

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ
НА КАЧЕСТВО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ
В ГИДРОЛОКАЦИИ****О. Ю. Дашевский, Е. С. Нежевенко***Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск**E-mail: be9@iae.nsk.su*

Описываются результаты всестороннего программного моделирования синтеза апертуры, направленного на выяснение действия некоторых факторов на качество синтеза, в частности аддитивного шума и рыскания платформы с гидрофонами как одних из наиболее влияющих. Предлагается компенсация влияния рыскания платформы на качество синтеза путем адаптивного уточнения угла рыскания по критерию максимизации качества пика, характеризующего наблюдаемый точечный объект.

Введение. Несмотря на очевидные эксплуатационные недостатки, гибкая протяженная буксируемая антенна (ГПБА) остается основным средством подводных наблюдений и пеленгации источников акустического излучения. Как прибор, предназначенный для проведения дистанционных измерений, ГПБА лишена всех основных атрибутов системы наблюдений: стабильной аппаратной функции, привязки к мировой системе координат и информации о характеристиках канала распространения сигнала. На преодоление этих ограничений в последние два десятилетия были направлены значительные научно-технические усилия, которые привели к успехам в этой области [1]. Оснащение ГПБА средствами позиционирования приемных элементов и развитие методов ее автокалибровки в движении по маршруту и на маневре открыли путь к реализации концепции пассивного апертурного синтеза, позволяющего сократить протяженность решетки, одновременно сохраняя ее апертурные свойства, что ослабило первые два упомянутых ограничения [2].

Тем временем развивалась и техника буксируемых жестких антенн (БЖА) [3], первоначально использовавшаяся для глубоководных гидрологических измерений, а затем «перенявшая опыт» активного апертурного синтеза акустических изображений поверхности дна, заимствованный из радиолокации. В этом направлении достигнуты впечатляющие успехи [4]. Распространение опыта активного синтеза на пассивный апертурный синтез в задачах подводных наблюдений с конечной целью полной замены ГПБА буксируемыми жесткими антеннами сняло бы, по крайней мере, одну из проблем

ГПБА – отсутствие стабильности аппаратной функции системы наблюдений. Существенны и эксплуатационные преимущества БЖА. Будучи значительно дешевле дистанционно управляемых и автономных подводных платформ [3], коммерчески доступные БЖА, с одной стороны, сохраняют достоинства ГПБА в оперативности сбора и обработки результатов наблюдений, а с другой – обеспечивают возможность перемещения сенсорной платформы в требуемую зону наблюдения в кратчайшие сроки.

Задача позиционирования динамической решетки и стабилизации аппаратной функции платформы решается в два этапа. На первом этапе совместными усилиями сенсорной системы и гидродинамических приводов платформа приводится в горизонтальное положение и ориентируется относительно заданного курса (процедура, именуемая в литературе «компенсацией движения»). На первый взгляд кажется, что из-за малой длины БЖА менее устойчивы в гидродинамическом потоке, чем ГПБА, и, следовательно, синтезированная апертура будет существенно нестационарна. Однако современные навигационные средства позволяют отслеживать координаты условного центра и углы разворота БЖА с большой точностью. В данном случае требуется, используя эту информацию, компенсировать фазовую погрешность волнового фронта, что является задачей второго этапа компенсации движения, решаемой в активном апертурном синтезе с помощью межкадровой постобработки (автофокусировка [5, 6]). Если задача требует решения в реальном времени, могут возникнуть определенные вычислительные сложности. В радиолокации эта проблема решается с помощью голографического метода реконструкции изображений, однако в гидролокации с учетом сравнительно небольших скоростей движения и больших длин волн ситуация может быть менее критической. Для подтверждения этого требуются дополнительные исследования. Таким образом, речь идет о рациональном перераспределении функций стабилизации буксируемой системы наблюдений между гидродинамическим позиционированием и адаптивным формированием характеристики направленности (ХН) (управление обеими системами осуществляется позиционирующими сенсорами) в сторону большей ответственности последней.

В представленной работе предложен метод автофокусировки гидроакустического изображения, полученного с помощью пассивного апертурного синтеза, совмещенный с процессом адаптивного формирования ХН в едином процессе статистической оптимизации с последующим электронным управлением лучом. Это позволяет, в частности, преодолеть ограничение на линейно-поступательный характер перемещения платформы на интервале синтеза. Приняв за основу алгоритм фазовой компенсации с использованием «корреляции с перекрытием» [7], вычисляем фазовую поправку, строя процесс компенсации искажений с помощью целевой функции, которую по аналогии с «качеством изображения» (термин, используемый для описания целевой функции в реконструкции изображений [5]) назовем «качеством синтеза».

В разд. 1 предлагается алгоритм фазовой компенсации с помощью коррелятора с перекрытием. В разд. 2 вводится и мотивируется понятие качества синтеза. И в разд. 3 предлагается алгоритм стохастической оптимизации, использующий в качестве целевой функции эту характеристику.

Целью данной работы является создание программных модулей для исследования влияния различных факторов на качество синтеза апертуры, с тем чтобы в дальнейшем перейти к созданию универсальной программной

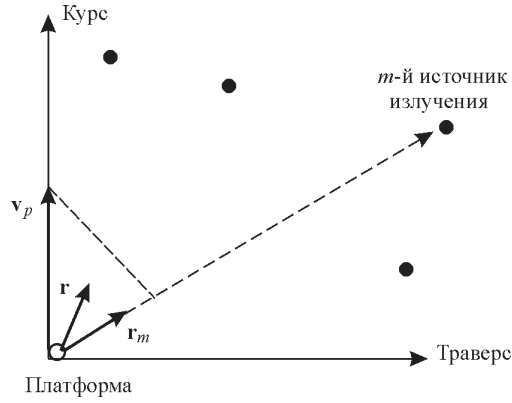


Рис. 1. Схема определения поля акустического давления

модели, позволяющей испытывать алгоритмы синтеза апертуры для самых различных вариантов нестационарности как антенны, так и целей.

1. Синтез апертуры при наличии шума. Схему синтезирования апертуры приводить не будем, поскольку она многократно описана, в частности в [7]. Не будем акцентировать внимание, для какого типа локации – активной или пассивной – она приводится (близость проблем активного зондирования и пассивных наблюдений отмечается в [8]). Прогресс в области обработки сигналов за последние два десятилетия сблизил активную гидроакустику с подводной связью, а пассивную – с обработкой изображений, однако проблемы распространения сигнала в многослойной изменчивой среде остаются для гидроакустики универсальными.

Математическая модель синтезирования апертуры следующая. Имеем платформу из N гидрофонов с расстоянием между ними Δ , расположенную вдоль координатной оси x , – линейную эквидистантную антенную решетку. Длина реальной апертуры равна $\Delta(N-1)$. Приемник и источники расположены в полярной системе координат с центром, совмещенным с последним по направлению движения приемником (рис. 1). Платформа движется вдоль своей оси со скоростью v_p . В пространстве имеется M бесконечно удаленных монохроматических источников, заданных следующими параметрами: A_m – амплитуда; $f_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$ – частота; от каждого источника на приемной линейке

воспринимается плоская волна с волновым вектором $\mathbf{k}_m = -\frac{\omega_m}{c} \mathbf{r}_m^0$, направленным в начало координат. Здесь $m=1, \dots, M$, ω_m – угловая частота, c – скорость звука в воде, $\mathbf{r}_m^0 = (r_{mx}^0, r_{my}^0, r_{mz}^0)$ – единичный вектор, указывающий на направление прихода волны, $(r_{mx}^0, r_{my}^0, r_{mz}^0)$ – его направляющие косинусы (вектор визирования).

В этом случае поле давления в каждом приемном элементе антенны с координатами $\mathbf{r}(t) = (x, y, z)$ описывается следующей комплекснозначной функцией, зависящей от координат и времени [9]:

$$P(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=1}^M A_m e^{i(\mathbf{k}_m \mathbf{r} - \omega_m t)},$$

где $\omega_m = -\frac{2\pi(f_m + \delta f_m)}{c}$ – угловая частота принятого сигнала с учетом доплеровского сдвига $\delta f_m = \frac{\mathbf{v}_p \mathbf{r}_m^0}{c}$, $\mathbf{v}_p \mathbf{r}_m^0$ – скалярное произведение вектора скорости платформы $\{\mathbf{v}_p, 0, 0\}$ и вектора \mathbf{r}_m^0 направления на m -й источник (компонента вектора скорости платформы, направленная в сторону принимаемого сигнала).

Пусть $\mathbf{X}(t)$ – вектор из N показаний гидрофонов в момент времени t :

$$\mathbf{X}(t) = \left\{ P([x_1(t), 0, 0], t) \quad P([x_2(t), 0, 0], t) \quad \dots \quad P([x_N(t), 0, 0], t) \right\}^T.$$

Апертурный синтез производится следующим образом. Выбираются такие моменты времени $t_L = \tau(L-1)$, что $x_1(t_{L+1}) = x_{q+1}(t_L)$, т. е. за время τ платформа проходит расстояние $q\Delta$ (или q позиций антенной решетки): $\tau = (q\Delta)/\mathbf{v}_p$.

В таком случае возникает перекрытие: последние $N - q$ гидрофонов в момент времени t_L расположены в тех же местах, что и первые $N - q$ гидрофонов в момент времени t_{L+1} . Перекрывающиеся части векторов $\mathbf{X}(t_L)$ и $\mathbf{X}(t_{L+1})$ содержат одну ту же пространственную информацию и отличаются лишь фазой $e^{i\Phi_L}$, изменившейся за время τ . Этот факт использован в работе [7], чтобы скорректировать фазу последующей выборки сигнала относительно предыдущей (алгоритм ETAM (Extended Tower Array Measurements)). Если вычислить фазовый множитель $e^{i\Phi_L}$, то к вектору $\mathbf{X}(t_L)$ (размером N) можно будет добавить еще q последних элементов из вектора $\mathbf{X}(t_{L+1})$, домножив их на фазовый множитель. Заметим, что поскольку фазовый множитель вычисляется для всего вектора, то он может компенсировать лишь усредненное смещение антенны относительно цели. Очевидно, что сравнение перекрывающихся частей векторов $\mathbf{X}(t_L)$ и $\mathbf{X}(t_{L+1})$ несет гораздо большую информацию, однако в данной работе ограничимся лишь исследованием алгоритма ETAM. Итак, после слияния двух векторов размер апертуры увеличится на величину q . Используя этот принцип многократно, теоретически апертуру можно увеличить на любое количество элементов, кратное q . Предположим, что синтезирование происходит J раз (размер синтезированной апертуры будет равен $N + Jq$). Для этого производится $J + 1$ измерение в моменты времени $t = 0, \tau, 2\tau, \dots, \tau J$. Пусть

$$\mathbf{X}^{(L)} = \mathbf{X}(\tau L), \quad L = 0, \dots, J.$$

Тогда перед синтезированием имеем $J + 1$ векторов $\mathbf{X}^{(0)}, \dots, \mathbf{X}^{(J)}$. Обозначим через $\mathbf{Y}^{(0)}, \dots, \mathbf{Y}^{(J)}$ векторы синтезированных значений размером $N + Jq$:

$$\mathbf{Y}^{(J)} = \left\{ \mathbf{X}^{(J)} \mid \underbrace{0 \dots 0}_{Jq} \right\}^T,$$

которые получаются из $\mathbf{X}^{(J)}$ добавлением к нему Jq нулевых значений в конце. Вычисления производятся в обратном порядке: $\mathbf{Y}^{(J-1)}$ находится из $\mathbf{Y}^{(J)}$, $\mathbf{Y}^{(J-2)}$ – из $\mathbf{Y}^{(J-1)}$ и т. д. На каждом этапе $L = J - 1, J - 2, \dots, 0$ сначала рассчитывается фазовый сдвиг

$$\Phi_L = \left\{ \frac{1}{N - q} \arg \sum_{k=1}^{N-q} X_{q+k}^{(L)} [X_k^{(L+1)}]^* \right\},$$

где «*» – комплексное сопряжение. Затем происходит заполнение вектора $\mathbf{Y}^{(L)}$:

$$\mathbf{Y}^{(J)} = \left\{ \mathbf{X}^{(J)} \mid \underbrace{e^{i\Phi_L} X_{N-q+1}^{(L+1)} \quad e^{i\Phi_L} X_{N-q+2}^{(L+1)} \quad \dots \quad e^{i\Phi_L} X_{N-q+(J-L)q}^{(L+1)}}_{(J-L)q \text{ синтезированных значений}} \mid \underbrace{0 \dots 0}_{Lq \text{ нулей}} \right\}^T.$$

Таким образом, на каждом шаге к реальным N значениям добавляется q синтезированных, давая в конце $N + Jq$ значений вектора $\mathbf{Y}^{(0)}$, являющегося полноапертурным вектором. Вся процедура вычисления вектора $\mathbf{Y}^{(0)}$ описывается следующим образом:

$$Y_k^{(0)} = \begin{cases} X_k^{(0)}, & \text{если } k = 1, \dots, N, \\ X_{N-q+1 + (k-N-1) \bmod q}^{(1 + [(k-N-1)/q])} \prod_{L=0}^{[(k-N-1)/q]} e^{i\Phi_L}, & \text{если } k = N + 1, \dots, N + Jq. \end{cases}$$

В частном случае $J = 0$ синтезирование не производится и $\mathbf{Y}^{(0)}$ равен $\mathbf{X}^{(0)}$ (случай реальной апертуры).

Программная модель создана в среде Matlab. Она позволяет интерактивно задавать любое число источников звука с произвольными координатами, векторами их скоростей, любым набором частот и с добавлением аддитивного шума, а также линейную антенную решетку (АР) с эквидистантными гидрофонами, размещенными на жесткой платформе, и параметры ее движения: вектор скорости и азимут. Для построения ХН используется классический формирователь луча Бартлетта [9]

$$S(\theta, f) = \frac{\mathbf{a}^*(\theta, f) C_{YY} \mathbf{a}(\theta, f)}{\mathbf{a}^*(\theta, f) \mathbf{a}(\theta, f)},$$

где $\mathbf{a}(\theta, f)$ – направляющий вектор, а C_{YY} – автоковариационная матрица для $\mathbf{Y}^{(0)}$:

$$\mathbf{a}(\theta, f) = \left\{ 0 \quad e^{i \frac{2\pi f}{c} \Delta \cos \theta} \quad e^{i \frac{2\pi f}{c} 2\Delta \cos \theta} \quad \dots \quad e^{i \frac{2\pi f}{c} (N-1)\Delta \cos \theta} \right\}^T;$$

$$C_{YY} = \mathbf{Y}^{(0)} [\mathbf{Y}^{(0)}]^*.$$

При экспериментальном исследовании были приняты следующие параметры источников и АР: частота источника излучения 750 Гц, число элементов антенной решетки 20, расстояние между гидрофонами 1 м, скорость движения платформы 5 м/с (9,8 узлов), сектор расчета $XH \pm 10^\circ$, расстояние до цели 80 км.

При моделировании предполагалось, что относительное положение цели фиксировано. Данные исследования проводились для случая, когда платформа с АР движется прямолинейно. Результаты синтеза апертуры, представленные в виде трехмерного графика зависимости мощности звука от азимута при изменении уровня шума, с применением алгоритма ЕТАМ, корректирующего фазу, приводятся на рис. 2, *a*, *b*. Заметим, поскольку цель точечная (δ -функция), зависимость спектра мощности излучаемого ею сигнала от азимута и XH антенны совпадают, поэтому обе эти зависимости будем называть характеристикой направленности. Таким образом, предполагается, что цель, если особо не оговорено, находится на траверсе антенны.

При сравнительно малом шуме ($SNR = 0$ дБ) синтез апертуры идет так, как будто увеличивается физическая апертура (см. рис. 2, *a*). Что получается, если в этом случае фазу не корректировать, видно на рис. 3, *a*. Из графика на

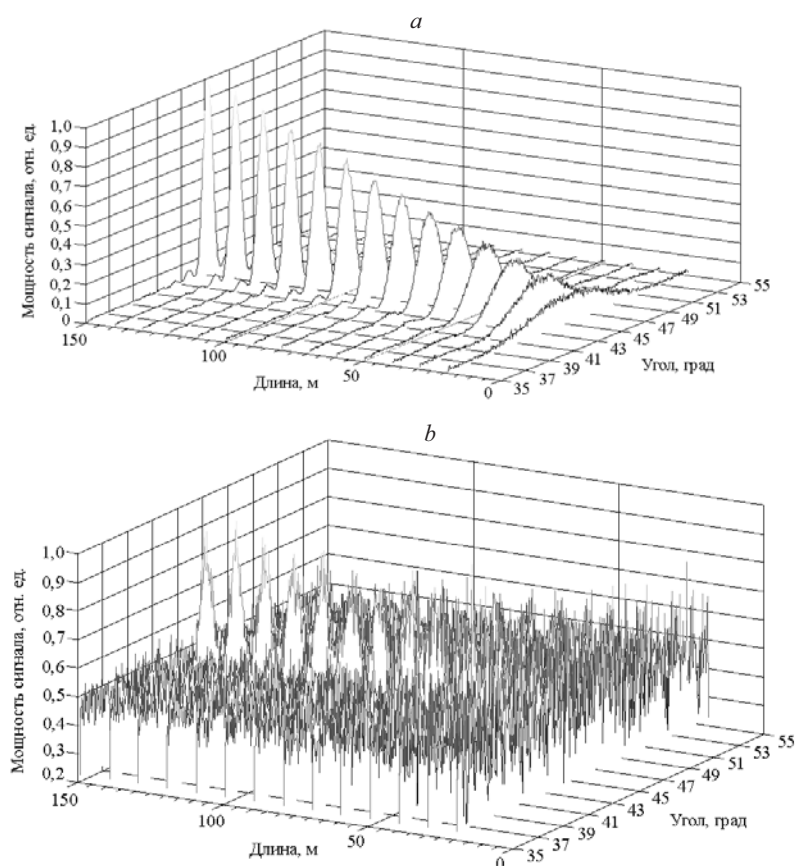


Рис. 2. Изменение XH в зависимости от длины синтетической апертуры с коррекцией фазы: для $SNR = 0$ дБ (*a*) и $SNR = -20$ дБ (*b*)

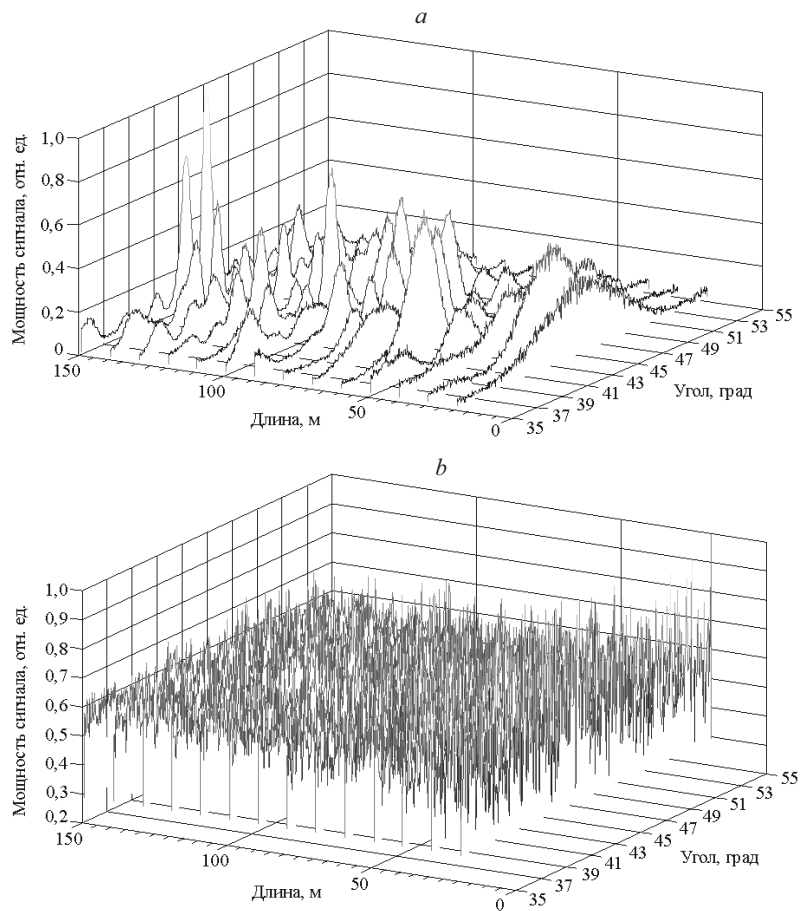


Рис. 3. Изменение ХН в зависимости от длины синтетической апертуры без коррекции фазы: для SNR = 0 дБ (a) и SNR = -20 дБ (b)

рис. 2, b следует, что при использовании алгоритма ЕТАМ даже при SNR = -20 дБ пик мощности, характеризующий цель, достаточно четко выделяется. При отсутствии коррекции фазы для SNR = -20 дБ пик мощности не выделяется (рис. 3, b).

Проведены экспериментальные исследования влияния и других мешающих факторов: конечной длины когерентности сигнала, рыскания платформы и изменений ее скорости и вектора скорости цели [10]. Выяснено, что наибольшее влияние на качество пеленгации цели оказывают рыскание платформы и изменение вектора скорости цели. В данной работе исследуется лишь первая проблема и предлагается метод ее решения.

2. Влияние рыскания платформы на качество синтезирования апертуры. Известно, что процесс апертурного синтеза не увеличивает коэффициент усиления решетки, определяющий отношение сигнал/шум, который при синтезе сохраняет исходные свойства физической (реальной) апертуры [7]. Известно также, что синтезированная апертура чрезвычайно чувствительна к погрешностям задания азимута, как и к другим погрешностям позиционирования в движении, которые играют в апертурном синтезе ту же роль, что и

аппаратная функция стационарной антенной решетки. (Далее приводятся количественные оценки этих погрешностей.) Заметим, что шум, который всегда будет присутствовать в наших исследованиях, ухудшает качество ХН и в случае реальной апертуры. Поэтому единственным критерием качества синтезированной апертуры может служить результат ее сравнения с реальной апертурой такого же размера.

Выбор критерия качества оценки сформированной ХН – вопрос достаточно изученный в статистической теории антенн [11, 12]. Фокусирующие свойства решетки оцениваются полушириной центрального лепестка и скоростью спада огибающей ХН (отношением центрального лепестка к ближайшему боковому). Эти параметры пригодны для оценивания искажающего воздействия систематических погрешностей, связанных с неопределенностью задания аппаратной функции, но для оценки случайных погрешностей используются другие критерии. Для количественной оценки качества пика введем показатель качества пика ХН, соответствующего направлению на источник сигнала, который одновременно отражает влияние систематических и случайных погрешностей. Качество пика ХН определяется как максимальное значение амплитуды, деленное на полуширину пика в градусах на полувысоте. При максимальном значении амплитуды $A = \text{ХН}(\alpha)$ для соответствующего угла α показатель качества определяется как

$$Q = \frac{A}{(l-r)/2},$$

где $\text{ХН}(l) = \text{ХН}(r) = 0,7A$. Характерное значение Q в рассматриваемых модельных условиях лежит в пределах от 0 до 1000. Качество синтезированной апертуры будем определять как отношение показателя качества синтезированной апертуры к показателю качества реальной апертуры при их равных размерах. Другим критерием качества может служить ошибка определения азимута цели в синтезированной апертуре.

Зависимости математического ожидания (сплошная кривая) и среднеквадратического отклонения (пунктирные кривые) ошибки определения координаты источника излучения от отношения сигнал/шум представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что даже в отсутствие рыскания платформы ошибка математического ожидания и среднеквадратическое отклонение ошибки в случае синтезированной апертуры на порядок выше, чем в случае реальной апертуры. Зависимости качества пика от шума в том же формате показаны на рис. 5. Из графиков видно, что для реальной апертуры математическое ожидание остается на одном уровне, для синтезированной апертуры оно падает. Что касается среднеквадратических отклонений, то они в обоих случаях отличаются несущественно. Относительное качество пика иллюстрирует рис. 6. Видно, что при увеличении шума от -6 до $+6$ дБ качество пика меняется от 1,0 до 0,6, т. е. существенно.

Зависимости качества пика синтезированной и реальной апертур и относительного качества пика от угла отклонения платформы приведены на рис. 7 и 8. Из рис. 7 видно, что качество пика 1 на треть хуже качества пика 2. Относительное качество колеблется от 0,63 до 1,05 (см. рис. 8).

Зависимости точности определения координаты цели от угла отклонения платформы для $\text{SNR} = 0$ дБ представлены на рис. 9. Если для реальной апертуры эта зависимость, как и следовало ожидать, практически линейная,

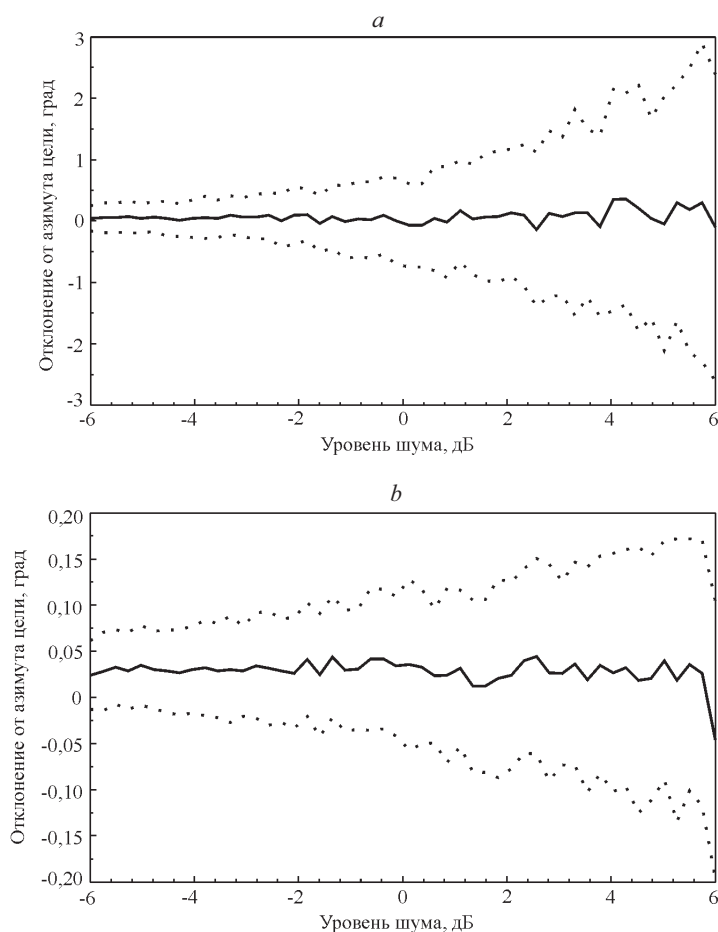


Рис. 4. Зависимости точности определения координаты цели от уровня шума для двух случаев: синтезированной (а) и реальной (б) апертур

то для синтезированной она колеблется относительно линейной, причем наибольшее отклонение порядка $0,5^\circ$ и практически не зависит от угла отклонения.

Из экспериментальных исследований, иллюстрируемых рис. 4–6, можно сделать вывод о том, что увеличение уровня шума в случае синтезированной апертуры приводит к ухудшению качества пеленгования относительно реальной. В этой области требуются дальнейшие исследования. Что же касается ХН, то даже небольшая ошибка в определении курса платформы вызывает существенные ошибки в ее формировании, шум еще больше искажает ХН, в результате азимут цели определяется с ошибкой, что следует из рис. 7–9. Борьба с этим можно с помощью процедуры адаптивного уточнения азимута цели, предложенной в следующем разделе.

3. Адаптивное улучшение процедуры синтеза апертуры. Наиболее эффективные реализации алгоритмов автофокусировки, широко обсуждаемые в литературе, посвященной активному апертурному синтезу (например, [4]), используют межкадровую («межгудковую») обработку, что неприемлемо в пассивном синтезе. Здесь более уместны методы, заимствованные из

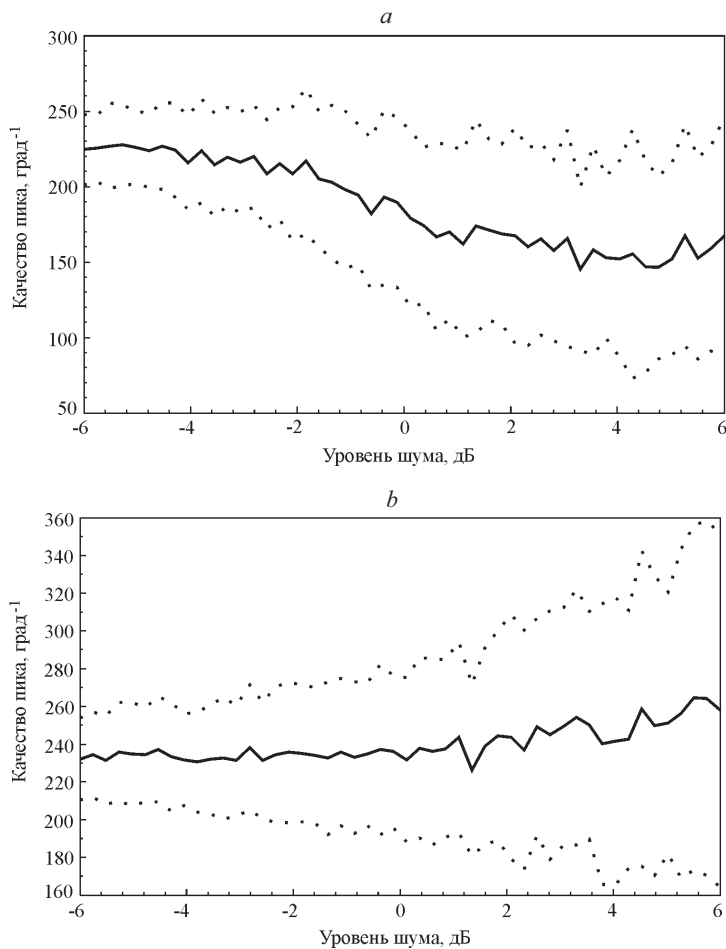


Рис. 5. Зависимости качества пика от уровня шума для двух случаев: синтезированной (а) и реальной (б) апертур

пассивных наблюдений, составляющих основу астрономии и радиопеленгации, где для компенсации атмосферных искажений применяются прикладные методы решения обратной задачи рассеяния: усиление контраста (наведение на резкость) и инверсная фильтрация [13]. В ГПБА такие методы используются при определении формы нестационарных решеток. В данном случае «резкость» кривой, представляющей собой сумму квадратов усредненных по времени откликов по всем наблюдаемым направлениям, используется как метрика при наведении решетки на источник излучения [14]. При этом в отличие от адаптивной оптики в качестве регулируемого параметра выступает не сама аппаратная функция, не поддающаяся изменениям, а весовая адаптирующая функция.

В [15] метрика резкости используется для улучшения качества гидроакустического синтезированного изображения на этапе постобработки. Такой подход исключает активное управление параметрами ХН в пассивном синтезе реального времени.

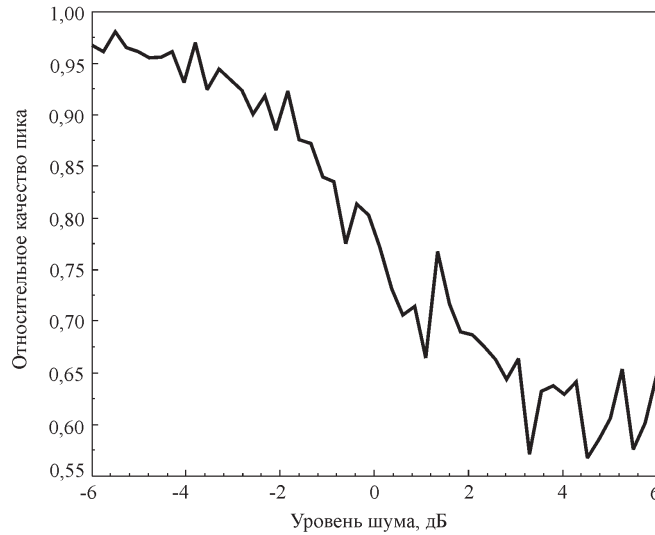


Рис. 6. Зависимость относительного качества пика от уровня шума

Для автофокусировки изображения применяется введенная в разд. 2 метрика качества пика. Компенсация влияния рыскания платформы на ХН происходит следующим образом. В любой момент времени известно ожидаемое положение каждого гидрофона. Обозначим его $\mathbf{r}_0^k(t)$, где k – порядковый номер гидрофона. Поскольку в используемой системе координат вектор движения платформы совпадает с осью x , то $\mathbf{r}_0^k(t) = [vt + (k - 1)d, 0, 0]$, где d – расстояние между гидрофонами.

В действительности из-за рыскания гидрофоны занимают другие положения, которые обозначим как $\mathbf{r}_D^k(t)$. Они считаются известными. Для синтеза апертуры и формирования ХН требуются значения акустического поля $P(\mathbf{r}_0^k(t))$ для всех значений k и t , но вместо этого известны $P(\mathbf{r}_D^k(t))$ и

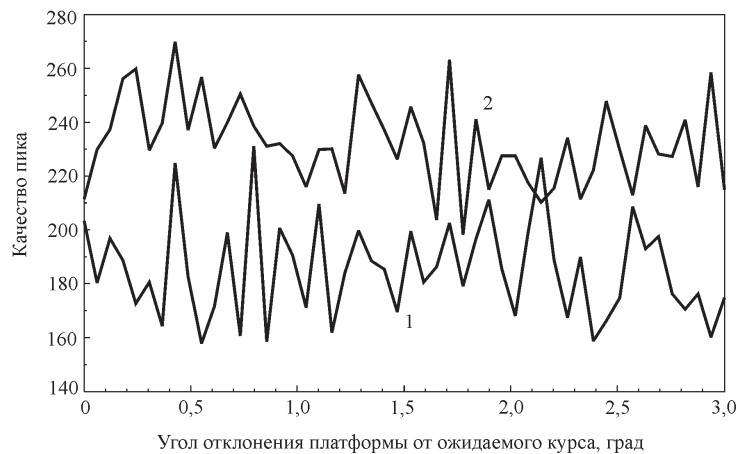


Рис. 7. Зависимости качества пика от нескомпенсированного угла отклонения платформы для синтезированной (кривая 1) и реальной (кривая 2) апертур

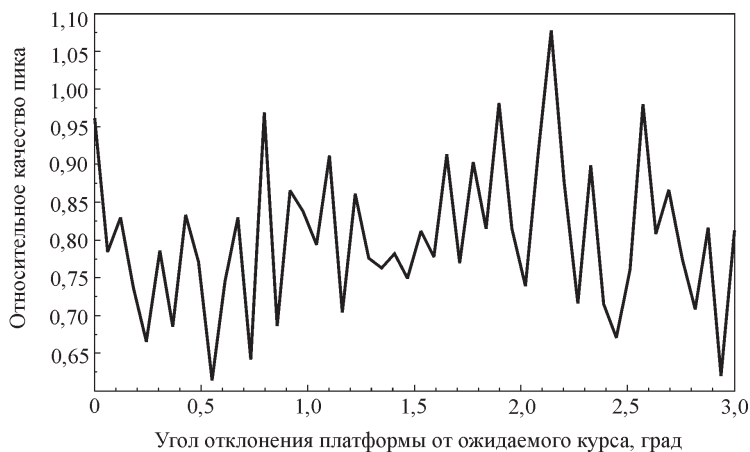


Рис. 8. Зависимость относительного качества пика от некомпенсированного угла отклонения платформы

$\mathbf{r}_0^k(t) \neq \mathbf{r}_D^k(t)$. Однако получить первое значение из второго можно с помощью компенсации фазы сигнала.

Фаза Φ , которую необходимо скомпенсировать, равна $\mathbf{K} \cdot (\mathbf{r}_0^k(t) - \mathbf{r}_D^k(t))$, где \mathbf{K} – волновой вектор. Задача осложнена тем, что волновой вектор включает в себя искомым показатель азимута источника сигнала. Для решения этой задачи используем итерационный процесс. Действительно, имея некоторые приблизительные значения \mathbf{K} , \mathbf{K}_0 , можно осуществить компенсацию фазы в имеющихся данных, домножая значение акустического поля на $e^{i\Phi}$, затем произвести синтез апертуры, заново построить ХН, определить местоположение пика, соответствующего направлению на источник сигнала, и получить тем самым уточненное значение \mathbf{K}_1 . Очевидно, что с приближением значения волнового вектора к его истинному значению, ХН станет показывать лучшие результаты: увеличение высоты и уменьшение ширины пика,

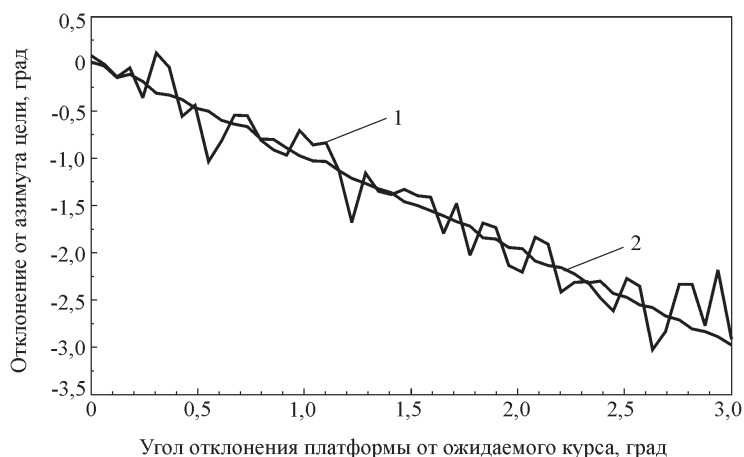


Рис. 9. Зависимости точности определения координаты цели от некомпенсированного угла отклонения платформы для синтезированной (кривая 1) и реальной (кривая 2) апертур

соответствующего направлению на цель, что означает улучшение разрешения. Далее процесс может повторяться до тех пор, пока $|\mathbf{K}_n - \mathbf{K}_{n+1}|$ не станет меньше наперед заданного ε . Модельные эксперименты показали, что при $\varepsilon = 10^{-4}$ необходимо 4–5 шагов уточнения \mathbf{K} .

Опишем суть процедуры адаптации, поскольку ее формальное выражение слишком сложно и малоинформативно:

$$\mathbf{K}_{n+1} = \text{Peak}(\text{Beamforming}(\text{Etam}(\text{Compensation}(D, \mathbf{K}_n))))).$$

Функция *Compensation* компенсирует разницу между ожидаемым и действительным положением гидрофонов, *Etam* – функция синтеза апертуры, *Beamforming* – функция формирования ХН, *Peak* – функция формирования волнового вектора.

Остается вопрос, как получить исходное значение \mathbf{K}_0 ? Для его вычисления используется ХН реальной апертуры без синтеза, дающая хоть и малое разрешение, но позволяющая определить приблизительное положение источника сигнала, которое в дальнейшем уточняется с помощью синтеза апертуры и итерационного процесса по компенсации рыскания платформы.

Результат процедуры адаптации представлен на рис. 10. На платформе установлено 20 гидрофонов. Цель не движется. Формирование ХН в одной позиции платформы (реальная апертура – 20 гидрофонов) дает результат в виде кривой 1. Далее производится синтез апертуры, в процессе которого платформа занимает семь позиций. При этом синтезируется 65 гидрофонов. Если бы на платформе было установлено 65 гидрофонов (реальная апертура – 65 гидрофонов) и производилось однократное формирование ХН, то она имела бы вид кривой 2. В процессе синтеза курс платформы меняется, курсовой угол определяется с ошибкой, поэтому на каждой последующей позиции платформы он уточняется путем адаптации. Если бы курсовой угол не измерялся датчиком (или датчик курсового угла имел погрешность $0,5^\circ$), ХН имела бы вид кривой 3. А если применить адаптивный алгоритм, оптимизирующий качество пика, ХН будет представлена кривой 4. Видно, что кри-

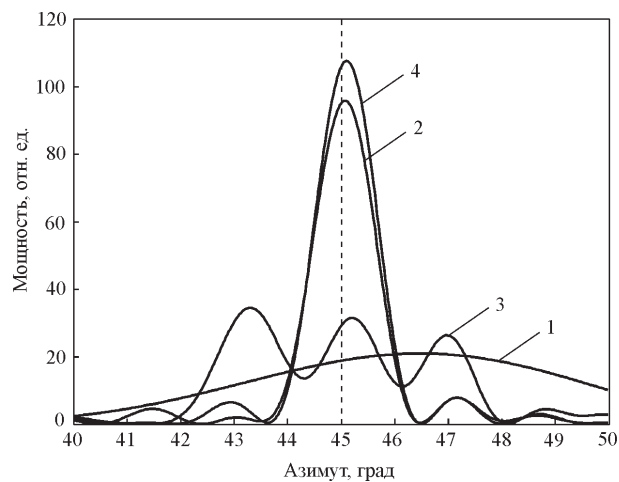


Рис. 10. Результат адаптивного уточнения курса платформы

вые 2 и 4 (ХН для реальной и синтезированной апертур) в области пика отличаются только по амплитуде. Расчет проводился для $SNR = -6$ дБ.

Заключение. Разработанная программная модель синтеза апертуры позволила промоделировать процедуру синтеза и проверить влияние основных факторов, которые вызывают ошибки формирования характеристики направленности синтезированной апертуры относительно реальной. Программное моделирование подтвердило, что аддитивный шум сигнала может быть эффективно скомпенсирован путем использования предложенных другими авторами методов (алгоритм ЕТАМ). Был разработан метод адаптивного уточнения азимута цели, позволивший скомпенсировать ошибки определения курса платформы. Для того чтобы синтетическая апертура заняла достойное место в ряду гидролокационного вооружения, необходимо решить еще одну очень важную задачу – компенсировать влияние процесса движения цели на качество синтеза. В работах [16, 17] для описания буксируемой решетки предложено использовать адекватные измеряемым нестационарным акустическим полям динамические модели с элементами обучения и предсказания, включающие в себя параметры движения платформы и источника звука. Такой подход меняет саму структуру тракта обнаружения гидроакустических сигналов – оценивание параметров и сопровождение (трассировка траектории источника сигнала) осуществляются одновременно. Для решения этой задачи целесообразно использовать итеративные процедуры, предложенные в данной работе, а вычислительные производительности, обеспечиваемые современной вычислительной техникой, позволяют осуществлять эти операции в реальном масштабе времени.

Авторы выражают благодарность И. И. Коршеверу за конструктивные замечания при подготовке работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lemon S. G.** Towed-array history // IEEE Journ. Oceanic Eng. 2004. **29**. P. 365.
2. **Sullivan E. J.** Passive acoustic synthetic aperture processing // IEEE Oceanic Eng. Soc. Newsletter. Winter 2003. P. 2.
3. **Fossen T. I.** Guidance and Control of Ocean Vehicles. N. Y.: John Willey & Sons, 1994.
4. **Pinto M. A.** High resolution seafloor imaging with synthetic aperture sonar // IEEE Oceanic Eng. Soc. Newsletter. Summer 2002. P. 15.
5. **Fortune S. A., Hayes M., Gough P.** Contrast optimisation of coherent images // Proc. of Oceans'03. San-Diego, California, US, 2003. P. 1001.
6. **Wahl D. E., Eichel H., Ghiglia D. C., Jakowatz C. V.** Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Systems. 1994. **30**, N 3. P. 827.
7. **Stergiopoulos S.** Implementation of adaptive and synthetic aperture beamformers in sonar systems // Proc. IEEE. 1998. **86**, N 2. P. 358.
8. **Караваяев В. В., Сазонов В. В.** Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987.
9. **Бэргероуп А.** Обработка сигналов в гидролокации // Применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1980. Гл. 6.

10. **Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С., Чулков В. Л.** Исследование программной модели алгоритма обработки сигналов с антенны с синтезированной апертурой // Тр. VIII Междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». С.-Пб.: Наука, 2006. С. 88.
11. **Шифрин Я. С.** Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970.
12. **Carey W. M., Moseley W. B.** Space-time processing, environmental-acoustic effects // IEEE Journ. Oceanic Eng. 1991. 16, N 3. P. 285.
13. **Харди Дж.** Активная оптика // ТИИЭР. 1979. **66**, № 6.
14. **Bucker H. P.** Beamforming a towed line array of unknown shape // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1978. **63**. P. 1451.
15. **Fortune S. A., Hayes M. P., Gough P. T.** Contrast optimization of coherent images // Proc. of Oceans. 2003. **5**. P. 2622.
16. **Candy J. V.** Model-Based Signal Processing. N. Y.: Willey, 2006.
17. **Fawcett J. A.** Synthetic aperture processing for a towed array and a moving source // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1993. **94**, N 5. P. 2832.

Поступила в редакцию 23 июля 2007 г.
