

Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматизации и электротехники СО РАН

На правах рукописи

Дашевский Олег Юльевич

**Разработка методов и программно-алгоритмических  
средств апертурного синтеза гидроакустических антенн  
в пассивном режиме**

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН

Научный руководитель	доктор технических наук Нежевенко Евгений Семенович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Спектор Александр Аншелевич
	доктор технических наук Резник Александр Львович
Ведущая организация	ОАО «Концерн «Океанприбор»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 в Учреждении Российской академии наук Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Насыров К. А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Апертурный синтез в гидролокации развивается в основном в направлении получения изображения дна с высоким разрешением, при этом используется активный режим антенны. Синтез апертуры для пассивного наблюдения источников на дальних расстояниях начал исследоваться только с конца 1980-х годов. В то же время известно, что в радиолокации синтезирование апертуры стало основным методом получения высокоразрешающих изображений подстилающей поверхности при съемке с летательных аппаратов. Причиной послужило то, что в случае летательного аппарата увеличение физического размера антенны для получения высокого разрешения крайне затруднено.

В гидролокации сложилась иная ситуация. Слабое, в сравнении с радиолокацией, развитие пассивного синтеза апертуры было обусловлено существенным различием в скорости распространения акустического сигнала в воде и радиосигнала в воздухе, а также сравнительно низкой скоростью перемещения антенны. Кроме того, имело место и следующее соображение: обеспечение высокого разрешения на дальних расстояниях в гидроакустике возможно с помощью гибких протяженных буксируемых антенн (ГПБА), применение которых является мощной альтернативой использованию синтезированной апертуры. Именно в сторону ГПБА были направлены основные силы исследователей и разработчиков.

Как следствие, несмотря на выгоды, которые может принести синтез апертуры в гидроакустике, развивалась эта тематика достаточно медленно, в основном, в теоретическом плане. Выгоды синтеза апертуры вытекают из недостатков ГПБА. Прежде всего, ГПБА трудно разместить на мобильных плавсредствах (гидросамолетах, быстроходных катерах и т.д.), в то же время быстрая доставка антенны в район обследования очень важна, в частности при антитеррористических (антипиратских) действиях, борьбе с контрабандистами и т.п. Существует проблема увеличения длины ГПБА при буксировке подводными лодками. Кроме того, ГПБА в силу своей гибкости в процессе буксировки изменяет форму, что требует решения дополнительной задачи по идентификации формы.

Таким образом, актуальность работы обусловлена потребностью в эффективных методах синтезирования апертуры в гидроакустике.

**Цели диссертационной работы** заключаются в анализе эффективности нескольких известных алгоритмов синтеза апертуры в пассивном режиме, их доработке, разработке и апробации новых методов.

Для достижения поставленных целей должны были быть решены следующие задачи:

1. Выработать единый критерий для оценки эффективности синтеза апертуры.

2. Разработать программно-алгоритмическую систему, позволяющую испытывать алгоритмы синтеза апертуры в равных условиях на тестовых (полученных для случая модельной помехосигнальной обстановки) и реальных сигналах.

3. Разработать метод компенсации некорректной оценки направлений на источники сигнала, возникающей вследствие отклонения платформы от прямолинейного курса, необходимого для синтеза апертуры.

4. Разработать метод синтеза апертуры для широкополосных сигналов.

5. Провести тестирование существующих и предложенных алгоритмов синтеза апертуры на тестовых и реальных сигналах.

### **Научная новизна**

1. Разработан научно обоснованный критерий оценки качества синтезирования апертуры.

2. Предложен метод адаптивного уточнения характеристики направленности при наличии ошибок в определении курса платформы.

3. Предложен алгоритм синтеза апертуры для широкополосных сигналов во временной области.

### **Практическая значимость**

1. Разработанный программно-алгоритмический комплекс SynApp позволяет обрабатывать реальные гидроакустические сигналы в режиме синтезированной и реальной апертуры, проводить сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов.

2. Предложенный итеративный метод уточнения характеристики направленности позволяет применять алгоритм ETAM (Extended Towed Array Measurements), известный в литературе, при наличии отклонений курса платформы от прямолинейного для случая одного источника сигнала.

3. Созданный в рамках работы алгоритм TETAM (Time-Domain ETAM) позволяет осуществлять синтез апертуры для широкополосных сигналов во временной области, в том числе для нескольких источников с различными частотными характеристиками.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Программно-алгоритмический комплекс SynApp позволяет моделировать широкий спектр методов обработки гидроакустических сигналов, связанных с синтезированием

апертуры.

2. Алгоритм ЕТАМ, известный в литературе, по сравнению с другими алгоритмами является наиболее эффективным для узкополосных сигналов, требуя минимум априорной информации.

3. Итеративный алгоритм, основанный на автофокусировке характеристики направленности, позволяет компенсировать искажения последней, возникающие в процессе синтеза апертуры с помощью алгоритма ЕТАМ в случае непрямолинейного движения платформы.

4. Алгоритм ТЕТАМ обеспечивает синтез апертуры во временной области при наличии нескольких источников сигнала с разными частотными характеристиками.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

VIII Международная конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — ГА-2006, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2006 г.; Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений», 19–20 сентября 2006 г., Новосибирск; 8th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies — PRIA-8-2007 (Russia, Yoshkar-Ola, Oct. 8-12, 2007); IX Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — ГА-2008, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2008 г.; X Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — ГА-2010, Санкт-Петербург, 25–27 мая 2010 г.; III Международная конференция «Автоматизация, управление и информационные технологии-2010» (Automation, Control, and Information Technology) — АСИТ'2010. Новосибирск, 15–18 июня 2010 г.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией [3, 6, 7].

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автором был предложен алгоритм компенсации искажений при непрямолинейном движении платформы, а также проведено теоретическое обоснование алгоритма ТЕТАМ, разработанного совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты, связанные с

разработкой программного обеспечения, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов, получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 114 страниц, включая 33 рисунка и библиографию (79 наименований).

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность темы исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе**, составленной на основе литературных источников, приведен обзор методов повышения разрешения в гидроакустике.

До последнего времени наиболее эффективным средством подводных наблюдений и пеленгации источников акустического излучения оставалась гибкая протяженная буксируемая антенна (ГПБА). Использование такой антенны позволяет формировать характеристику направленности (ХН) с высоким угловым разрешением. Однако ГПБА является неудобной в эксплуатации. Учитывая тенденцию перехода современных средств дальнего активного зондирования в область нижних частот, где наиболее благоприятны условия распространения излучаемого сигнала и его скрытности, длина современных ГПБА достигает километра. Гибкая антенна создает проблемы с определением ее формы в реальном времени, без чего невозможно корректное формирование ХН. Для решения этой проблемы ГПБА оснащают по всей длине изошренными и дорогостоящими средствами позиционирования. И тем не менее формирование ХН во время изменения направления движения буксирующего судна, занимающего обычно половину маршрутного времени, до сих пор остается нерешенной проблемой.

В радиолокации между тем развивался другой способ повышения разрешения, не связанный с увеличением физической апертуры антенны. В 1970–1980 гг. были достигнуты впечатляющие успехи в разработке радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Под влиянием этих успехов нерешенные проблемы ГПБА побуждают разработчиков оборудования, предназначенного для подводных наблюдений, к аналогичным исследованиям под водой (гидроакустические локаторы с синтезированной апертурой).

Анализ различных методов повышения разрешения показывает перспективность син-

теза апертуры как метода повышения разрешения в гидроакустике.

**Во второй главе** приведен обзор известных методов синтезирования апертуры в гидроакустике, дополненный теоретическими основами пеленгации источников сигнала.

Одной из целей обработки сигналов антенных решеток в пассивной гидролокации является нахождение оценки интенсивности излучения в акустической среде как функции частоты и волнового вектора (пеленга). Такая оценка — частотно-азимутальный спектр среды — может служить базисом для решения задач обнаружения и идентификации источников сигнала. Процесс построения спектра принято называть формированием ХН (ФХН). Известны алгоритмы ФХН во временной и частотной областях.

Основной принцип ФХН состоит в когерентном суммировании сигналов, приходящих на антенную решетку с определенного направления. Пространственный спектр мощности получается в результате выполнения данной операции для диапазона направлений (азимутов), представляющих интерес. ФХН во временной области основано на сложении сигналов гидрофонов, взятых в разные моменты времени (задержка зависит от номера гидрофона и азимута). ФХН в частотной области использует сдвиги по фазе.

Введенная теоретическая база использована для анализа известных алгоритмов синтеза апертуры с единой позиции. Проанализированы методы Йена—Кэри, ЕТАМ и его более поздняя модификация МЕТАМ (Modified ЕТАМ), а также метод FFTSA (Fast Fourier Transform Synthetic Aperture).

В работе сделан вывод о том, что наиболее перспективным алгоритмом является алгоритм ЕТАМ, который обладает наглядным физическим смыслом и прост в реализации, не требуя существенных вычислительных ресурсов. Также представляет интерес метод МЕТАМ, являющийся развитием ЕТАМ. В сравнении с ЕТАМ и МЕТАМ метод Йена—Кэри требует априорной информации: знания относительной скорости источника относительно платформы и его частоты. В методе же FFTSA фаза компенсируется дискретно из-за введения дополнительного дискретного преобразования Фурье, что приводит к искажениям ХН.

Рассмотрим подробнее метод ЕТАМ. Он опирается на тот факт, что при движении антенной решетки (платформы) вдоль своей оси возникает перекрытие (см. рис. 1). На рисунке показана антенная решетка из 5 гидрофонов, движущаяся со скоростью  $v$  вдоль своей оси. В момент времени  $t_1$  она занимает такое положение, что 1-й, 2-й, 3-й гидрофоны совпадают по пространственным координатам (перекрываются) с 3-м, 4-м, 5-м гидро-

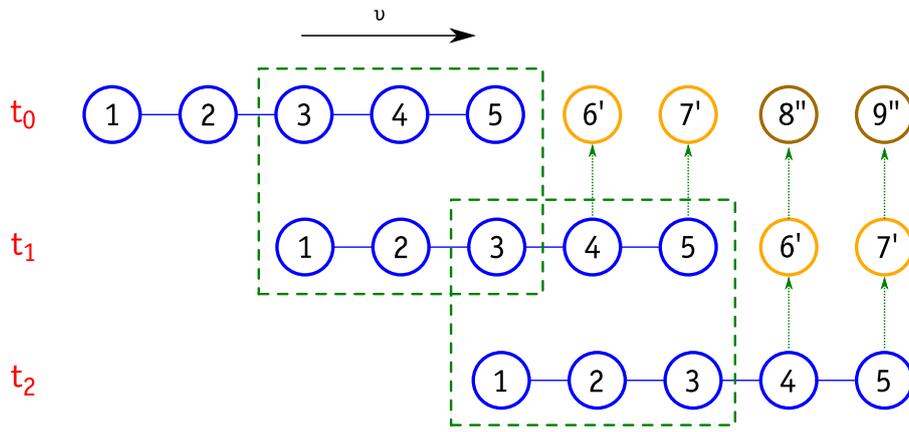


Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма ETAM

фонами этой же решетки в момент времени  $t_0$ . Аналогичная ситуация наблюдается для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ .

При условии сохранения временной когерентности сигнала перекрывающиеся гидрофоны содержат одинаковую пространственную информацию и отличаются лишь сдвигом по фазе. С другой стороны, данные 4-го и 5-го гидрофонов в момент времени  $t_1$  содержат пространственную информацию *несуществующих* 6-го и 7-го гидрофонов в момент времени  $t_0$ . Следовательно, эти данные могут быть использованы для расширения апертуры решетки в момент времени  $t_0$ , при условии компенсации фазы. Вычисление необходимого фазового сдвига происходит путем попарного коррелирования перекрывающихся гидрофонов и усреднения. Применяя полученный сдвиг к данным 4-го и 5-го гидрофонов в момент времени  $t_1$ , получаем данные виртуальных гидрофонов  $6'$  и  $7'$  в момент времени  $t_0$ . Аналогичным образом, используя данные гидрофонов решетки в момент времени  $t_2$ , получаем виртуальные гидрофоны  $6'$  и  $7'$  в момент времени  $t_1$ . Затем, применяя фазовый сдвиг, вычисленный на первом шаге, получаем данные виртуальных гидрофонов  $8''$  и  $9''$  в момент времени  $t_0$ .

Таким образом, решетка из 5 гидрофонов с перекрытием в 3 гидрофона за 2 шага синтеза расширяется до 9 гидрофонов (4 из которых являются виртуальными).

Синтез апертуры накладывает определенные требования на помехосигнальную обстановку и движение платформы. При отклонении курса платформы от предполагаемого прямолинейного неизбежны искажения фазы, приводящие к некогерентному суммированию сигналов, которое, в свою очередь, негативно влияет на разрешение. Кроме того, известные алгоритмы направлены на синтез апертуры монохроматических источников, а возможности синтеза для широкополосных источников остаются до настоящего времени

практически не исследованными.

**В третьей главе** рассмотрены факторы, негативно влияющие на синтез апертуры; предложены критерий качества синтеза и итеративный способ компенсации рыскания антенной решетки.

Сигнал в океане имеет ограниченную пространственную и временную когерентность. Для пассивных систем гидролокации ограниченная длина когерентности связана с изменением частоты сигнала источника вследствие доплеровского сдвига и с эффектами распространения волнового сигнала в среде, а также с флуктуациями в работе механизмов. В процессе движения антенная решетка, которая, как правило, буксируется судном, испытывает колебания относительно курса. Кроме того, вероятны флуктуации скорости судна и антенной решетки. Также, если антенная решетка представляет из себя ГПБА, она может изменять свою форму в процессе движения.

Любые погрешности и флуктуации будут приводить к некогерентному сложению сигналов в процессе синтеза, негативно влияя на его результаты. При этом указанное негативное влияние может отличаться для разных алгоритмов синтеза.

Для сравнительного анализа поведения алгоритмов синтеза в неблагоприятных условиях предложен следующий критерий. Вводится численный 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:  $Q = P^{max}/W$ .

Далее предположим, что на базе антенной решетки из  $N$  гидрофонов в процессе синтеза получается синтезированная апертура, состоящая из  $N'$  гидрофонов ( $N' \geq N$ ). В частности, синтез может быть проведен с помощью метода ЕТАМ, описанного во второй главе. В результате могут быть построены три ХН:  $P_0(\theta)$  — ХН реальной апертуры из  $N$  гидрофонов;  $P_s(\theta)$  — ХН синтезированной апертуры из  $N'$  гидрофонов;  $P_r(\theta)$  — ХН реальной апертуры из  $N'$  гидрофонов. Полученные ХН позволят рассчитать показатели качества пиков  $Q_0$ ,  $Q_s$  и  $Q_r$ .

Вторым показателем, применяющимся для оценки эффективности синтеза апертуры, является отклонение положения пика (значения угла, соответствующего максимальной амплитуде сигнала) от априорно известного. Для трех представленных ХН получаем три показателя:  $\delta_0$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_r$ .

Следует ожидать, что  $Q_r$  будет выше, чем  $Q_0$  (если только  $N'$  не является настолько большим, что пространственная когерентность нарушается даже в масштабах самой решетки). Положение пика  $\theta_r^{max}$  должно давать наиболее точную оценку истинного азимута источника  $\theta_0$  ( $\delta_r$  минимально). Что касается показателей для синтезированной апертуры, следует ожидать, что  $Q_0 < Q_s \leq Q_r$ . При этом  $Q_s$  достигнет значения  $Q_r$  только в модельном случае без шума (ОСШ =  $\infty$ ). Значение же  $\delta_s$  отражает влияние некоторых мешающих факторов. Так, движущийся источник сигнала, находящийся на небольшом расстоянии от антенной решетки, может отразиться в ХН со смещением ( $\delta_s > 0$ ).

Далее в работе предложен итеративный способ компенсации влияния рыскания платформы, которое само по себе приводит к искажению ХН. Для автофокусировки изображения применяется введенная метрика качества пика. Синтезирование апертуры требует равномерного и прямолинейного движения платформы, но в действительности из-за рыскания гидрофоны занимают другие позиции. Пространственная информация гидрофонов будет отличаться на соответствующий сдвиг по фазе, зависящий от неизвестного пространственного положения источника.

Решение данной задачи возможно при построении итеративного процесса, суть которого может быть выражена следующим образом:

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

Функция *Compensation* компенсирует разницу между ожидаемым и действительным положением гидрофонов, *ETAM* — функция синтезирования апертуры по алгоритму *ETAM*, *Beamforming* — функция формирования ХН, *Peak* — функция определения волнового вектора с помощью поиска пика-максимума. Для получения  $\mathbf{K}_0$  используется  $P_0(\theta)$ .

**В четвертой главе** диссертации описан предложенный метод синтеза апертуры во временной области в случае широкополосных источников — метод *ТЕТАМ*.

Предположим, что функция  $s_0(t)$  (сигнал источника) является периодичной с периодом  $T$ . Тогда, если  $\tau \gg T$ , можно подобрать такое  $\delta t$ , что  $s_0(t) = s_0(t + \tau + \delta t)$  ( $|\delta t| < T$ ). В работе показано, что показания гидрофонов в момент времени  $t_2 + \delta t$  близки к показаниям гидрофонов в момент времени  $t_1$  (см. рис. 1). Поскольку в момент времени  $t_2$  платформа занимает другое пространственно положение, возникает возможность расширения апертуры антенной решетки. Неизвестное  $\delta t$  находится с помощью максимизации корреляционной функции для данных гидрофонов в момент времени  $t_1$  и  $t_2 \pm \delta t$ . В случае дискретного времени это означает простой перебор различных значений  $\delta t$  в пределах

ограниченного диапазона.

Как и в оригинальном алгоритме ЕТАМ, процесс синтеза может быть продолжен с учетом ограничений по временной и пространственной когерентности. Длина апертуры получается такой же, как в ЕТАМ.

Далее в диссертации рассмотрен случай нескольких монохроматических источников сигнала с различным пространственным расположением. Показано, что сигнал, поступающий на антенную решетку и представляющий из себя суперпозицию сигналов отдельных источников, является почти периодической функцией по Бору.

**В пятой главе** рассмотрены вопросы программного моделирования синтеза апертуры. Для проведения сравнительных испытаний различных алгоритмов синтеза в различных условиях возникла потребность в базовой модельной системе, в рамках которой можно было бы все исследуемые алгоритмы привести к «общему знаменателю». К системе были сформулированы следующие требования: расширяемость, удобный интерфейс пользователя, возможность применять алгоритмы обработки к одним и тем же данным и сравнивать результаты, максимальное быстродействие.

В основу программно-алгоритмического комплекса SynApp, созданного в соответствии с указанными требованиями, положена блочно-модульная структура с возможностью управления потоками информации между модулями. Пользователю предоставляется возможность создавать и редактировать свой собственный граф, выбирая узлы из заданного множества типов и соединяя их необходимым образом. Каждый узел-модуль обладает параметрами, которые можно редактировать. Готовый граф можно «запустить» на исполнение (выполнить эксперимент).

**В шестой главе** приведены результаты экспериментальных исследований алгоритмов синтеза апертуры, полученные с помощью комплекса SynApp для случая тестовых (модельных) сигналов.

Подтверждена эффективность работы ЕТАМ в случае единственного источника сигнала. Далее была исследована зависимость показателей качества синтеза от ОСШ (соотношения сигнал-шум). Для 20 последовательных отсчетов формировались ХН, в каждой из них происходило обнаружение пика и определение его характеристик  $\delta$  и  $Q$ . Далее полученные 20 величин усреднялись с вычислением среднеквадратичного отклонения (СКО). Вычисления производились для уровня белого шума от  $-8$  до  $8$  дБ.

Были получены средние значения и СКО для  $\delta_0$ ,  $\delta_s$  и  $\delta_r$ ;  $Q_0$ ,  $Q_s$  и  $Q_r$ . Точность опре-

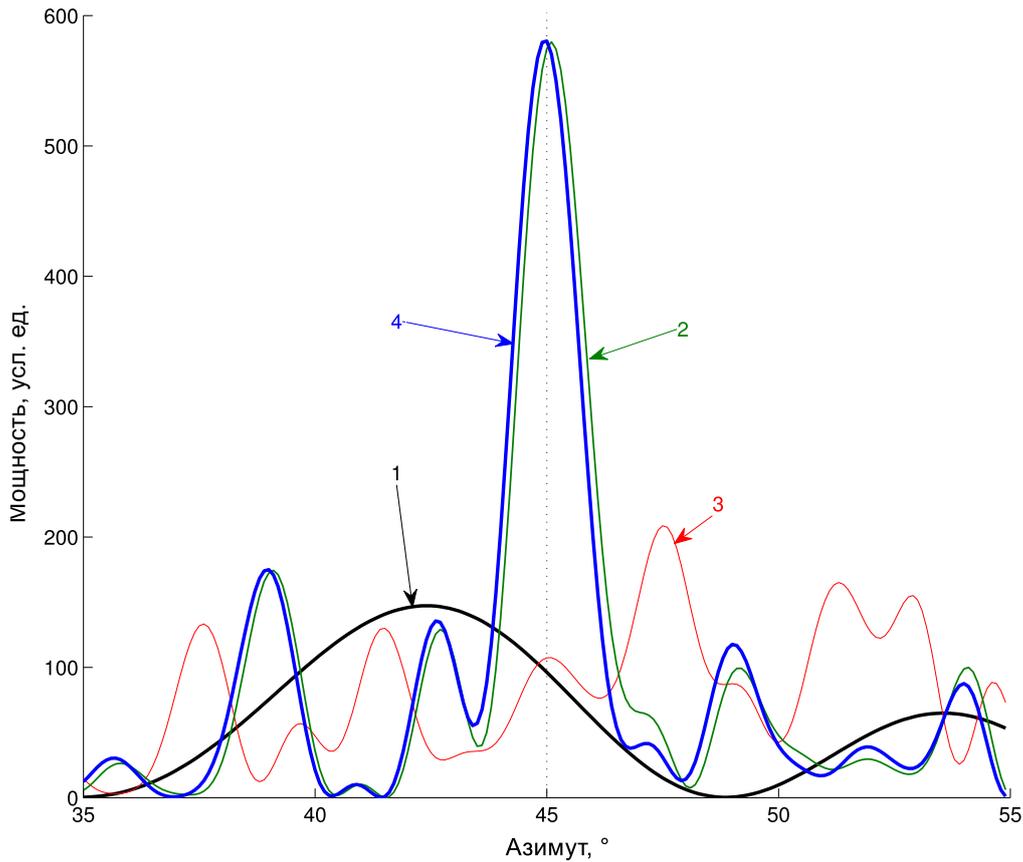


Рис. 2. Результат адаптивного уточнения курса платформы

деления цели у синтезированной апертуры ( $N = 24$ ) оказалась выше, чем у реальной, из которой она построена, но ниже, чем у реальной того же размера. То есть  $\delta_0 < \delta_s < \delta_r$ , чего и следовало ожидать. Также было установлено, что качество пика для синтезированной апертуры  $Q_s$  соответствует качеству пика реальной апертуры такого же размера  $Q_r$  вне зависимости от уровня шума, при этом обе эти величины в 2 раза больше, чем  $Q_0$ . Полученные данные позволяют сделать вывод о работоспособности и эффективности алгоритма ЕТАМ в условиях некоррелированной шумовой помехи (белого шума).

Далее в диссертации было проведено экспериментальное исследование на тестовых сигналах алгоритма компенсации фазы для адаптивного уточнения курса платформы. Результаты представлены на рис. 2.

Формирование ХН реальной апертуры ( $N = 20$ ) дает результат в виде кривой 1. Далее производится синтез апертуры с 7 последовательными перекрытиями, при этом общий размер виртуальной апертуры равен 110 гидрофонов. Кривая 2 соответствует ХН

для реальной апертуры размером  $N = 110$ . Результат синтезирования апертуры без адаптации имеет вид кривой 3. ХН после применения предложенного итеративного алгоритма (1), оптимизирующего качество пика, представлена кривой 4. Видно, что кривые 2 и 4 (ХН для реальной и синтезированной апертур размера 110) в области пика отличаются только по амплитуде. Исследования подтверждают эффективность алгоритма адаптивной компенсации отклонения платформы от прямолинейного курса.

В работе было проведено сравнительное исследование алгоритмов ЕТАМ и ТЕТАМ на тестовых сигналах для половинной апертуры. Установлено, что показатели ТЕТАМ вплотную приближаются к показателям антенны с реальной апертурой того же размера, в то время как все показатели ЕТАМ хуже примерно в полтора-два раза по сравнению с ТЕТАМ.

Особое преимущество алгоритма ТЕТАМ перед ЕТАМ проявляется тогда, когда помехосигнальная обстановка содержит в себе сигналы нескольких источников на разных частотах.

**В седьмой главе** приведены результаты экспериментальных исследований алгоритмов синтеза апертуры, полученные с помощью комплекса SynApp для реальных сигналов. Для этого использовалась информация, предоставленная концерном «Океанприбор»: временные сигналы ГПБА с тремя частотными диапазонами (ЧД).

Синтез апертуры проводился с помощью алгоритмов ЕТАМ, МЕТАМ и ТЕТАМ в программе SynApp. Поскольку алгоритмы ЕТАМ и МЕТАМ работают только с монохроматическими сигналами, а представленные данные широкополосные, то они подвергались фильтрации узкополосным фильтром. После этого оставались сигналы 1/3, 1/4, 1/6 гидрофонов и т.д. Результаты формирования ХН для реальной антенны и антенны с синтезированной апертурой сравнивались по нескольким критериям.

За точку отсчета были взяты результаты обработки данных с помощью традиционных алгоритмов: сначала данные подвергались частотному анализу (быстрое преобразование Фурье по 512 точкам), а затем по каждой частоте формировалась ХН.

Далее потребовалось обеспечить алгоритм ЕТАМ узкополосным сигналом, для чего была применена цифровая фильтрация. Сначала путем демодуляции спектр сигнала был перенесен в начало координат частотной сетки:  $x_n^{(f_0)}[k] = x_n[k] \exp\{j2\pi f_0 k \Delta t\}$ , где  $f_0$  — центр полосы,  $k$  — номер отсчета,  $\Delta t$  — интервал квантования. Затем сигнал  $x_n^{(f_0)}[k]$  пропусклся через цифровой фильтр нижних частот. Использовался фильтр Баттеруорта с

бесконечной импульсной характеристикой 5-го порядка с частотой среза 2 Гц. Для компенсации фазовых искажений фильтр применялся последовательно 2 раза, причем второй раз в обратном направлении.

Синтезирование с помощью алгоритма ЕТАМ дало качество пика, соответствующее реальной апертуре того же размера.

При дальнейшем уменьшении субапертуры (до 16, 12 и т. д.) возникало существенное смещение положения пика ХН ( $> 1^\circ$ ), что, по всей вероятности, связано с влиянием движения источника (уменьшение субапертуры приводит к увеличению времени синтеза). При этом существенного изменения ни ширины пика, ни ОСШ не наблюдалось.

Для обработки данных также был применен алгоритм МЕТАМ. Оказалось, что для малых значений показателя усреднения  $I$  кривая ХН попросту сливается с кривой ХН алгоритма ЕТАМ без усреднения, не давая никакого выигрыша. При увеличении  $I$  кривые начинают отличаться, но МЕТАМ дает лишь небольшой выигрыш: при  $I = 1000$  уменьшилось абсолютное значение смещения пика ( $0,09^\circ$  против  $0,18^\circ$ ), а полуширина практически не изменилась ( $3,46^\circ$  против  $3,45^\circ$ ).

Далее были проведены эксперименты по расширению апертуры за пределы реальной (60, 72 и 84 гидрофона). Несмотря на рост качества пика и ОСШ расширение приводит к увеличению смещения пика. Данный факт, как и в случае малых субапертур, связан с движением источника сигнала.

В диссертации приведены результаты обработки реальных сигналов с помощью алгоритма ТЕТАМ. ХН для ЧД № 2 при предобработке гребенчатым фильтром приведена на рис. 3. Показатель качества пика составляет 84 % от показателя для реальной апертуры, находясь между показателями для половины реальной апертуры и для полной реальной апертуры.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы.

1. Разработан программно-алгоритмический комплекс SynApp, позволяющий загружать реальные сигналы и моделировать тестовые сигналы произвольного количества монохроматических источников, синтезировать апертуру с использованием различных алгоритмов, строить характеристики направленности и сопоставлять результаты с помощью численных критериев.

2. Предложен научно обоснованный критерий оценки эффективности синтеза апертуры, основанный на сравнении трех характеристик направленности: синтезированной

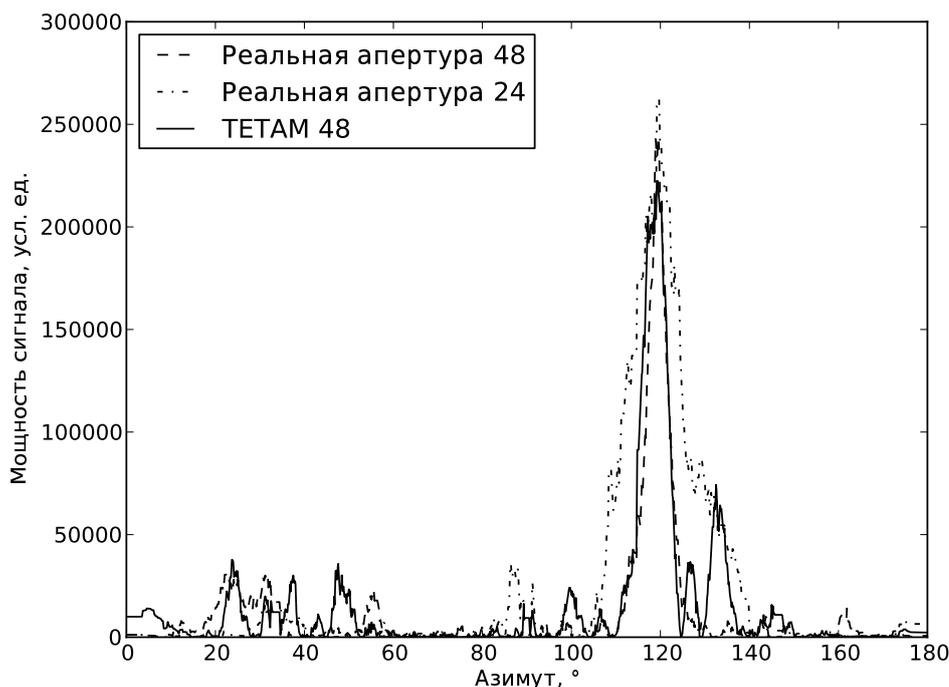


Рис. 3. Синтез апертуры алгоритмом ТЕТАМ с предобработкой гребенчатым фильтром

апертуры, реальной апертуры того же размера и укороченной реальной апертуры, на базе которой производится синтез, с использованием критерия качества ХН для случая одной цели.

3. На базе комплекса SynApp проведены сравнительные исследования алгоритмов синтеза апертуры на тестовых и реальных сигналах. Для численной оценки результатов введена метрика *качества пика* — отношение максимума мощности ХН (пика, соответствующего направлению на источник сигнала) к полуширине пика на полувысоте.

На тестовых сигналах для значений ОСШ  $-5 \dots 5$  дБ при синтезировании апертуры вдвое большего размера относительно физической апертуры алгоритм ЕТАМ показал качество пика, сравнимое с качеством пика реальной апертуры того же размера. Аналогичный результат получен на реальных сигналах. Ошибка пеленга при синтезировании апертуры составляла не более  $0,2^\circ$ .

Установлено, что алгоритм ЕТАМ по сравнению с другими алгоритмами является наиболее эффективным для узкополосных сигналов и требует минимум априорной информации. Испытания алгоритма МЕТАМ на реальных сигналах не выявили его существенного преимущества перед алгоритмом ЕТАМ.

4. Предложен алгоритм итеративного уточнения характеристики направленности в

случае непрямолинейного движения платформы, позволяющий компенсировать известные отклонения курса платформы для помехосигнальной обстановки, состоящей из одного источника сигнала.

Испытания алгоритма на тестовых сигналах показали, что за 5 итераций достигается сходимость при критерии останова  $\epsilon = 10^{-4}$ . При этом качество пика возрастает более чем в 16 раз, а ошибка пеленга уменьшается с  $2,60^\circ$  до  $0,04^\circ$ .

5. Разработан алгоритм синтеза апертуры для широкополосных сигналов — алгоритм ТЕТАМ. Данный алгоритм позволяет осуществлять синтез при наличии нескольких источников сигнала с разными частотными характеристиками. Работоспособность алгоритма подтверждена испытаниями на тестовых и реальных сигналах.

Исследование алгоритма ТЕТАМ на реальных сигналах показало, что при уменьшении размера реальной апертуры в два раза и синтезировании апертуры с помощью алгоритма ТЕТАМ до исходного размера качество пика ХН в 2 раза больше, чем качество пика ХН вдвое уменьшенной апертуры, и составляет 84 % от качества пика ХН реальной апертуры.

## Список публикаций

- [1] Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С., Чулков В. Л. Исследование программной модели алгоритма обработки сигналов с антенны с синтезированной апертурой // Труды VIII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — ГА-2006. СПб.: Наука, 2006. Стр. 88–91.
- [2] Дашевский О. Ю. Исследование программной модели алгоритма обработки сигналов с антенны с синтезированной апертурой // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений» (Новосибирск, Россия, 19–20 сентября 2006). Новосибирск, НГУ, 2006. С. 7–10.
- [3] Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С. Исследование влияния мешающих факторов на качество синтезирования апертуры в гидролокации // Автометрия. 2008. 44, № 2. С. 76–90.
- [4] Дашевский О. Ю. Моделирование обработки гидроакустических данных с антенн с синтезированной апертурой // XIV Международная научно-техническая конференция

«Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008): сборник докладов, стр. 2027. Воронеж, 2008.

- [5] Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С. Сравнительный анализ методов синтеза апертуры в гидроакустике // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — ГА-2008. СПб.: Наука, 2008. С. 580–583.
- [6] Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С. Исследование эффективности программно-алгоритмических средств синтеза апертуры в пассивной гидролокации на тестовых и реальных сигналах // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 70–81.
- [7] Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С. Методы апертурного синтеза гидроакустических антенн в пассивном режиме и их испытание на тестовых и реальных сигналах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 9. С. 72–85.
- [8] Dashevskii O. Yu., Nejevenko E. S. Adaptive yaw compensation for towed array with synthetic aperture // 8th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies, PRIA-8-2007 (Russia, Yoshkar-Ola, October 8–12, 2007). Conference Proceedings, 2007, Vol. 1.
- [9] Dashevskii O. Yu., Nejevenko E. S. An Aperture Synthesis Software Model for Sonars and its Probation with Test and Real Signals // Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010). P. 110–116.

Подписано в печать 21.04.2011 г.  
Формат бумаги 60×84 1/16. Объем 1 печ. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 123

---

Отпечатано .....