ τ_{CF} можно оценить как $\frac{2L}{c}$. Например, при $L = 0,5$ м $\tau_{CF} = \frac{2L}{c}$, $\tau_{CF} \sim 3$ мс. После временного растяжения длительность сигнала, поступающего на САЧ, составит $\tau_{CF} \sim 200$ мс. Такое увеличение длительности важно при восприятии, поскольку сигналы длительностью меньше 0,2 с распознаются с трудом. После согласованной фильтрации производят многоканальную масштабно-временную фильтрацию откликов (Вейвлет-преобразование) с регулируемыми коэффициентами усиления в каждом частотном канале, с последующей операцией суммирования выходов каждого канала. Предварительное тестирование слуховой системы оператора позволяет сформировать корректирующие масштабно-временные коэффициенты индивидуальные для каждого пользователя.

Предложенный подход может быть использован при разработке технических решений в задаче освещения подводной обстановки.

Выводы

1. Максимальная разрешающая способность САЧ достигается в окрестности 256 волн сигналов, в отличие от эффективности восприятия при обнаружении тонально-импульсных сигналов, когда максимум наблюдается для 42 волн импульса;

2. Рассмотрены модель бинаурального приема САЧ и оценка его разрешающей способности по направлению (азимуту).

3. Для улучшения распознавания объектов, составляющих акустическую сцену, разработан метод акустического представления пространственной информации.

Список литературы

1. Сапрыкин В.А., Белов Б.И. Вероятностные характеристики слуховой системы человека при восприятии тонально-импульсных сигналов // Биофизика. – 1968. – Т. 13. – С. 1085.
2. Патент РФ № 2523340 от 23.05.2014. Способ акустического представления окружающей обстановки для пользователей: заяв. № 2012148292/14. / Сапрыкин В.А., Яковлев А.И. и др.
3. Сапрыкин В.А., Никитин Ю.К. Исследование разрешающей способности слухового анализатора человека // Биофизика. – 1977. – Т. 22. – №. 4. – С.706.
4. Сапрыкин В.А. и др. Инвариантность восприятия свойств слухового анализатора дельфина при дифференцировке тонально-импульсных сигналов // Доклады АН СССР. – 1975. – Т.221. – № 4. – С. 999.
5. Вейль Г., Симметрия. – М.: Наука, 1968. – 192 с.

Статья поступила в редакцию 12 января 2022 г.

Принята к публикации 10 марта 2022 г.

Ссылка для цитирования: Бутырский Е. Ю., Меркачев Н. В., Яковлев А. И. К формированию модели слуховой функции в задаче освещения окружающей обстановки // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 1(37). С. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2022-1-48-55>

Сведения об авторах:

БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории управления Санкт-Петербургского государственного университета, профессор кафедры гидроакустики Военно-морской политехнический институт Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА), г. Санкт-Петербург
e-mail: evgenira88@mail.ru

МЕРКАЧЕВ НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – главный конструктор ООО «Сонар», Санкт-Петербург
e-mail: mnv_npp_rif@mail.ru

ЯКОВЛЕВ АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Военно-морской политехнический институт Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА), г. Санкт-Петербург
e-mail: Aleksej_yakovlev@mail.ru