

УДК 681.883.024

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ В ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ НА ТЕСТОВЫХ И РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛАХ

О. Ю. Дашевский, Е. С. Нежевенко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: olegdashevskii@gmail.com*

Создана программа SynApp для исследования алгоритмов обработки данных с антенн с синтезированной апертурой в пассивной гидролокации. Проведено сравнение различных алгоритмов синтеза и определен лучший из них по выбранным критериям. Исследование программы на сигналах, полученных с реальной антенны, показало эффективность процедуры синтеза с помощью алгоритма ЕТАМ. Доказано, что применение синтеза в пассивной гидролокации реально уменьшает апертуру антенны без потери качества пеленгации. Исследовано влияние изменения субапертуры антенны, используемой для синтеза, и размера синтезированной апертуры (число шагов синтеза) на качество пеленгации.

Ключевые слова: обработка гидроакустических сигналов, синтезирование апертуры, алгоритм ЕТАМ, моделирование, ГПБА (гибкие подводные буксируемые антенны).

Введение. В последнее время активно (хотя и с существенным опозданием относительно соответствующих радиолокационных систем [1]) разрабатываются гидролокационные системы пассивного синтеза апертуры. До недавнего времени единственным вариантом обеспечения высокого разрешения в гидроакустической пеленгации на больших расстояниях было использование гибких протяженных буксируемых антенн (ГПБА) [2]. Теоретически такое же разрешение могут обеспечить и короткие антенны, работающие в режиме синтеза апертуры (реализация специализированных аппаратов для этой цели описана в [3]); однако на практике возникает много проблем, некоторые из них могут быть решены путем использования программно-алгоритмических средств моделирования процесса синтеза апертуры. Этому вопросу и посвящена предлагаемая работа. Она является продолжением работы [4], в которой изложены теоретические аспекты процесса синтеза апертуры в режиме пеленгации и влияния на него внешних факторов, а также разработаны программные модули для исследования воздействия данных факторов на качество синтеза апертуры. Это дало возможность создать универсальную программную модель, позволяющую испытать разработанные алгоритмы синтеза апертуры для самых различных вариантов нестационарности как антенны, так и целей. Представлены результаты ее испытаний как на тестовых сигналах, генерируемых внутри модели, так и на реальных сигналах, полученных с широкополосной ГПБА, работающей в пассивном режиме.

1. Универсальная программная модель для синтеза апертуры.

1.1. *Исходные данные для разработки модели.* Система SynApp предназначена для исследования процесса синтеза апертуры в гидроакустической пеленгации. К настоящему времени разработано множество алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов с использованием синтеза апертуры [5–9], предъявляющих различные требования к характеру априорной информации. Возникает необходимость исследования и сопоставления этих алгоритмов в заданных условиях для выявления преимуществ и недостатков каждого. По мнению авторов, будущее пассивного синтеза искусственной апертуры

в гидроакустической пеленгации не в разработке новых алгоритмов, а в сочетании или комплексировании уже существующих и в подборе оптимальных параметров алгоритмов адаптивным методом.

Для проведения подобных исследований разработана базовая модельная система, в рамках которой все алгоритмы обработки с синтезированием апертуры можно анализировать с одних позиций. Система должна удовлетворять следующим требованиям:

- возможность расширения (добавление новых алгоритмов);
- удобный интерфейс пользователя (простое редактирование модели);
- возможность применения разных алгоритмов обработки к одним и тем же данным и сравнения результатов;
- максимальное быстродействие.

1.2. *Программа SynApp*. В основу программы SynApp, созданной в соответствии с приведенными выше требованиями, положена блочно-модульная структура с возможностью управления потоками информации между модулями.

В графе, отображающем информационный поток процесса обработки гидроакустической информации, отдельные узлы можно полагать независимыми, если входной поток каждого узла учитывает все изменения, внесенные во входной поток графа предшествующими преобразованиями. При этом входной поток узла может быть порожден выходным потоком другого узла, прочитан в готовом виде из файла или являться результатом работы аппаратного модуля.

Таким образом, структура системы может быть изображена в виде ориентированного графа, где узлам соответствуют модули системы, а ребрам — информационные связи между модулями (т. е. если в графе есть ребро $A \rightarrow B$, то выход модуля A поступает на вход модуля B).

Именно такой подход и реализован в программе SynApp. Пользователь создает и редактирует свой собственный граф, выбирая узлы из заданного множества типов и соединяя их необходимым образом. Каждый узел-модуль обладает параметрами, которые также можно редактировать. Готовый граф «запускается» на исполнение (выполняется эксперимент), при этом информация проходит по всем возможным путям и обрабатывается, а в конце открывается окно с результатами.

Вид главного окна программы SynApp показан на рис. 1. Модель состоит из пяти модулей: генератора, трех модулей синтеза апертуры и формирователя характеристики направленности (ФХН). Генератор (gen1) осуществляет генерацию гидроакустических данных согласно заданным параметрам (относящимся к антенной платформе, цели и океанской среде). Сгенерированные данные поступают на три модуля синтеза апертуры: etam1, реализующий алгоритм ЕТАМ [7]; metam1, реализующий алгоритм модифицированный ЕТАМ с временным усреднением [10]; и real1, осуществляющий обработку без синтеза. Результат работы каждого из трех модулей поступает на формирователь характеристики направленности (ХН) bartlett1.

На рисунке также приведены параметры модуля metam1: имя, индикатор включенности, количество реальных гидрофонов, размер перекрытия платформы, количество шагов синтеза и усредняемых временных отсчетов.

Программа SynApp позволяет в рамках одного эксперимента делать многократные запуски графа на исполнение, итерируя переменные (при этом изменяют свое значение выбранные параметры модулей) и набирая статистику. В частности, для модели, показанной на рисунке, проведено 60 запусков (по 20 раз на каждое значение уровня шума (0, 1, 2 дБ)).

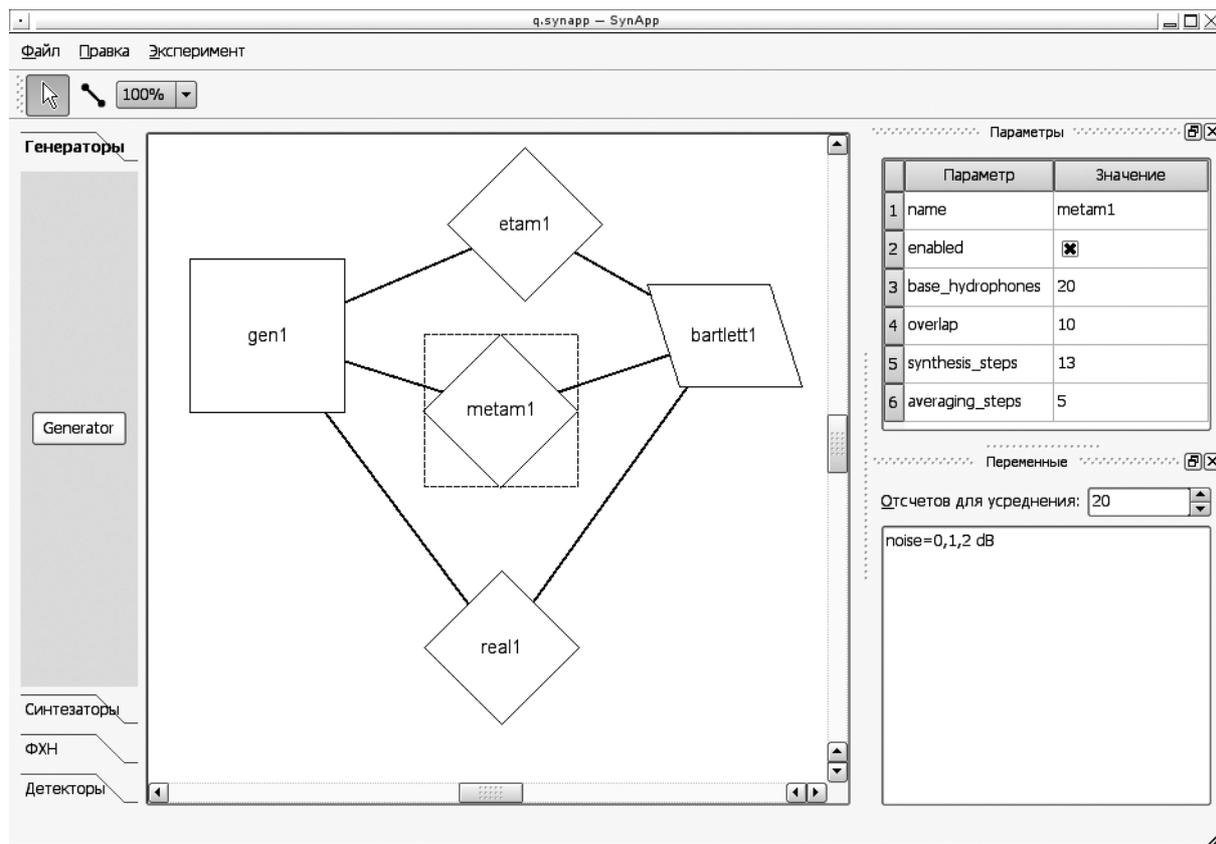


Рис. 1. Вид главного окна программы SynApp с изображением модели системы обработки данных

1.3. *Программный инструментарий.* Программа SynApp написана на языке Python [11] с использованием библиотеки графического интерфейса PyQt4 и библиотек численных расчетов NumPy и SciPy [12]. Для построения графиков использовалась библиотека matplotlib [13].

Система получилась открытой: добавление в нее нового модуля не требует переделки самой программы. Следует отметить, что выбранный для решения поставленной задачи инструментарий полностью себя оправдал. Благодаря тому что Python является интерпретируемым языком с динамической типизацией, разработка программы прошла гораздо быстрее, чем если бы она писалась на языке C++. Основную вычислительную сложность приняли на себя библиотеки NumPy и SciPy, по сути являющиеся интерфейсом к максимально эффективным математическим подпрограммам, написанным на языке Фортран. Профилирование работы программы подтвердило, что основная часть процессорного времени затрачивается на математические операции (в частности, перемножение матриц), а не на выполнение кода на языке Python.

2. Исследование методов синтезирования апертуры антенны в режиме обработки тестовых сигналов. Далее представлены результаты экспериментального исследования с использованием SynApp следующих алгоритмов обработки сигналов: без синтезирования апертуры с базой, равной базе с синтезированием; с синтезированием по алгоритму ETAM; с синтезированием по модифицированному алгоритму ETAM. Алгоритм ETAM [7] характеризуется тем, что при прохождении антенной дистанции, равной расстоянию между гидрофонами, фаза сигнала корректируется. Для этого вычисляется коэффициент корреляции между сигналами гидрофонов, находящимися в одном и том же месте

при смещении антенны на длину перекрытия, который и используется для коррекции фазы. Модификация алгоритма [10] (именуемая далее МЕТАМ) заключается в том, что коррекция происходит более 1 раза в течение времени перекрытия. Все эксперименты выполнены с учетом следующих параметров антенны: количество гидрофонов 20, расстояние между гидрофонами 1 м, скорость платформы с антенной 4,3 м/с, частота сэмпирования 1 кГц, число шагов синтеза 13, перекрытие 50 %, число виртуальных гидрофонов 140. Результаты формирования ХН усредняются по нескольким реализациям.

На рис. 2 приведены характеристики направленности, полученные с помощью трех указанных выше алгоритмов, для значений отношения сигнал/шум (ОСШ) $-5, 0, +5$ дБ при одной цели с частотой излучения 750 Гц и азимутом 45° . Хорошо видно, что если при низких значениях отношений сигнал/шум ХН для различных алгоритмов совпадают, то по мере увеличения шума они все больше расходятся. Практически цель опознается при ОСШ $+3$ дБ.

На рис. 3 представлены зависимости качества пика ХН, характеризующего цель и определяемого как отношение максимального значения амплитуды к полуширине пика в градусах на полувысоте, от ОСШ. При максимальном значении амплитуды $A = \text{ХН}(\alpha)$ для соответствующего угла α показатель качества определяется как

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

($\text{ХН}(l) = \text{ХН}(r) = 0,7A$). Естественно, наибольшее значение показателя качества, слабо изменяющееся с увеличением шума, демонстрирует алгоритм Real, однако для алгоритма МЕТАМ (соответствующая ему кривая 3 на рисунке обозначена koreanetam) критерий качества пика оказывается ниже, чем для алгоритма ЕТАМ, что противоречит результатам [10].

Выше исследовалось влияние на ХН амплитудного шума. Рассмотрим, как влияет на синтезированную ХН фазовый шум. Очевидно, что если фаза падающей волны изменяется для всех гидрофонов одинаково, то ХН для реальной апертуры изменяться не должна. Для синтезированной — иначе: складываются волны, пришедшие в разное время и, следовательно, с разными фазами, если фаза волны изменяется случайно во времени. На рис. 4 представлены ХН для одной цели при наличии фазового шума, сформированные описанными выше алгоритмами. На рис. 4, *a* видно, что фазовый шум практически не искажает ХН по сравнению с реальной апертурой. Происходит это потому, что в алгоритмах ЕТАМ и МЕТАМ фаза эффективно корректируется для каждого последующего этапа синтеза. Для подтверждения этого на рис. 4, *b* представлены ХН при отключенной коррекции фазы в алгоритмах синтеза. Видно, что в отсутствие коррекции смещается главный лепесток, а боковые увеличиваются в несколько раз. Таким образом, коррекция фазы в алгоритмах ЕТАМ и МЕТАМ приводит к устранению влияния флуктуации фазы во времени на ХН.

Было проведено множество экспериментов (в том числе и с несколькими целями), показавших, что при ОСШ порядка -5 дБ хорошие результаты по синтезированию апертуры можно получить с помощью алгоритма ЕТАМ. Алгоритм МЕТАМ, хотя и использует большее количество информации, не дает существенного преимущества по сравнению с ЕТАМ, в то же время требует для реализации гораздо больше времени.

3. Исследование методов синтезирования апертуры антенны в режиме обработки реальных сигналов. Основной проблемой верификации результатов моделирования является степень соответствия принятой модели реальному сигналу (или системе). Если результаты испытаний на некоторой представительной выборке и в модельных экспериментах с параметрами, близкими к реальным, существенно не отличаются, можно с большой вероятностью считать, что модель адекватна реальной ситуации, и использовать

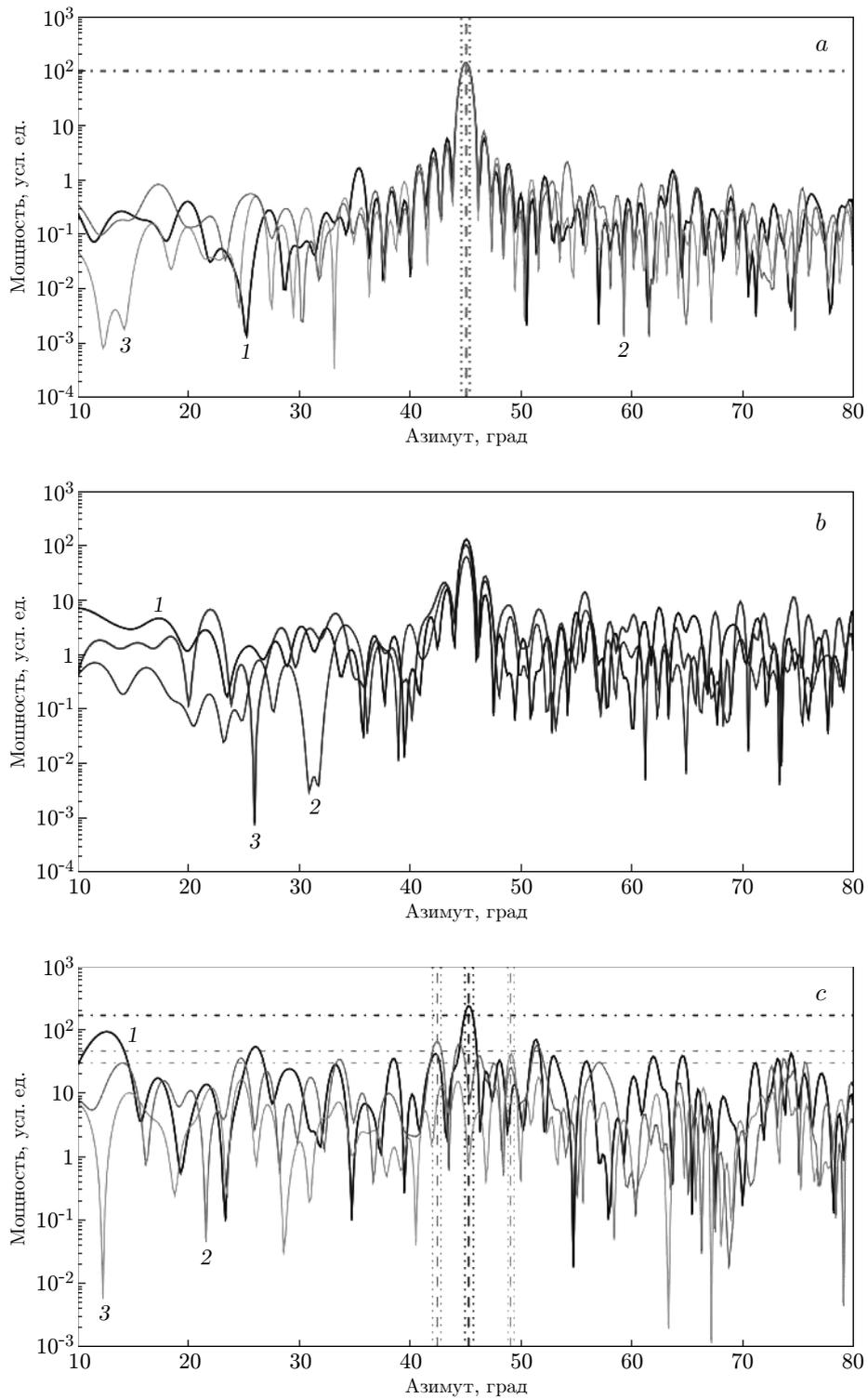


Рис. 2. Характеристики направленности для трех алгоритмов

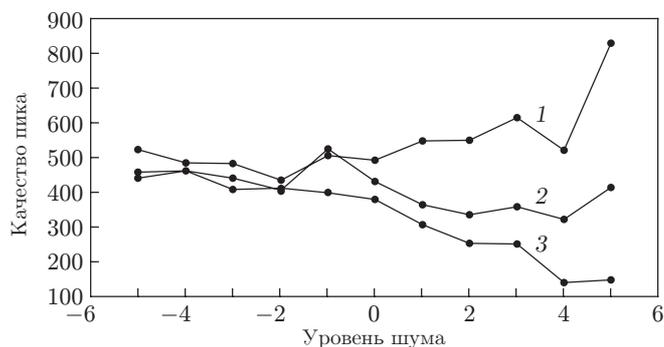


Рис. 3. Зависимости качества пика от уровня шума для трех алгоритмов и помехо-сигнальной обстановки, характеризуемой рис. 2: кривая 1 — Q_{real1} , 2 — Q_{etam1} , 3 — $Q_{koreanetam1}$

ее в различных режимах, что особенно важно для гидроакустических испытаний методов синтезирования апертуры, проведение которых является весьма дорогим. В данной работе приведены результаты синтезирования апертуры с использованием информации концерна «Океанприбор». Эта информация представляет собой временные сигналы 48 гидрофонов, расположенных на ГПБА с интервалом 1,92 м; частота квантования 937,5 Гц. Испытания

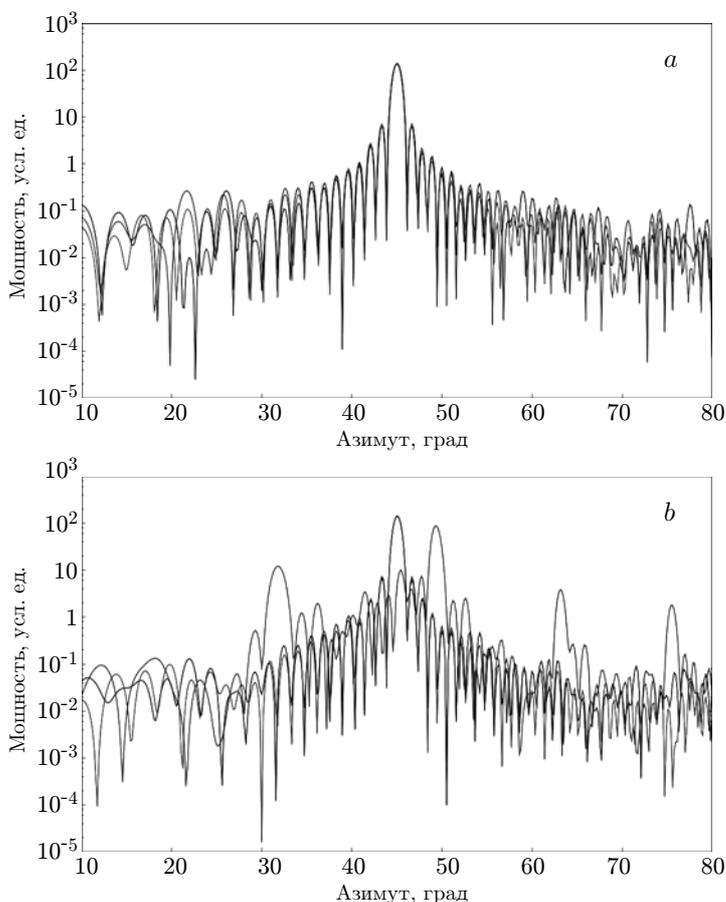


Рис. 4. Характеристики направленности для алгоритма ЕТАМ: коррекция фазы включена (a) и выключена (b)

проводились в Баренцевом море в 2008 году, скорость буксировки антенны составляла 6 узлов. Сигналы гидрофонов записывались в течение 38 мин. К полученным данным прилагалась навигационная информация (скорость и курс буксировщика), а также информация о приблизительном пространственном положении (азимуте) каждой из целей во время записи.

Схема исследования модели с реальными сигналами следующая. Сначала формировалась ХН для всей антенны (48 гидрофонов) и выявлялись периоды времени, в которых присутствовали цели. Затем сигналы от 24 гидрофонов отбрасывались и ХН формировалась с использованием оставшихся гидрофонов и 24 виртуальных гидрофонов, синтезированных на основе сигналов оставшихся 24 гидрофонов, переместившихся на место отброшенных. Синтез проводился с помощью алгоритма ЕТАМ с коррекцией фазы в программе SynApp, описанной в разд. 1, при использовании реальных сигналов. Поскольку алгоритм ЕТАМ обрабатывает только монохроматические сигналы, 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.

В процессе обработки предоставленных данных возник ряд связанных принципиальных вопросов формирования исходных условий и предобработки.

Во-первых, необходимо выбрать «точку отсчета», т. е. собрать достоверную информацию о целях, присутствующих в районе, и на ее основе провести сопоставление результатов, полученных с помощью синтезированной и физической апертур.

За точку отсчета взяты результаты обработки данных с помощью традиционных алгоритмов: сначала данные подвергались частотному анализу (БПФ по 512 точкам), а затем по каждой частоте формировалась ХН. В результате был получен пространственно-частотный спектр, который соответствовал имевшейся априорной информации о целях. Спектр показан на рис. 5 с помощью карты интенсивности цвета, где уровень интенсивности соответствует абсолютному значению мощности сигнала для заданной частоты и пеленга.

Алгоритм ЕТАМ проверялся на цели № 1 с азимутом $\sim 30^\circ$, имеющей почти монохроматический частотный портрет (~ 252 Гц).

Во-вторых, требуется обеспечить алгоритм ЕТАМ узкополосным сигналом. Алгоритм осуществляет совмещенную пространственно-временную обработку сигналов, сопоставляя отсчеты с определенными номерами (дающими необходимое перекрытие). Ключевая проблема здесь заключается в том, что соотношение неопределенности ограничивает точность одновременного позиционирования в частотной и пространственной областях.

Для получения узкополосного сигнала была применена цифровая фильтрация. Сначала путем демодуляции спектр сигнала был перенесен в начало координат частотной сетки:

$$x_n^{(f_0)}(i\Delta t) = x_n(i\Delta t) \exp(j2\pi f_0 i\Delta t),$$

где $x_n(i\Delta t)$ — исходный сигнал n -го гидрофона; f_0 — центр полосы; i — номер отсчета; Δt — интервал квантования.

Затем сигнал $x_n^{(f_0)}(i\Delta t)$ пропусклся через цифровой фильтр нижних частот, ослабляющий компоненты, находящиеся за пределами интересующей полосы.

В качестве полосовых были опробованы фильтры с бесконечной и конечной импульсными характеристиками [14]. Для цели № 1 лучше всего проявил себя фильтр с бесконечной импульсной характеристикой Баттеруорта 5-го порядка с частотой среза 2 Гц. Как известно, фильтры с бесконечной импульсной характеристикой вносят в сигнал фазовые искажения, что не могло не повлиять на качество синтеза, так как суть алгоритма ЕТАМ

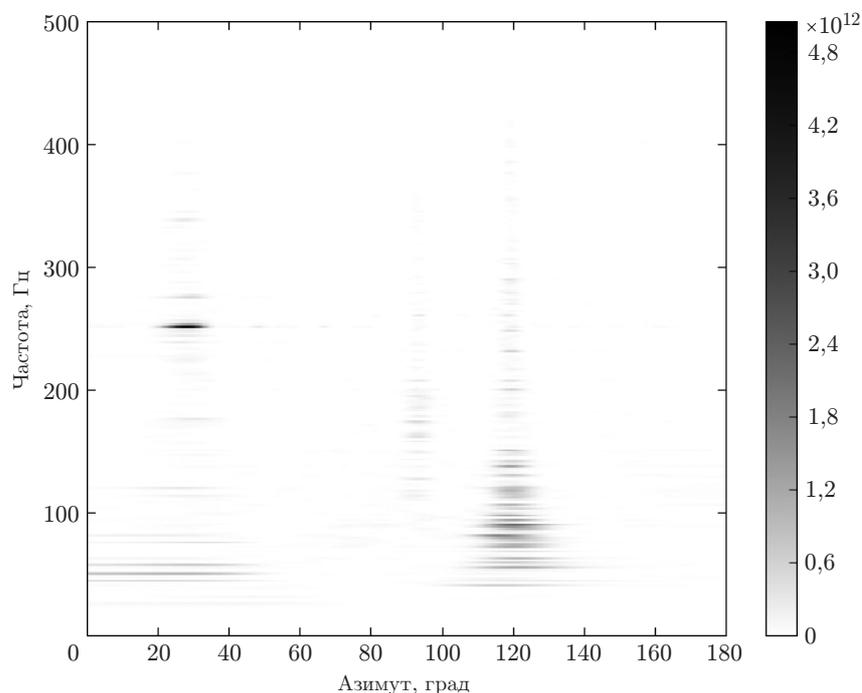


Рис. 5. Пространственно-частотный спектр сигналов

заключается в компенсации фазовых сдвигов. Однако если фильтр применить последовательно 2 раза, причем 2-й раз в обратном направлении (когда как бы изменяется знак времени), то фазовые искажения будут скомпенсированы. Такая двукратная фильтрация и применялась в дальнейшем для синтеза.

Результаты синтезирования апертуры приведены на рис. 6, а. Данные были демодулированы с частоты 252,69 Гц, а затем обработаны фильтром нижних частот Баттерворта. Точечная кривая (3) отображает референтную ХН полной реальной апертуры из 48 гидрофонов. Пунктирной кривой (1) обозначена ХН 24 гидрофонов (т. е. половины антенны). Сплошная кривая (2) отражает результаты обработки данных с 24 гидрофонов с помощью синтезирования апертуры. Использовалось 50 %-ное перекрытие антенны [9], сделано 2 шага синтеза, в результате была получена апертура из 48 гидрофонов (24 реальных + $2 \cdot (50 \% \cdot 24)$ виртуальных = 48). Все результаты нормированы на максимум, соответствующий цели № 1 по азимуту около 30° .

Как и следовало ожидать, качество пика ХН половины реальной апертуры значительно ниже того, которое демонстрирует виртуальная апертура, сформированная в результате синтеза: пик, характеризующий цель, существенно расширяется, образуя подобие бокового лепестка; координата максимума пика смещается (ср. кривые 1 и 2) — все это, естественно, приведет к ошибке определения пеленга цели. Синтезирование искусственной апертуры позволяет практически полностью исключить отмеченные искажения (ср. кривые 1 и 3). Координата максимума пика не смещается (сдвиг менее погрешности вычислений), расширение весьма незначительно (полуширина пика на полувывоте для кривой 3 составляет $5,41^\circ$; для кривой 1 — $4,29^\circ$), причем это расширение, видимо, связано с тем, что не учитывалась скорость цели. За счет увеличения боковых лепестков несколько снизилось значение отношения сигнал/шум (отношение амплитуды пика к среднему значению мощности вдоль всей кривой): для реальной апертуры из 48 гидрофонов (кривая 3) ОСШ = 15,6, для синтезированной апертуры (кривая 2) ОСШ = 11,6.

На рис. 6, б показаны результаты синтеза апертуры при дальнейшем уменьшении

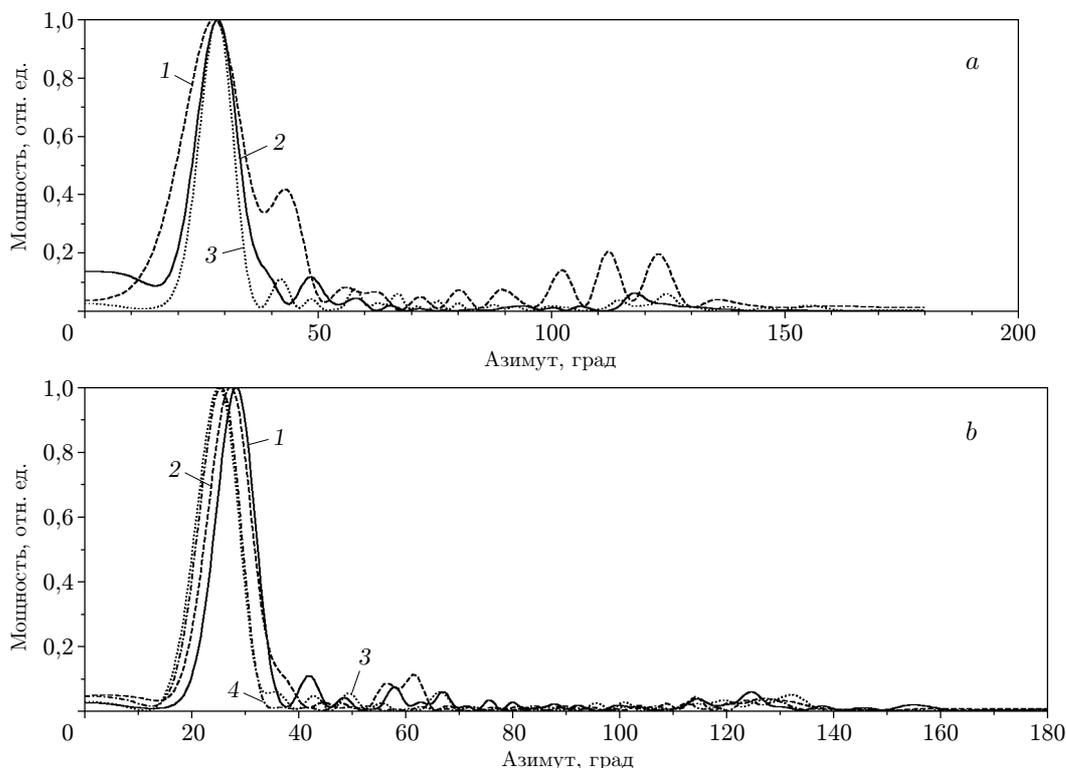


Рис. 6. Синтез апертур: из 24 гидрофонов (а) и малых субапертур (б)

размеров субапертур в сравнении с ХН реальной апертуры (кривая 1). Кривая 2 — субапертура 16, шагов синтеза 4 (синтезированная апертура $48 = 16 + 4 \cdot 8$); 3 — субапертура 12, шагов синтеза 6 ($48 = 12 + 6 \cdot 6$); 4 — субапертура 8, шагов синтеза 10 ($48 = 8 + 4 \cdot 10$).

Параметры пеленгации (см. рис. 6, б) представлены в табл. 1. Смещение пика определялось как разность координат максимумов ХН для реальной и синтезированной апертур. Из таблицы видно, что при уменьшении размера субапертуры, используемой для синтеза, полуширина пика и соотношение сигнал/шум изменяются слабо. Однако возникает и

Таблица 1

Апертура	Параметры пеленгации		
	Смещение пика, град	Полуширина пика на полувысоте, град	Отношение сигнал/шум
Реальная (кривая 1)	0	4,29	15,6
Синтезированная $48 = 24 + 2 \cdot 12$ (кривая 2, рис. 6, а)	0	5,41	11,6
Синтезированная $48 = 16 + 4 \cdot 8$ (кривая 2)	-1,35	4,74	13,6
Синтезированная $48 = 12 + 6 \cdot 6$ (кривая 3)	-3,16	4,51	15,5
Синтезированная $48 = 8 + 10 \cdot 4$ (кривая 4)	-3,16	4,51	16,9

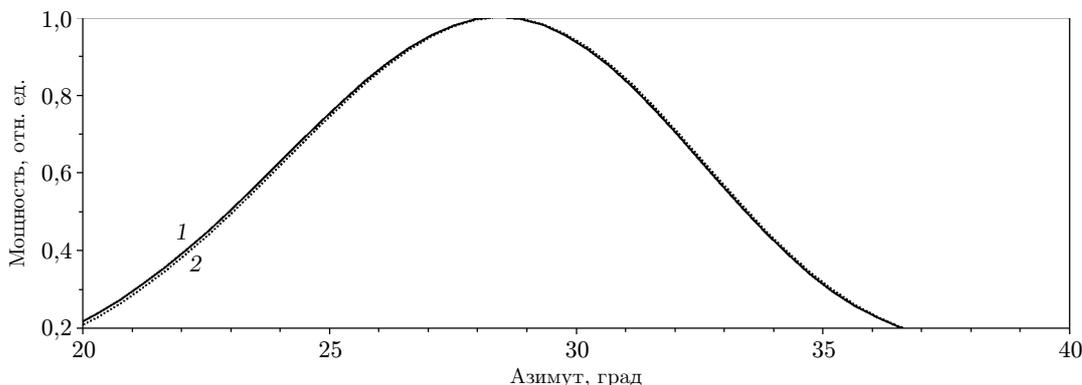


Рис. 7. Результаты алгоритма ЕТАМ с временным усреднением

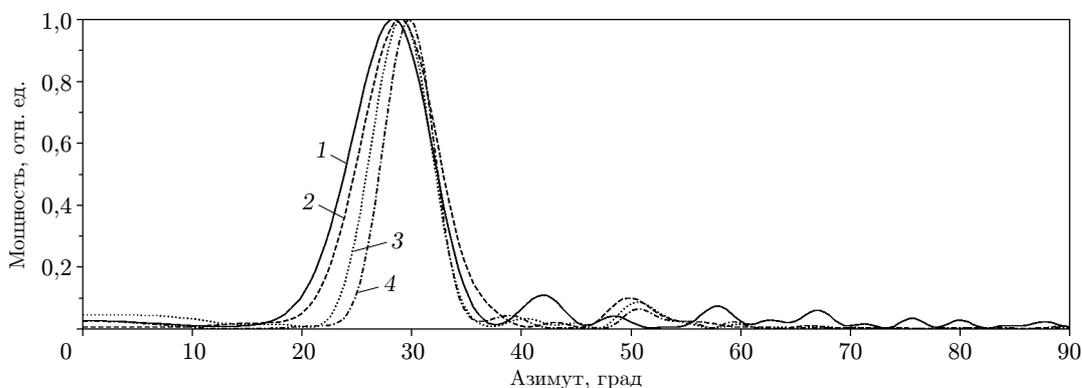


Рис. 8. Синтез больших виртуальных апертур

увеличивается сдвиг по азимуту, что может быть связано с движением цели в процессе синтеза.

В данной работе также рассматривалась эффективность усовершенствованного алгоритма ЕТАМ с временным усреднением [10]. На рис. 7 показан результат такого усреднения (кривая 1) в сравнении с результатом без усреднения (кривая 2, соответствует кривой 3 на рис. 6, а). Видно, что преимущество незначительно (в действительности полуширина пика уменьшилась с $5,41^\circ$ до $5,19^\circ$). Возможно, это объясняется тем, что экспериментальные данные были получены в стационарных условиях перемещения буксируемой решетки, где преимущества алгоритма МЕТАМ не могли проявиться.

Таблица 2

Апертура	Параметры пеленгации		
	Смещение пика, град	Полуширина пика на полувьсоте, град	Отношение сигнал/шум
Реальная (кривая 1)	0	4,29	15,6
Синтезированная $60 = 24 + 12 \cdot 3$ (кривая 2)	-0,42	4,06	18,1
Синтезированная $72 = 24 + 12 \cdot 4$ (кривая 3)	-0,90	3,16	22,5
Синтезированная $84 = 24 + 12 \cdot 5$ (кривая 4)	-1,35	2,71	27,6

Представляют интерес изменения параметров пеленгации при расширении апертуры за пределы реальной. Рис. 8 отражает результаты синтеза апертуры из субапертуры 24 при увеличении количества шагов синтеза и соответствующем росте длины искусственной апертуры. Результаты этого эксперимента представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что увеличение количества шагов приводит к сужению пика и к увеличению ОСШ, однако при этом восстанавливается сдвиг по азимуту.

Заключение. Программа SynApp, созданная для исследования алгоритмов обработки данных с пассивных антенн с использованием синтеза искусственной апертуры в режиме пеленгации, предоставляет пользователю удобный интерфейс для задания и редактирования модельной системы, а также удобные возможности для оценки эффективности работы алгоритмов в различных условиях. Программная система является универсальной и может быть использована для моделирования любого участка системы обработки гидроакустических данных (при разработке соответствующих модулей). Исследование программы на тестовых сигналах позволило выбрать лучший из нескольких известных алгоритмов синтеза апертуры (им оказался алгоритм ЕТАМ) в пассивной гидролокации при ОСШ = -5 дБ.

Использование программы SynApp для обработки реальных широкополосных сигналов подтвердило эффективность процедуры синтеза апертуры при пассивной гидролокации с помощью алгоритма ЕТАМ и показало, что синтезирование апертуры при уменьшении антенны в 2 раза позволяет получить практически те же результаты по пеленгации цели, что и с целой антенной, т. е. уменьшить аппаратную часть за счет наращивания объема вычислений. Также показано, что параметры пеленгации целей (ширина пика, ОСШ) могут быть улучшены путем увеличения синтезированной апертуры, однако при этом для исключения смещения пика требуются дополнительные исследования (связанные с учетом движения цели). Необходимо отметить, что реальные данные были получены с ГПБА, форма которой в процессе буксировки не идентифицировалась. При небольшой субапертуре антенны, используемой для синтеза, вполне реально разместить ее на жестком буксируемом аппарате, снабженном навигационным оборудованием, что позволит повысить качество синтеза и соответственно улучшить параметры пеленгации целей антеннами с синтезированной апертурой по сравнению с ГПБА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Буренин Н. И.** Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: Сов. радио, 1972. 160 с.
2. **Lemon S. G.** Towed-array history, 1917–2003 // IEEE Journ. Oceanic Eng. 2004. **29**, N 2. P. 365–373.
3. **D'Spain G. L., Terrill E., Chadwell C. D. et al.** Active control of passive acoustic fields: Passive synthetic aperture/Doppler beamforming with data from an autonomous vehicle // Journ. Acoust. Soc. Amer. 2006. **120**, N 6. P. 3635–3654.
4. **Дашевский О. Ю., Нежевенко Е. С.** Исследование влияния мешающих факторов на качество синтеза апертуры в гидролокации // Автометрия. 2008. **44**, № 2. С. 76–90.
5. **Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В.** Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. С.-Пб.: Наука, 2004. С. 54–66.
6. **Yen N.-C., Carey W.** Application of synthetic-aperture processing to towed-array data // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1989. **86**, N 2. P. 754–765.
7. **Stergiopoulos S., Sullivan E. J.** Extended towed array processing by an overlap correlator // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1989. **86**, N 1. P. 158–171.

8. **Stergiopoulos S.** Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1990. **87**, N 5. P. 2128–2140.
9. **Stergiopoulos S., Urban H.** A new passive synthetic aperture technique for towed arrays // IEEE Journ. Oceanic Eng. 1992. **17**, N 1. P. 16–25.
10. **Kim S., Youn D. H., Lee C.** Temporal domain processing for a synthetic aperture array // IEEE Journ. Oceanic Eng. 2002. **27**, N 2. P. 322–327.
11. **Язык** программирования Python // <http://www.python.ru>
12. **http://** www.riverbankcomputing.co.uk/pyqt
13. **http://** matplotlib.sourceforge.net
14. **Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и практика цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. С. 315–319.

Поступила в редакцию 24 июля 2009 г.
