

УДК 534.222:681.883

© Мироненко М.В., Стародубцев П.А., Стародубцев Е.П.
Mironenko M., Starodubtsev P., Starodubtsev E.**ОПТИМАЛЬНОСТЬ В ВОПРОСАХ ФИЛЬТРАЦИИ И НЕКОТОРЫЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОПОЛНЕНИЯ В ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ****OPTIMALITY IN THE FILTRATION AND SOME TECHNOLOGICAL SUPPLEMENT
TO THE SIGNALS PROCESSING FOR DETECTION OF MARINE OBJECTS
AND PHYSICAL PHENOMENS**

Аннотация. В статье представлен краткий анализ современной теории оптимальности и использования ее технологических решений в конструктивных схемах гидроакустических средств, используемых для обнаружения морских объектов и физических явлений. Рассмотрены недостатки данных решений и направления их модернизации путем создания методики обработки гидроакустических сигналов в сложной помеховой обстановке, которая объединяет теорию обнаружения сигналов, прикладную статистику, теорию информации и цифровую обработку сигналов.

Annotation. The article presents a brief analysis of the modern theory of optimality and its use of technology in meaningful patterns of sonar used for detection of marine objects and physical phenomena. The shortcomings of these decisions and the direction of modernization by creating a procedure for processing sonar signals in difficult noise conditions, which combines signal detection theory, applied statistics, information theory and digital signal processing.

Ключевые слова. Оптимальность, обнаружение морских объектов, методика обработки гидроакустических сигналов.

Key words. Optimality, the detection of marine objects, methods of processing sonar signals.

Введение

Теория оптимальности – это раздел современной науки, где проводятся исследования в любом направлении. Но в теории оптимальности, используемой в гидроакустике, данный вопрос ставится иначе. Она занимается поиском самого эффективного алгоритма в конкретных условиях. Смысл такого алгоритма заключается в принятии локально оптимальных решений при каждой операции, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным. Как любая научная система, оптимальность имеет оценочные критерии. В качестве оценочного критерия оптимальности для случая обнаружения морских объек-

тов и физических явлений может пониматься признак, на основании которого производится сравнительная оценка возможных решений (альтернатив) и выбор наилучшего путем использования всевозможных технологических решений, в том числе и режима фильтрации. В практике обработки гидроакустических данных для решения задач оптимальности используются три основных критерия построения оптимальных фильтров: минимум среднего квадратического отклонения профильтрованного сигнала от его действительного или заданного значения; максимум отношения сигнал/шум (с/ш); максимум энергетического отношения с/ш на выходе фильтра [1].

Мироненко Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ТОВМИ имени С.О. Макарова, тел. 8-423-227-67-10;

Стародубцев Павел Анатольевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Гидроакустики ТОВМИ имени С.О. Макарова;

Стародубцев Евгений Павлович – преподаватель кафедры Гидроакустики ТОВМИ имени С.О. Макарова.

Mironenko, Mikhail – doctor of technical sciences, professor, senior fellow at the research laboratory TOVMI behalf of S.O. Makarova, tel. 8-423-227-67-10;

Starodubtsev Pavel – doctor of technical sciences, professor, professor of sonar TOVMI behalf of S.O. Makarova;
Starodubtsev Evgeniy – lecturer in underwater acoustics TOVMI behalf of S.O. Makarova.

Основная часть

В этих условиях ставится задача реализации оптимальных фильтров, которые, в зависимости от своего конкретного назначения, позволяют достаточно надежно производить: обнаружение гидроакустического сигнала; наилучшим образом выделять гидроакустический сигнал на фоне помех; в максимальной степени подавлять помехи без существенного искажения гидроакустического сигнала. Для гидроакустики как оборонной, так и прикладной для народного хозяйства, синтез оптимальных фильтров производится с максимальным использованием известной априорной информации как о гидроакустических сигналах, которые необходимо выделить, так и о морских шумах и гидроакустических помехах.

В практике синтеза оптимальных фильтров считается, что априорные данные о полезных гидроакустических сигналах, как правило, являются достаточно определенными. Это гауссовский шум с распределением значений гидроакустического сигнала в виде нормального закона. Оценка характеристик воздействующих гидроакустических помех на входе приемного устройства гидроакустической станции (ГАС) представляет собой еще более сложную проблему. При полной неопределенности знания закона распределения гидроакустической помехи допускается, что она является также нормальным стационарным процессом с нулевым средним значением. Такое утверждение в реальных условиях приема и обработки гидроакустических сигналов ГАС в море как для сигнала, так и помехи является достаточно спорным и не обоснованным.

Все это наглядно демонстрирует, что теория оптимальности фильтрации и оптимальная обработка гидроакустических сигналов, как ее составная часть, в задачах обнаружения морских объектов и явлений, зависят от знания и последовательности операций выделения спектра источника полезного сигнала и собственной гидроакустической помехи.

Это требуют создания методик оптимальной фильтрации и обработки гидроакустических сигналов для обнаружения слабых сигналов от малошумных морских объектов и природных явлений в сложной помеховой обстановке, которая бы объединяла теорию обнаружения сигналов, прикладную статистику, теорию информации и цифровой обработки сигнала.

Такая автоматизированная методика представлена в работе [2] и основана на применении пассивной мультистатистической схемы (МС). Последовательность операций, реализованных в данной схеме, позволяет определять разности фаз спектральных компонент гидроаку-

стических сигналов, принятых на два горизонтально-разнесенных в шельфовой зоне острова Сахалин приемных элементах, и обнаруживать морские объекты и физические явления при отношении $c/\psi \leq 1$.

Методика состоит из последовательности следующих операций: деконволюции гидроакустических сигналов; расчета общего энергетического спектра принятого гидроакустического сигнала; деления общего спектра по пространственно-частотным диапазонам, характерным для различных морских объектов с учетом любой интенсивности дискретных составляющих; расчета спектральной плотности гидроакустического сигнала и перевод его в состояние оптимизированного по максимуму энергетического отношения c/ψ ; определения фазы всех спектральных компонент и общего фазового спектра оптимизированного сигнала; синхронизации спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами, связанными хаотическими осцилляторами, и расчета разности фаз между ними; построения пространственно-частотных областей разности фаз спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами МС.

Деконволюция или обратная свертка в МС применяется для сжатия гидроакустических сигналов с целью повышения временного или пространственного разрешения результатов проведенных измерений по обоим каналам. Она представляет собой процесс восстановления и выделения полезного сигнала, несущего в себе информацию о структуре и характеристиках спектров морских объектов и физических явлений.

Для ее проведения в МС используются операторы оптимальных инверсных фильтров, вычисленные по прямому оператору, чем решается задача достаточно устойчивого выделения суммарного (несущего в себе характеристики морских объектов) сигнала на фоне различного по составу шума при отношении $c/\psi \leq 1$. Если для прямой свертки $y(k)$ сигнала $x(k)$ с импульсными откликами $h(n)$ линейной системы и $H(z)$ обратной свертки имеется уравнение

$$y(k) = h(n) * x(k) \Leftrightarrow H(z)X(z) = Y(z), \quad (1)$$

то возможно решение задачи деконволюции с определением суммарного сигнала на входе линейной системы по значениям выходного сигнала

$$\begin{aligned} X(z) = u(t) + v(t) = Y(z) / H(z) = \\ = Y(z)H^{-1}(z) \Leftrightarrow y(k) * h^{-1}(n) = x(k), \end{aligned} \quad (2)$$

где индексом «-1» символически обозначен оператор обратного фильтра, инверсный прямому;

$u(t)$ – энергия суммарного сигнала (включая помеху);

$v(t)$ – энергия полезного сигнала с характеристиками морского объекта.

Энергия суммарного сигнала, содержащего помеху и полезный сигнал определяется как

$$E_{uv} = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)v(t)dt. \quad (3)$$

Из очевидной однозначности энергии взаимодействия сигналов независимо от формы их математического представления (в динамической и частотной модели) следует выражение для скалярного произведения произвольных вещественных сигналов $u(t)$ и $v(t)$ через спектральные плотности сигналов $U(\omega)$ и $V(\omega)$ в комплексном гильбертовом пространстве

$$\begin{aligned} P_{uv} &= (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} U(\omega)V^*(\omega)d\omega \equiv \\ &\equiv (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} U^*(\omega)V(\omega)d\omega. \end{aligned} \quad (4)$$

Функции $W_{uv}(\omega) = U(\omega)V^*(\omega)$, $W_{vu}(\omega) = U^*(\omega)V(\omega)$, $W_{uv}(\omega) = W_{vu}^*(\omega)$, для которых справедливо выражение (4), есть взаимные энергетические спектры вещественных сигналов, и являются функциями распределения плотности энергии взаимодействия сигналов (мощности взаимодействия) по частоте. Это позволяет провести разделение взаимного энергетического спектра по пространственно-частотным диапазонам, характерным для различных морских объектов, перевести его в состояние оптимизированного, удалив все «помеховые» или ненужные диапазоны для расчета общего фазового спектра оптимизированного сигнала от морского объекта или физического явления. Расчет фазового спектра проводится с использованием алгоритма *cordic*, представляющего собой совокупность эффективных методов поворота вектора вещественных значений сигнала $(x, y) = x + jy$ с помощью операций сложения и сдвига. Данные операции описываются выражениями

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \alpha x_k \pm \beta y_k; \\ y_{k+1} &= \alpha y_k \pm \beta x_k \end{aligned} \quad (5)$$

для вектора, повернутого на угол $\Theta = \pm \arctg[\beta/\alpha]$. В свою очередь выражение (5) для арктангенса выглядит как

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k - \delta_k y_k 2^{-k}; y_{k+1} = y_k + \delta_k x_k 2^{-k}; \\ z_{k+1} &= z_k - \delta_k \varepsilon_k; \\ \delta_k &= -\text{sgn } y_k; \varepsilon_k = \arctg(2^{-k}); z_0 = 0; \\ z_{n+1} &\approx \arctg(y_0/x_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Это обеспечивает фиксированное время латентности, независимость от разрядности входных данных и устойчивость расчета фазы всех спектральных ком-

понент и общего фазового спектра оптимизированного сигнала. Проводимая затем фазовая синхронизация приводит к захвату фаз хаотических сигналов, «совпадению» диапазонов частот их спектральных компонент между двумя горизонтально разнесенными приемниками, в то время как амплитуды этих сигналов остаются независимыми и выглядят хаотическими. Явление фазовой синхронизации проявляется как синхронное поведение фаз связанных хаотических осцилляторов (сигналов) на определенных временных масштабах S , которые также являются синхронизованными

$$|\varphi_{s1}(t) - \varphi_{s2}(t)| < const. \quad (7)$$

В идеале осцилляторы стремятся к режиму лаг-синхронизации $x_1(t) \approx x_2(t)$, когда разность фаз $|\varphi_{s1}(t) - \varphi_{s2}(t)|$ спектральных компонент (или диапазонов частот) будет стремиться к нулю для всех временных масштабов. Но это сложно достижимо в практике, ввиду наличия набега фаз. Если два связанных хаотических осциллятора находятся в режиме лаг-синхронизации, их мгновенные фазы, соответствующие какой-то одной спектральной компоненте f Фурье-спектров $S_{1,2}(f)$, связаны между собой как $\varphi_{s2}(t) \approx \varphi_{s1}(t) + 2\pi\tau f$, а следовательно, разность фаз (набег фаз по τ) $|\varphi_1(t) - \varphi_2(t)|$ подчиняется соотношению

$$\Delta\varphi_f = |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)| = 2\pi\tau f. \quad (8)$$

Если из дискретно измеренного фазового спектра оптимизированного сигнала одного приемника вычесть значения фазового спектра другого, согласно (8), то можно получить мгновенные пространственно-частотные области разности фаз спектральных компонент фазовых спектров оптимизированных сигналов между двумя горизонтально-разнесенными приемными элементами мультистатической схемы от морских объектов или физических явлений.

Используя элементы *frequency domain* обработки сигналов и прикладной статистики, можно определить их пространственное расположение. Данная операция является индивидуальной для каждого случая обработки сигналов и требует дополнительной априорной информации. Кроме обычного энергетического спектра, определяющего спектральную плотность оптимизированного сигнала, измеряется фазовый спектр фаз всех спектральных компонент исследуемого сигнала в особой точке, принятой за нулевую разности хода в МС, и которая исключает необходимость в дополнительном делении сигнала по каналам.

По предложенной выше методике [2], в начале анализируется и уточняется энергетический спектр совокупности сигналов, принятых на приемник, который

в МС определен первым. Для него определяется фазовый спектр. На основании этого спектра вырабатываются мгновенные частотные и временные показатели для каждой спектральной компоненты по пределам изменения мгновенной фазы и частотного интервала, в котором она может находиться. В случае (рис.1), когда в энергетическом спектре сигнала отсутствуют спектральные компоненты, превышающие $c/\varnothing > 1$, то над ним проводится операции компрессии через аддитивный компенсатор помех. Она позволяет путем набора оптимальных весовых окон выявлять и усиливать спектральные компоненты, отсутствующие в первичном Фурье-спектре, и уменьшать влияние наиболее интенсивных спектральных компонент.

При проведении численного моделирования операция синхронизации спектральных компонент фазового спектра гидроакустических сигналов были взяты реальные данные, измеренные в гидроакустической бассейне ТОВМИ имени С.О.Макарова, с дискретными временными рядами конечной длины, поэтому вместо непрерывного Фурье - преобразования использовался его дискретный аналог.

На рис.1,*a* [2,3], показана зависимость величины коэффициента синхронизации (σ_L) от значения параметра

связи ε между хаотическими осцилляторами приемников. Видно, что с увеличением ε связи σ_L стремится к нулю. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемой МС наступил режим лаг-синхронизации. На рис.1,*b-e* иллюстрируется возрастание числа синхронизованных спектральных компонент Фурье-спектров $S_{1,2}(f)$ по мере увеличения параметра связи: рис.1,*b* соответствует случаю слабой фазовой синхронизации, когда этот режим только возник ($\varepsilon = 0,08$); рис.1,*c-e* соответствует сильной кратковременной фазовой синхронизации ($\varepsilon = 0,1, \varepsilon = 0,12, \varepsilon = 0,14$).

Как показал анализ результатов численного моделирования, наиболее стабильной синхронизацией и минимальным масштабом изменения фазы обладают наиболее устойчивые спектральные компоненты пространственного спектра от морских объектов, которые вписываются в определенный заранее частотный диапазон их возможного интервала изменения. При этом эти компоненты не зависят от интенсивности и своей значимости в общем энергетическом спектре сигнала.

Они быстрее всего входят в режим лаг-синхронизации и выходят из него. Эти же спектральный компоненты дают наименьшую разность фаз (набег фаз).

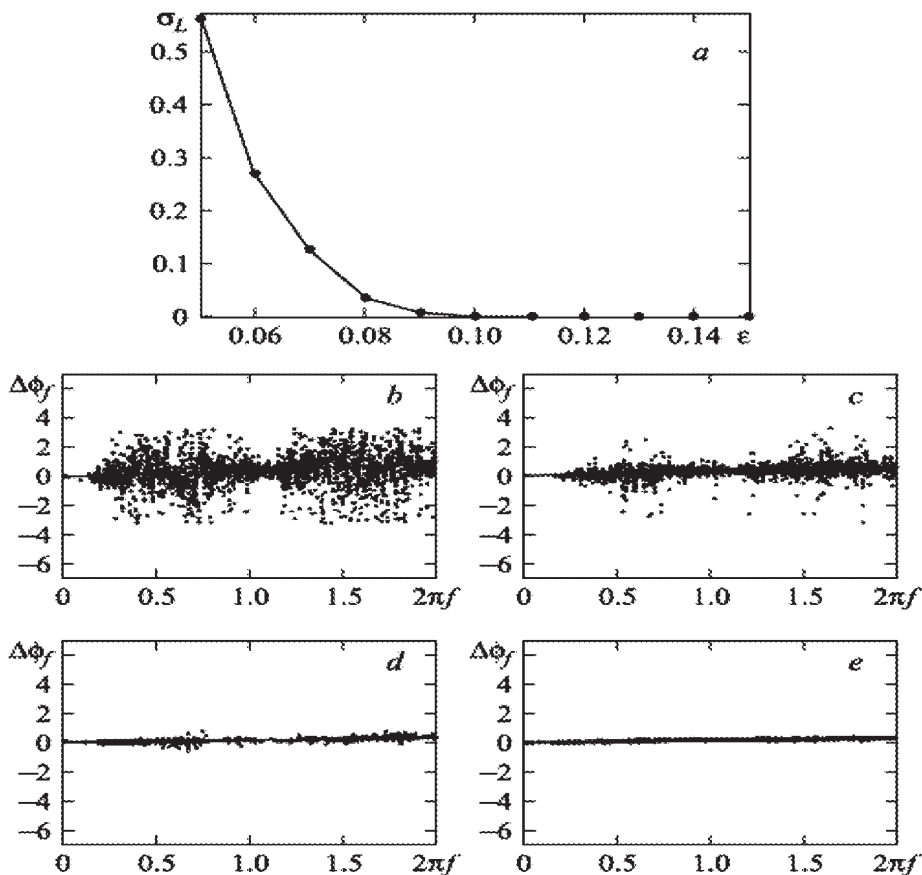


Рис. 1. Зависимость величины σ_L от значения параметра связи ε (a) и разность фаз $\Delta\phi_i$ для различных частотных компонент f Фурье -спектров $S_{1,2}(f)$ связанных систем Ресслера (длина временной реализации $x(t)$ –2000 единиц безразмерного времени, шаг дискретизации $h = 0,2$, усреднение проводилось по 150 отдельным временным реализациям) [2,3]

Это объясняется тем, что они являются производной сигнала от морского объекта. Они более стабильны относительно спектральных компонент помехи и менее подвержены затуханию ввиду низкочастотности. Придерживаясь этой методики, необходимо отметить, что наименее устойчивы к синхронизации и имеют наибольший фазовый масштаб – наиболее интенсивные спектральные компоненты от сигнала, созданного помехой. Это позволяет их без особых усилий удалить из суммарного сигнала и все дальнейшие действия проводить без их учета.

В качестве экспериментальных исследований для проверки методики двойного назначения были взяты натурные данные из отчета «Контроль акваторий Охотоморского региона с использованием гидроакустических измерительных систем, поиск предвестников землетрясений», выполненного в рамках гранта РФФИ Сахалинским конструкторским бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) (г. Южно-Сахалинск) в 2004 г. (рис.2) [4].

В этих измерениях наиболее значительным является обнаружение сейсмогидроакустическими станциями СКБ САМИ в южной части Охотского моря акустической компоненты землетрясения (Т-волны). Она генерируется островами Курильской гряды при ударном воздействии на них сейсмических волн от землетрясения. Скорость распространения Т-волн уступает скоростям сейсмических компонент и примерно равна 1,5 км/с, но она слабо затухает и распространяется на очень большие расстояния. Вследствие уникальности географического вза-

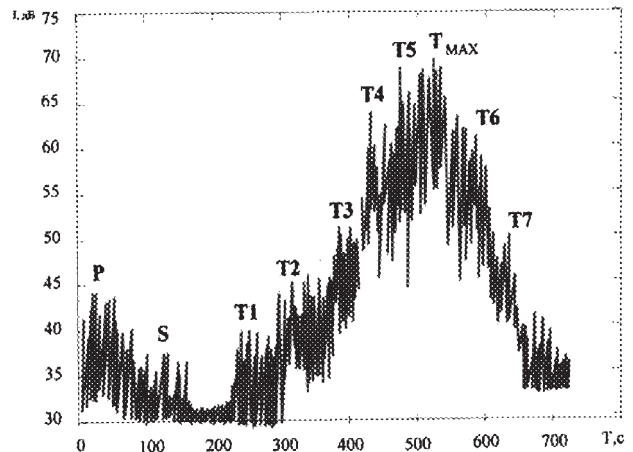


Рис. 2. Запись акустических колебаний предвестников землетрясений [4]

иморасположения островов Курильской гряды и приемных баз СКБ САМИ, существует возможность определять местонахождение эпицентра землетрясения по разности фаз спектральных компонент Т-волн генерируемых этими областями.

Вывод. На основании такого анализа прогнозирования можно выделить Т-волну из общего сигнала, создать модель ситуации перед сейсмо- и цунами опасностью и систему предупреждения населения. Общий запас времени для принятия решения и предупреждения мореплавателей о приближении этих природных явлений составляет от десятков часов до суток, что значительно больше, чем при существующих системах освещения подводной обстановки.

Литература

1. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. - М.: Недра, 1985.- 300 с.
2. Стародубцев П. А. Акустическая томография в процессе обнаружения подводных объектов / П.А. Стародубцев // – Владивосток: Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 2005. - 190 с.
3. Короновский АА, Москаленко ОИ, Храмов АЕ. Синхронизация спектральных компонент связанных хаотических осцилляторов. Письма в ЖТФ, Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского, Гос.УНЦ «Колледж», 2004, том 30, Вып.18.- С.57-64.
4. Контроль акваторий Охотоморского региона с использованием гидроакустических измерительных систем, поиск предвестников землетрясений: отчет о НИР (промежуточ., выполнен в рамках гранта РФФИ) / СКБ САМИ ДВО РАН.- г. Южно-Сахалинск, 2004.- 129 с. -№ 800543.-Инв. С 876.

Материал поступил в редакцию 18. 12. 2010 г.