

УДК 681.883.022: 681.883.65

© Б. П. Белов, И. В. Миронов, А. В. Муравьев, Н. Н. Семенов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
nsemenoff@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ ГИДРОЛОКАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Адаптивный компенсатор помех в частотной области работает сравнительно медленно и после окончания полезного сигнала оставляет последствие. Предложен адаптивный компенсатор помех во временной области, разработан алгоритм и выполнено имитационное моделирование. Результаты показывают лучшую эффективность компенсации помех и быстроедействие.

Ключевые слова: гидролокатор, сонар, компенсатор помех, сигнал, обнаружение.

Прием гидроакустических сигналов всегда осуществляется на фоне помех. В общем случае помехами этому приему являются собственный шум гидроакустической станции (ГАС), шумы окружающей среды, излученные шумы носителя ГАС, излученные шумы локальных источников и реверберация моря. Акустическое поле помех в точке приема образуется различными источниками, каждый из которых, в свою очередь, может формировать одну или несколько составляющих поля помех, отличающихся характером спектра и абсолютными значениями давления. Наложение совокупности составляющих поля приводит к образованию нестационарного суммарного поля помех, в котором состав и соотношение помех различных источников могут непредсказуемым образом изменяться, и работа ГАС с постоянными параметрами в таких условиях не может дать оптимального результата с точки зрения обнаружения эхо-сигналов.

Для исследований возможности снижения влияния помех на тракт обработки были разработаны имитационная модель приемного тракта гидролокатора мобильного носителя, включающая адаптивный компенсатор помех (АКП), выполненный во временной области и работающий в общей полосе частот по алгоритму наименьших средних квадратов с нормализацией, и модель входных воздействий.

Цель работы — изучение компенсации помех локальных источников на фоне естественных помех гидролокатора, а также оценка влияния конструктивных параметров на эффективность компенсации и разрешение полезных сигналов во временной области.

Чтобы избежать затратного вычисления и обращения нестационарных корреляционных матриц, адаптивный компенсатор помех строился с использованием сформированных рабочих и компенсационных пространственных каналов по алгоритму [1].

Предпроцессор формирует компенсирующий вектор

$$\bar{Y}_k = \bar{A}\bar{X}_k,$$

где $\bar{A}$ — матрица преобразования (выполняет линейный процессор), причем сумма элементов каждой строки матрицы A равна нулю.

Компенсатор помех выполнен по схеме, приведенной на рис. 1. В данной схеме ограничения формируются предпроцессором $\bar{A}$. Элементы строки соответствуют амплитудному распределению парциальной диаграммы направленности выхода предпроцессора.

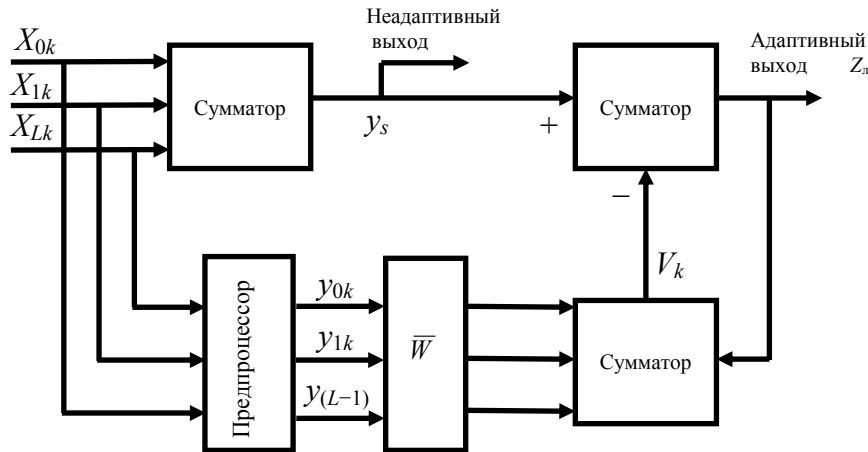


Рис. 1. Схема адаптивного компенсатора помех.

Компенсирующее напряжение в момент k

$$V_k = \bar{W}_k^T \bar{Y}_k, \quad z_k = y_{sk} - V_k = y_{sk} - \bar{W}_k^T \bar{Y}_k,$$

где $\bar{W}_{k+1} = \bar{W}_k - 2\mu[y_{sk} - \bar{W}_k^T \bar{Y}_k]\bar{Y}_k$.

Сумма элементов строки равна нулю, что обеспечивает нулевую чувствительность компенсирующего канала к полезному сигналу.

По сравнению с АКП, реализованным в одном спектральном отсчете, который описан в работе [2], АКП во временной области, как показали исследования, имеет большую скорость сходимости (порядка 150...200 мс для выбранных параметров) и эффективность компенсации помех.

Для оценки эффективности работы АКП были рассмотрены проектные примеры, в которых производились поэлементное излучение, прием и суммирование сигналов с выходов элементов антенны, имеющих необходимые весовые коэффициенты, для получения процессов пространственных каналов по методикам, приведенным в работах [3, 4], которые, в свою очередь, подавались на входы АКП; здесь шла обработка в соответствии с выбранным алгоритмом, а далее оценивалась эффективность работы АКП в части увеличения отношения сигнал/помеха и выделения сигнала при помощи согласованной фильтрации по превышению адаптивного порога при различном количестве локальных помех и их положении в пространстве относительно главного максимума рабочего канала. Структурная схема имитационной модели представлена на рис. 2.

Входные воздействия на блок 1 (рис. 2) содержали ходовые, реверберационные и локальные помехи, а также полезный сигнал. Локальные помехи рассматривались как плосковолновые, а остальные — как помехи рассеяния соответствующими областями [5, 6].

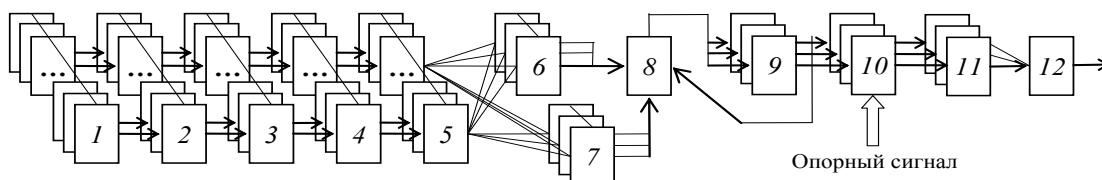


Рис. 2. Структура имитационной модели.

1 — элементы антенны; 2 — предусилители с фильтром низкой частоты (ФНЧ); 3 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 — буфер; 5 — цифровая линия задержки (блок передискретизации и умножения на весовые множители); 6 — сумматор рабочих каналов; 7 — сумматор компенсационных каналов; 8 — блок адаптивной компенсации; 9 — адаптированные каналы; 10 — согласованные фильтры; 11 — каналы оценки параметров сигнала; 12 — классификатор.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Тип антенны	плоская прямоугольная фазированная антенная решетка, 52 элемента
Размер элемента, мм	36×36
Частота излучения, кГц	20
Тип импульса	линейная частотная модуляция (ЛЧМ)
Длительность посылки, мс	127
Приведенное давление излучателя, кПа	150
Глубина моря, м	200
Скорость ветра, м/с	7.5
Температура воды, °C	2
Коэффициент объемного рассеивания	10^{-7}
Коэффициент зеркального отражения дном	0.8
Тип грунта	ил, песок
Глубина хода, м	120
Эквивалентный радиус объекта, м	4
Локальные помехи (№ 1, 2, 3):	
угол от вертикальной оси, градус	90
пределы изменения курсового угла ЛП, градус	–85...85
расстояние, м	100—2000
спектральная плотность давления помех на 1 м, Па/Гц ^{0.5}	25—200

Обзор обеспечивается в главном максимуме адаптивного рабочего канала. Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1.

Полоса частот помех на выходах элементов плоской антенной решетки определялась в общей полосе частот гидролокатора на основе исходных данных (табл. 1).

Характеристики направленности рабочих и компенсационных каналов 52-элементной антенны для одного канала фазового пеленгования представлены на рис. 3 для частоты 20 кГц. При моделировании изменялись угловое положение, расстояние от антенны до объекта локации и локальных помех. Ходовые и реверберационные помехи вычислялись по всей длине цикла. На рис. 4—6 приведены характерные сигнально-помеховые ситуации.

Характерные примеры результатов иллюстрируются на рис. 4—10. Графики построены в зависимости от развертки шкалы дистанции. Порог обнаружения, обозначенный штрихами на графиках «в» рис. 4—10, A совместно с выходным процессом согласованного фильтра, вычисляется путем умножения рассчитанного среднеквадратического отклонения для мгновенных значений сигнала в буфере на множитель 4.8 (соответствующий вероятности ложного срабатывания обнаружителя 10^{-5}).

На рис. 4 приведены результаты работы АКП и согласованного фильтра в сигнально-помеховой ситуации, содержащей, кроме прочих, одну локальную помеху, приходящую с направлений 10° по горизонту, 90° по вертикали, расстояния 1500 м, давлении помехи 200 Па/Гц^{0.5}. Объект локации находился на расстоянии 2500 м, 5° по горизонту, 90° по вертикали.

На рис. 5, 6 приведены результаты работы АКП и согласованного фильтра при двух одновременно действующих с разных сторон и расстояний локальных помехах. Объект локации находился на расстоянии 800 (1500) м, 5° по горизонту, 90° по вертикали; локальная помеха (ЛП) № 1 — 1000 м, 20° по горизонту, 90° по вертикали, давление помех 200 Па/Гц^{0.5}; ЛП № 2 на расстоянии 1500 м, -35° по горизонту, 90° по вертикали, давление 100 Па/Гц^{0.5}.

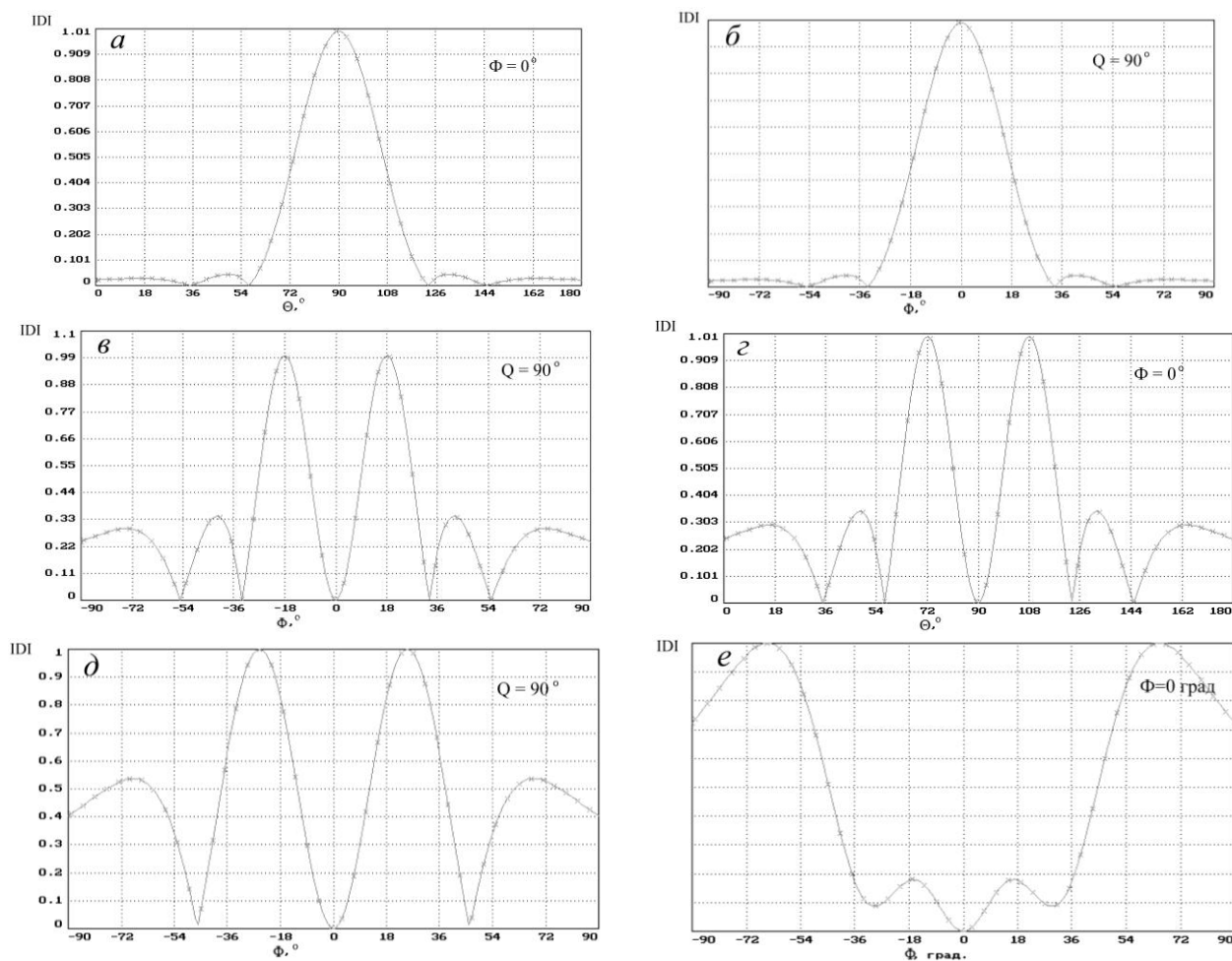


Рис. 3. Характеристики направленности рабочих и компенсационных каналов.

Модули суммарной ДН (азимутальные сечения).

a, б — рабочие каналы; компенсационные каналы: *в* — первый, *г* — второй, *д* — третий, *е* — четвертый.

Целью моделирования было изучение предельных возможностей АКП в различных условиях. На рисунках показана осциллограмма сигнала до АКП, после АКП и после согласованного фильтра с указанием порога срабатывания обнаружителя. Перед согласованным фильтром производится нормировка средней мощности сигнала, поэтому мощность помехи на выходе согласованного фильтра (СФ) не зависит от времени цикла зондирования. Приведен также график средней мощности сигнала до и после АКП, показывающий эффективность работы компенсатора.

При помощи разработанной модели, в дополнение к основному массиву исследования: влияние на эффективность компенсации полосы излучаемого сигнала, полосы локальной помехи, а также на эффективность компенсации разброса значений амплитудно-фазового распределения (АФР) каналов антенны относительно теоретических значений (имитирующего технологический разброс); работы АКП в условиях действия трех локальных помех, приходящих с направления главного максимума рабочего канала при прочих одинаковых условиях.

На рис. 7, 8 приведены результаты работы АКП в сигнально-помеховых ситуациях, в которых объект локализации находился на расстоянии 1000 м, 5° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии двух локальных помех: первая, приходящая с направлений 20° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 900 м, давление 25 Па/Гц^{0.5}, и вторая, приходящая с направлений 30° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 800 м, давление 25 Па/Гц^{0.5}. Полоса частот излучаемого сигнала менялась в диапазоне от 4000 Гц (рис. 6) до 8000 Гц (рис. 7), сигнал сложный (ЛЧМ).

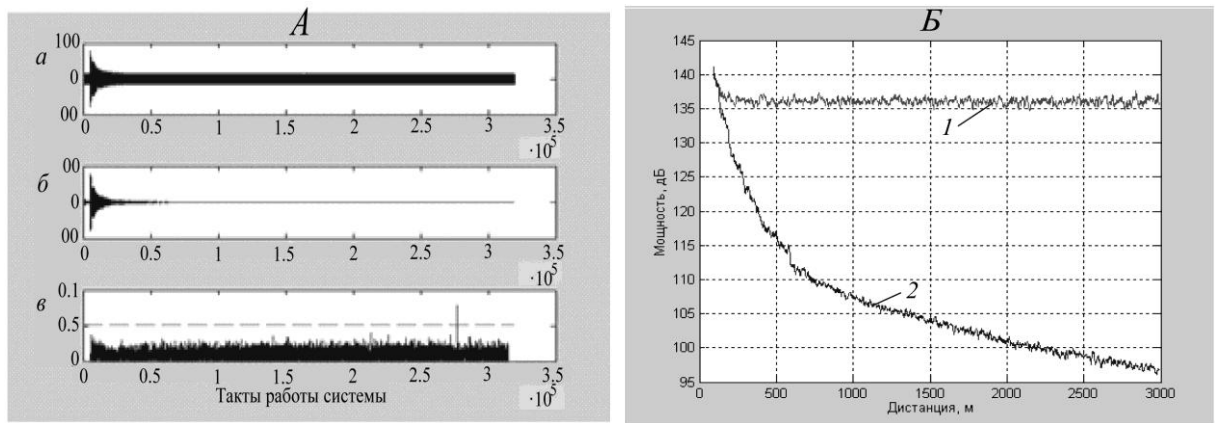


Рис. 4. Результаты работы АКП при положении ЛП на 10° , сигнал на 2500 м.
 А — соотношения входного (а) и выходного (б) временных сигнальных процессов АКП и выходной процесс СФ (в) (оглающая после детектирования и интегрирования);
 Б — временные процессы оглающей (мгновенной мощности) входного (1) и выходного (2) сигнала АКП.

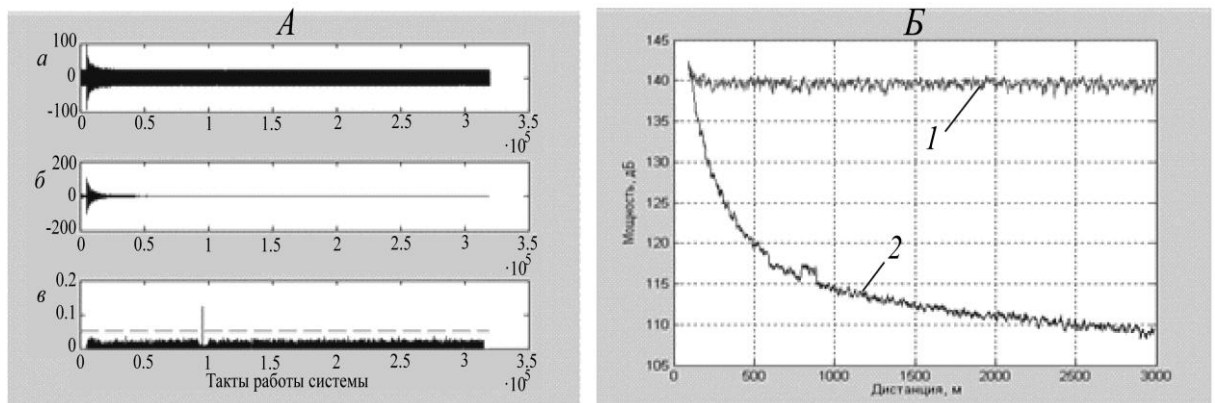


Рис. 5. Результаты работы АКП при положении ЛП 1 на 20° , ЛП 2 на -35° , сигнал на 800 м.
 Объяснения те же, что для рис. 4.

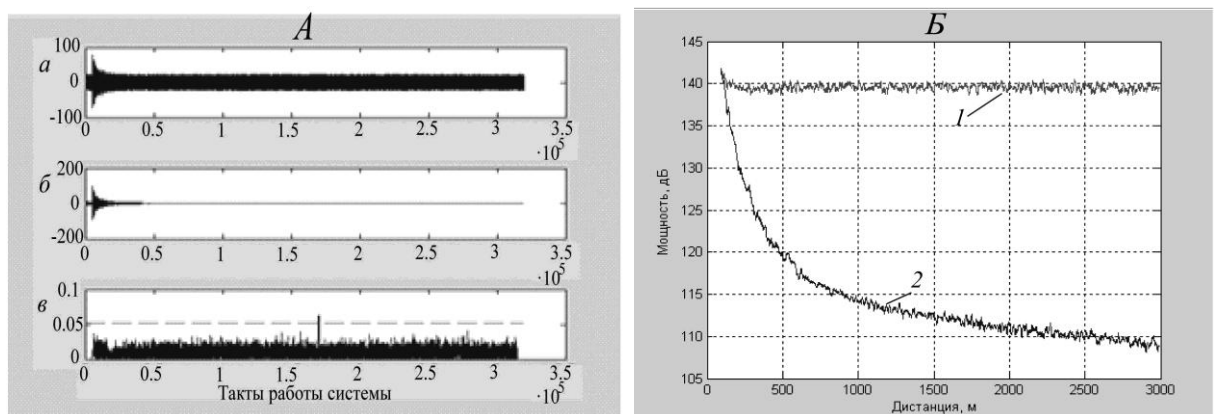


Рис. 6. Результаты работы АКП при положении ЛП 1 на 20° , ЛП 2 на -35° , сигнал на 1500 м.
 Объяснения те же, что для рис. 4.

На рис. 9, 10 приведены результаты работы АКП в сигнально-помеховых ситуациях, в которых объект локации находился на расстоянии 1000 м, 5° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии одной локальной помехи, приходящей с направлений 20° по горизонту, 90° по вертикали, расстоянии 900 м, давлении 25 Па/Гц^{0.5}. Полоса локальной помехи менялась в диапазоне от 4000 Гц (рис. 8) до 10 000 Гц (рис. 9); сигнал сложный, полосовой фильтр системы имеет полосу пропускания 8 кГц с центральной частотой 20 кГц.

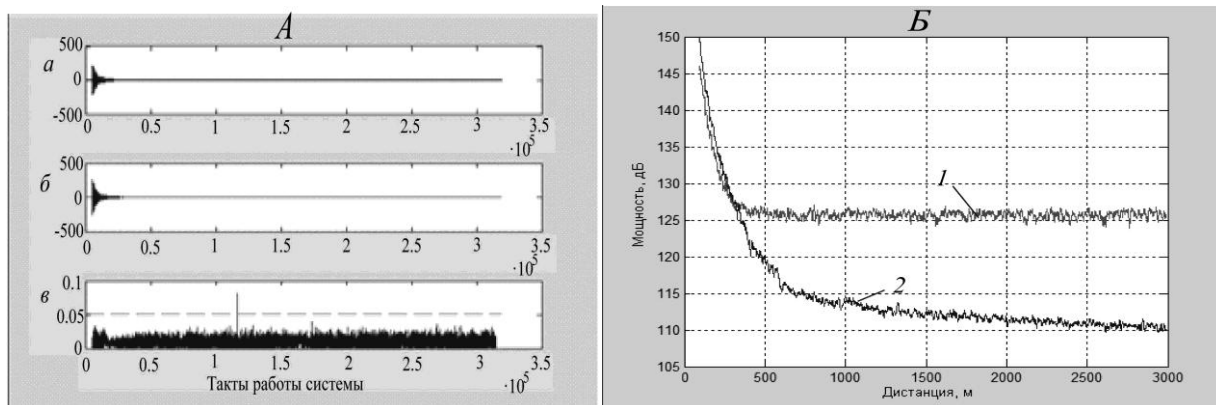


Рис. 7. Результаты работы АКП при полосе сигнала 4000 Гц.
Объяснения те же, что для рис. 4.

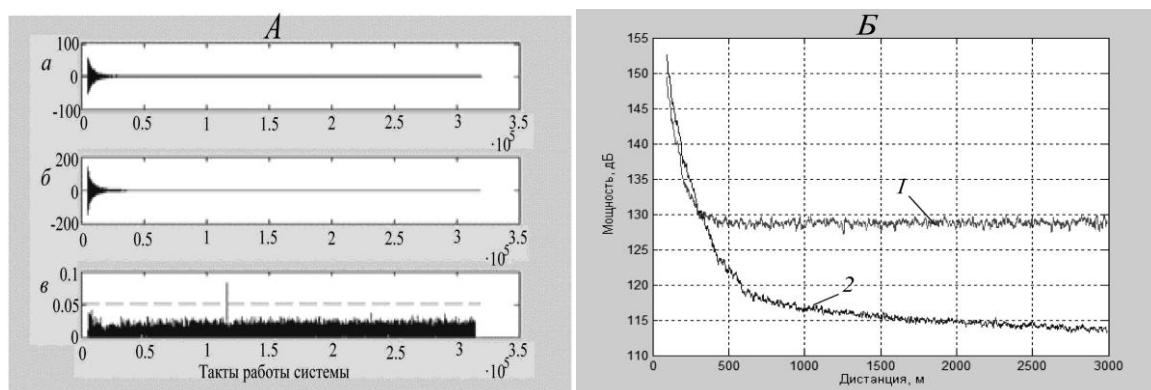


Рис. 8. Результаты работы АКП при полосе сигнала 8000 Гц.
Объяснения те же, что для рис. 4.

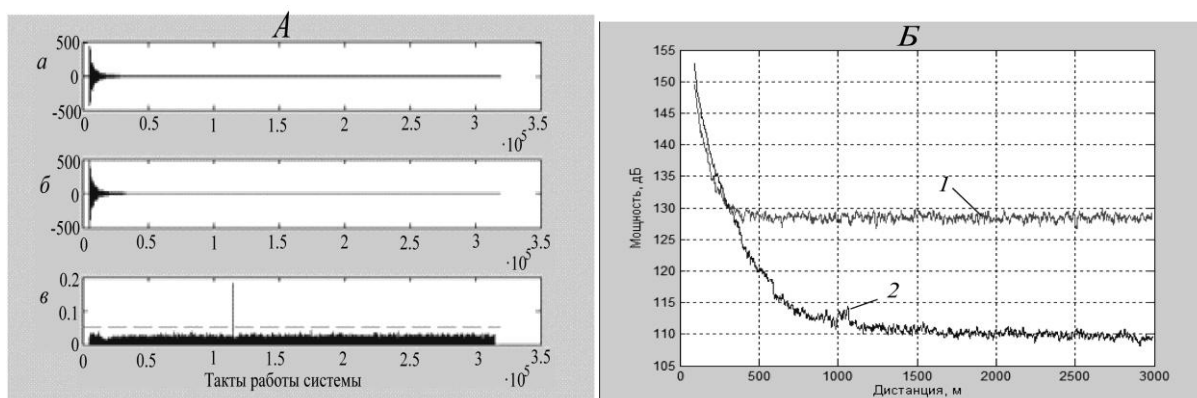


Рис. 9. Результаты работы АКП при полосе локальной помехи 4000 Гц.
Объяснения те же, что для рис. 4.

На рис. 11 приведены результаты работы АКП в сигнально-помеховой ситуации, в которой объект локации находился на расстоянии 1000 м, 5° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии одной локальной помехи (как в предыдущем описанном случае с результатом на рис. 8), приходящей с направлений 20° по горизонту, 90° по вертикали, расстояния 900 м, давлением $25 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полосой локальной помехи 4000 Гц. В данном исследовании в значения АФР рабочего и компенсационных каналов были внесены искажения до $\pm 10\%$ относительно теоретических значений (имитация технологического разброса) АФР для каждого элемента.

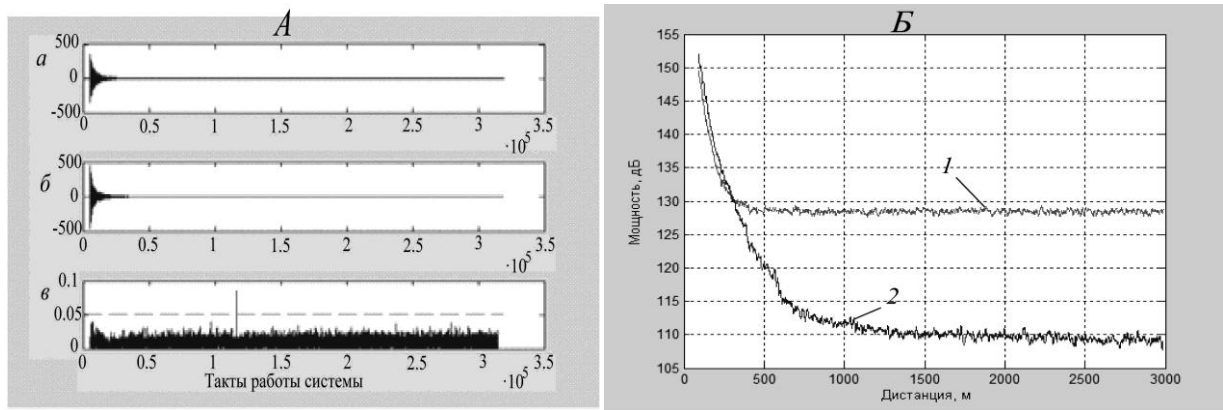


Рис. 10. Результаты работы АКП при полосе локальной помехи 10 000 Гц.
Объяснения те же, что для рис. 4.

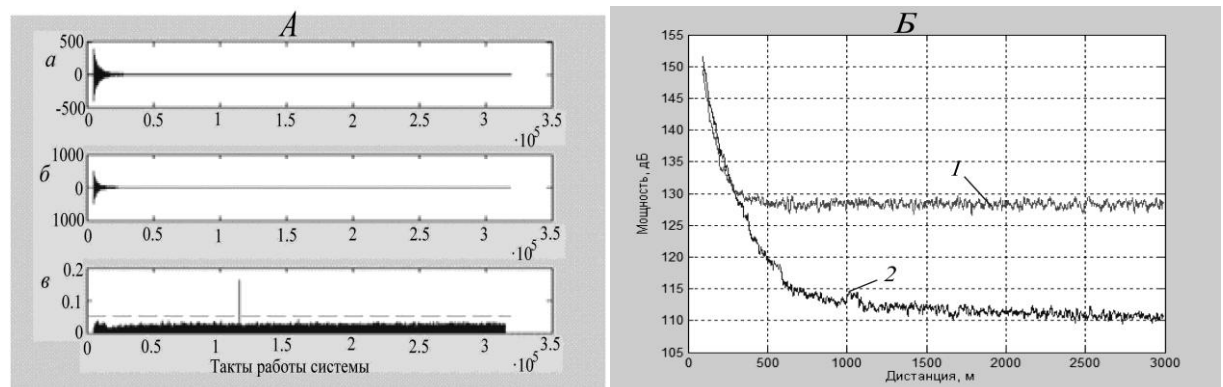


Рис. 11. Результаты работы АКП с искаженной АФР.
Объяснения те же, что для рис. 4.

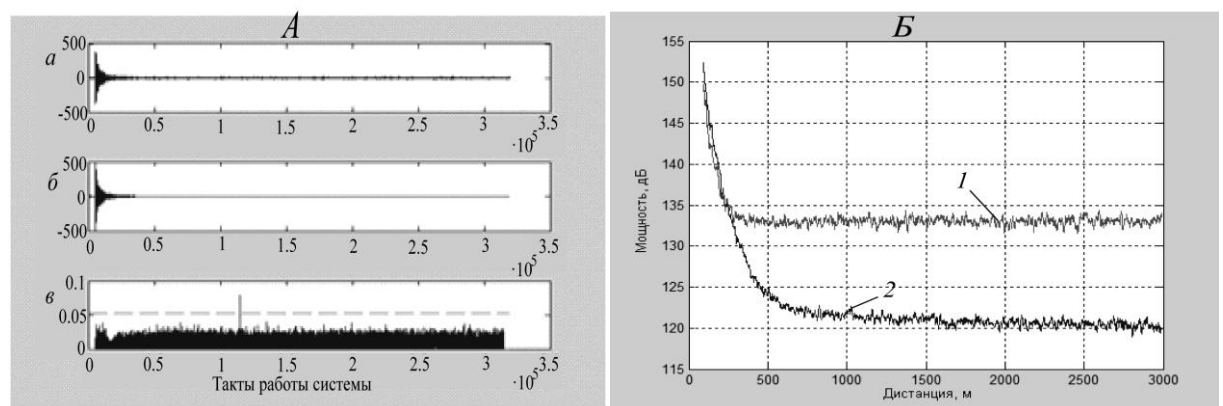


Рис. 12. Результаты работы АКП с тремя ЛП.
Объяснения те же, что для рис. 4.

На рис. 12, 13 приведены результаты работы АКП в сигнально-помеховых ситуациях, в которых объект локализации находился на расстоянии 1000 м, 5° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии трех локальных помех с различной полосой: первая, приходящая с направлений 20° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 900 м, давление $25 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 4000 Гц; вторая, приходящая с направлений 25° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 700 м, давление $50 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 8000 Гц; третья, приходящая с направлений 30° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 600 м, давление $25 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 7000 Гц. АФР каналов неискаженное (рис. 11) и искаженное (рис. 12). Графики рис. 11—13 также построены в зависимости от развертки шкалы дистанции.

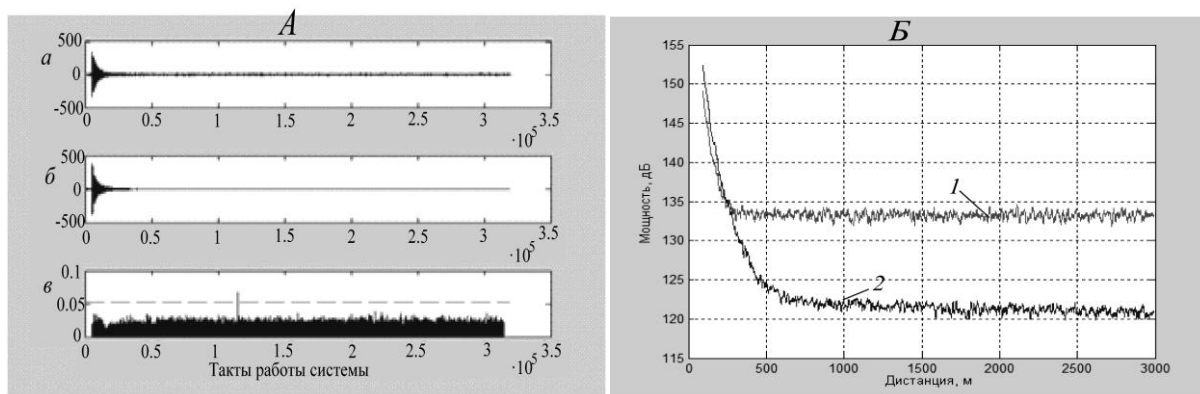


Рис. 13. Результаты работы АКП с тремя ЛП с искаженной АФР.
Объяснения те же, что для рис. 4.

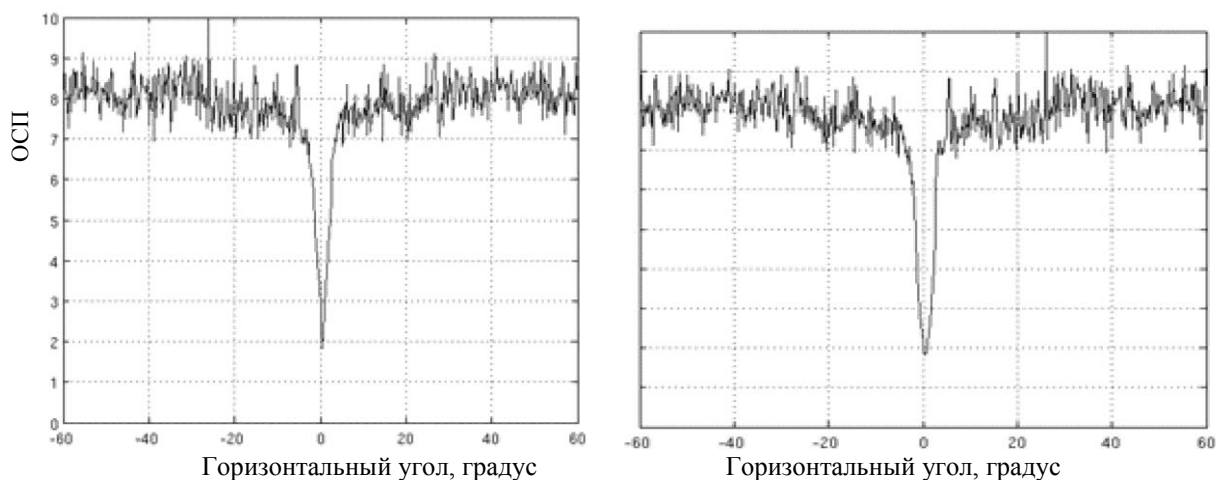


Рис. 14. Результаты работы АКП при нахождении ЛП в главном лепестке (простой и сложный сигналы).

На рис. 14 приведены результаты работы АКП в зависимости от положения локальной помехи — безразмерного отношения сигнал/помеха (ОСП) на выходе АКП от пеленга на источник локальной помехи. При этом на рис. 13 слева использовался узкополосный тональный сигнал, справа — ЛЧМ с шириной полосы 7000 Гц. Объект локации находился на расстоянии 1000 м, 0° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии одной локальной помехи с расстояния 900 м, давление $25 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 4000 Гц; направление прихода менялось от -60 до 60° по горизонту; 90° по вертикали.

На рис. 15 приведена чувствительность антенны после АКП при наличии двух источников ЛП, расположенных по пеленгам -25 и $+30^\circ$ соответственно. Моделирование проводилось при использовании сложного сигнала с шириной полосы частот 4000 Гц.

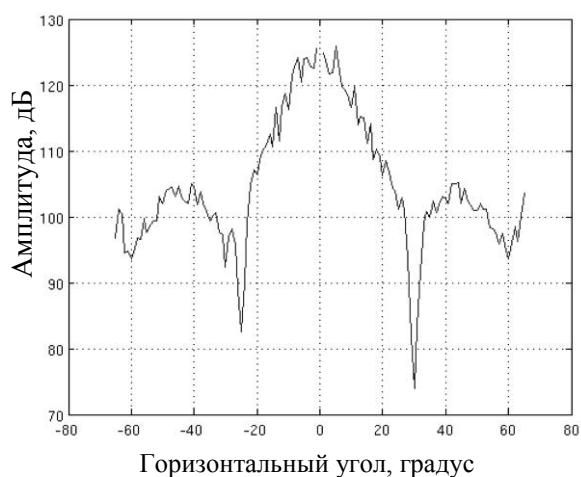


Рис. 15. Чувствительность антенны после АКП при нахождении двух источников ЛП в главном лепестке (сложный сигнал).

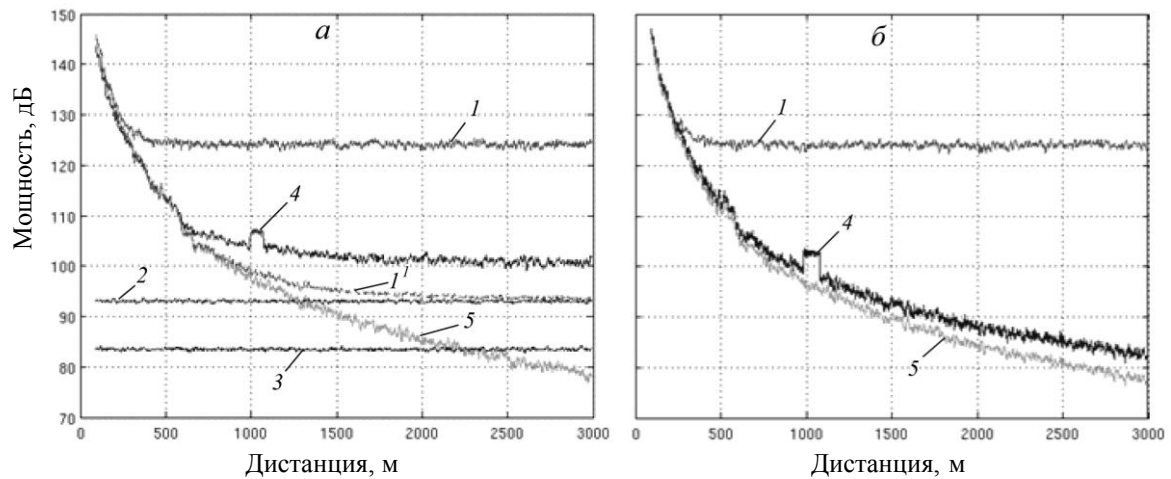


Рис. 16. Результаты работы АКП и мгновенные мощности сигналов.
Помехи: 1, 1' — суммарная; 2 — турбулентная; 3 — рассеянная;
4 — сигнал после АКП; 5 — реверберация.

На рис. 16 приведены результаты моделирования работы АКП и показаны мгновенные мощности сигналов до АКП, после АКП и отдельно — мощности компонент естественных помех. Объект локации находился на расстоянии 1000 м, 5° по горизонтали, 90° по вертикали, в присутствии двух локальных помех с различной полосой: первая, приходящая с направлений 30° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 800 м, давление $25 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 4000 Гц; вторая, приходящая с направлений 25° по горизонту, 90° по вертикали, расстояние 700 м, давление $30 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, полоса 8000 Гц. Спектральная плотность турбулентной помехи $2.2 \times 10^{-3} \text{ Па/Гц}^{0.5}$, шума двигателя $0.17 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, излучаемое давление $2 \times 10^5 \text{ Па}$.

Рис. 16 иллюстрирует работу АКП в условиях различных сочетаний помех. На рис. 16, а показана ситуация, при которой существенное влияние оказывают турбулентные помехи и рассеянные граничными шумы двигателя. На рис. 16, б — только реверберация и локальная помеха, т. е. на рис. 16, а дана картина, характерная для быстро движущегося объекта с шумным двигателем, на рис. 16, б — для тихоходного объекта.

На рис. 16, а суммарная естественная помеха определяется в основном реверберацией до дистанции 700 м, после чего она меняет свою структуру и приближается к турбулентной помехе. Видно, что алгоритм позволяет компенсировать локальную помеху до уровня естественных помех на всем диапазоне дистанций: сначала до меняющейся во времени реверберации, а потом до турбулентной помехи, не имеющей явного центра излучения. Верхний график показывает мощность сигнала с локальной помехой, под ним — сигнал на выходе АКП, ниже мощности реверберации и стационарных помех (турбулентной и рассеянной). Здесь же приведен график суммарной естественной помехи, являющейся суммой реверберации, турбулентной и рассеянной помех.

На рис. 16, б естественная помеха определяется только реверберацией и сигнал на выходе АКП асимптотически приближается к суммарной помехе, компенсируя локальную.

Рассматривая результаты всех проведенных исследований, характеризующих поведение АКП в различных сигнально-помеховых ситуациях, можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотренный адаптивный компенсатор помех способен эффективно компенсировать помехи в сигнально-помеховых ситуациях, содержащих турбулентную, рассеянную граничными помеху, реверберацию и локальную помеху — как одну, так и несколько, действующих с широкого диапазона горизонтальных углов. Ограничением уровня компенсации локальных помех является уровень естественных помех, главным образом реверберация. При этом выделяется полезный сигнал, и эффективность компенсации достигает, по представленным графикам, и значения порядка 30...40 дБ. Эффек-

тивность компенсации определяется наиболее мощной локальной помехой в случае, если их несколько.

2. При отсутствии в сигнально-помеховой ситуации локальных помех на фоне доминирующих реверберационных выделяется полезный сигнал, при этом отклик согласованного фильтра имеет ярко выраженный максимум, позволяющий однозначно определять положение объекта локации. Наличие АКП не мешает работе гидролокатора при отсутствии источника локальных помех.

3. Однозначное выделение полезного сигнала после применения АКП происходит не только в условиях нахождения локальных помех в боковом поле рабочего канала, но и нескольких локальных помех в главном максимуме с направления более 4° по азимуту от нормали к плоскости решетки. При этом угловое разрешение между полезным сигналом и локальной помехой достигает $1\text{--}3^\circ$.

4. В сигнально-помеховых ситуациях, когда присутствует несколько источников локальных помех, находящихся в пределах главного максимума рабочего канала и расположенных по дистанции за объектом локации, происходит однозначное выделение полезного сигнала при условии различения пеленгов на источники локальных помех и полезный сигнал не менее 4° .

5. Изменение рабочей полосы излученного сигнала оказывает влияние на общий начальный уровень сигнала в каналах (шире полоса — выше уровень) соответственно на выходной уровень АКП при одинаковой эффективности компенсации.

6. Изменение полосы локальной помехи при прочих равных условиях заметного влияния на эффективность компенсации и выделение полезного сигнала не оказывает. Влияет только полная мощность помехи на выходах каналов гидролокатора.

7. В случае наличия в АФР рабочего и компенсационных каналов амплитудных искажений, достигающих 10 % относительно изначального теоретического АФР, компенсация помех происходит с небольшой разницей в 2—3 дБ (можно считать погрешностью измерений) относительно варианта без отклонений.

8. Рассмотренный АКП можно рекомендовать к реализации для защиты акустических систем мобильных роботов от помех естественного и искусственного происхождения.

Литература

1. Applebaum S. P., Chapman D. J. Adaptive arrays with main beam constraints. IEEE Trans. Antennas Prop., 24:650—662, 1976.
2. Белов Б. П., Шангин К. Ю. Адаптивная антенна гидролокатора с компенсацией бокового поля // Тр. VIII Междун. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2006. С. 187—190.
3. Белов Б. П., Миронов И. В., Семенов Н. Н. Адаптивный компенсатор помех гидролокатора, работающий во временной области // Тр. XI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2012). СПб.: Наука, 2012. С. 378—381.
4. Огарковская Т. Б., Белов Б. П. Патент № 2116688 от 15.05.1996. «Устройство адаптивной обработки сигналов многоэлементной решетки».
5. Белов Б. П., Семенов Н. Н. и др. Система автоматизированного проектирования антенн и расчета помех. Изд. 2. СПбГМТУ, 2010. 196 с.
6. Белов Б. П., Семенов Н. Н., Миронов И. В. Цифровое формирование характеристики направленности гидроакустической антенны гидролокатора подводного робота во временной области // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 1. С. 32—46.

Статья поступила в редакцию 07.12.2012 г.

