



## СОДЕРЖАНИЕ

### Статьи

<i>Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г.</i> Безотражательное распространение волн в сильно неоднородных средах .....	4
<i>Чаликов Д.В.</i> Трансформация гармонических волн на глубокой воде .....	14
<i>Волков К.Н., Емельянов В.Н., Курова И.В.</i> Моделирование крупных вихрей в задачах гидрофизики и гидроакустики .....	22
<i>Карлин Л.Н., Рябченко В.А., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А.</i> Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря .....	39
<i>Никифоров С.Л., Попов В.А., Попов О.Е., Селезнев И.А.</i> Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования .....	49
<i>Долин Л.С.</i> Лидарный метод измерения частотно-контрастной характеристики водных слоев .....	62
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С.</i> Методы апертурного синтеза гидроакустических антенн в пассивном режиме и их испытание на тестовых и реальных сигналах .....	72

### Конференции

XXII семинар «Струйные, отрывные и нестационарные течения» ( <i>Матвеев С.К., Усков В.Н.</i> )	86
--	----

### Из истории науки

Г.И. Марчук о физике атмосферы и океана .....	87
---	----

<b>Поздравляем!</b> .....	91
---------------------------	----

<b>Хроника</b> .....	94
----------------------	----

Правила представления материалов в редакцию.....	97
--	----

# CONTENTS

## Articles

<i>Pelinovsky E.N., Talipova T.G. Non-reflective Wave Propagation in Strongly Inhomogeneous Media</i> .....	4
---	---

It is well known that wave dispersion in inhomogeneous media leads to energy flux weakening on large distances. The more interesting cases are when inhomogeneity does not prevent wave propagation. This problem is studied here for internal waves in the ocean. Firstly, the penetration of internal waves into a deep ocean, stratified with density and current, is discussed, and it is shown that there is sufficient number of stratification profiles allowing non-reflected wave propagation into the ocean bulk. Further the internal wave propagation in two-layer stratified ocean of variable depth is investigated. The set of bottom profiles where the wave energy is not scattered, is also found.

**Key words:** non-reflected wave propagation, internal waves, non-reflected stratification and bottom profile.

<i>Chalikov D.V. Harmonic Wave Deep Water Transformation</i> .....	14
--	----

Precise numerical model of potential; surface waves is used to investigate the wave field evolution, initially assigned as a train of harmonic waves. It is shown that harmonic wave of any amplitude quickly generates the new modes, which undergo the complicated evolution. These modes can be referred neither to bound waves nor to free waves.

**Key words:** harmonic waves, instability, numerical modelling, Stokes waves.

<i>Volkov K., Emelyanov V., Kurova I. Large-eddy Simulation in Hydrophysical and Hydroacoustic Problems</i> .....	22
---	----

Applications of large-eddy simulation (LES) technique to the solution of problems of hydrophysics and hydroacoustics are considered. Solutions of some model problems (free mixing layer, free sub-sonic non-isothermal turbulent jet flowing out of circular nozzle into submerged space, and aero-optical effects in turbulent flows) are presented. The results obtained are compared to the data calculated with the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations and equations of the  $k$ – $\epsilon$  turbulence model, as well as to the available experimental data. The conclusions related to the perspectives of use of this technique in the problems of hydrophysics and hydroacoustics are made.

**Key words:** turbulence, large-eddy simulation, computational fluid dynamics, jet, mixing layer.

<i>Karlin L.N., Ryabchenko V.A., Vankevich R.E., Eremina T.R., Isaev A.V., Neelov I.A.</i> Testing an Operational Oceanographic System Testing by Means of Forecasting of Hydrodynamical Characteristics in the Gulf of Finland of the Baltic Sea .....	39
--	----

An operational system for forecasting of hydrodynamic characteristics in the Gulf of Finland GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System) has been developed. The system is based on the hydrodynamic module of St. Petersburg Baltic Eutrophication Model. The system has been working in the operation mode from May 2009 using data from short-term weather forecasts for the North-West Region of Russia and forecasts of boundary conditions at the entrance in the Gulf of Finland. 48-hour model forecasts were compared to observed vertical temperature and salinity profiles and water level in Kronshtadt. The comparison showed that the model system simulates the observations quite well.

**Key words:** operational oceanography, hydrodynamic forecast, the Gulf of Finland.

<i>Nikiforov S.L., Popov V.A., Popov O.E., Seleznev I.A.</i> The Concept of Common Sea-Bottom Geoacoustic Database Creation and Geoacoustic Modeling Techniques .....	49
---	----

The authors consider some problems of supporting Russia sea activity in the important water areas of the World ocean, which cause creation of geoacoustic databases and the geoacoustic models of a sea-bottom required for all carriers of sonar means of underwater conditions imaging for operative forecasting of surveillance conditions in the navigation area and supporting efficient operation of adaptive hydroacoustic information processing algorithms. The concept of common water areas sea-bottom database creation and sea bottom geoacoustic modeling techniques are offered. Data about structure of a perspective integrated sonar system of sea-bottom monitoring and problems solved with its help are cited.

**Key words:** geoacoustic model, database, sonar means, acoustic characteristics, offshore area.

<i>Dolin L.S.</i> Lidar Methods for Measurement of Modulation Transfer Function of Water Layers .....	62
--	----

We develop algorithms for retrieval of the water layer modulation transfer function (MTF) from the radiance of backscattered laser pulse. A lidar diagram is developed for remote measuring of the MTF. The water optical properties are then retrieved from measured MTF. We also propose a laser imaging system for sea bottom observation which corrects image distortion caused by light scattering in the water.

**Key words:** lidar, imaging, water, modulation transfer function, image correction.

<i>Dashevskii O.Yu., Nejevenko E.S.</i> Passive Aperture Synthesis Techniques for Towed Arrays and Their Probation with Test and Real Signals .....	72
--	----

The paper contains a brief review of aperture synthesis techniques for towed arrays operating in passive mode. A technique is suggested that is able to process wideband signals, also from multiple sources (as opposed to known techniques). The results of experimental studies of aperture synthesis are presented, obtained both from computer-generated signals (SynApp program has been developed for this purpose), and from signals of a real underwater towed array.

**Key words:** hydroacoustics, aperture synthesis, beamforming, modeling.

УДК 681.883.024

© О.Ю. Дашевский, Е.С. Нежевенко

Институт автоматки и электротметрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск  
olegdashevskii@gmail.com

## МЕТОДЫ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ И ИХ ИСПЫТАНИЕ НА ТЕСТОВЫХ И РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛАХ

Дан краткий обзор методов апертурного синтеза в гидроакустике, предложен и теоретически обоснован метод, обеспечивающий, в отличие от известных, обработку широкополосных сигналов, в том числе от нескольких источников. В программе SynApp, разработанной специально для моделирования различных алгоритмов синтеза, сравниваются известные и предложенный методы. Приведены результаты экспериментального исследования процесса синтеза апертуры с использованием сигналов, сгенерированных в программе SynApp, а также сигналов, полученных с реальной гибкой протяженной буксируемой антенны.

Ключевые слова: гидроакустика, апертурный синтез, формирование характеристики направленности, моделирование.

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 сравнительно недавно. В то же время известно, что синтезирование апертуры стало основным методом получения высокоразрешающих изображений подстилающей поверхности при съемке с летательных аппаратов [1]. Это вполне естественно, поскольку альтернативы этому варианту не было: обеспечить другим способом требуемой для получения высокого разрешения большой базой в случае летательного аппарата не было никакой возможности. В гидролокации сложилась иная ситуация. Конечно, здесь сыграли и существенное различие в скорости распространения акустического сигнала в воде и радиолокационного в воздухе, и сравнительно низкая скорость перемещения антенны, но имело место, вероятно, и следующее соображение: обеспечению высокого разрешения на дальних расстояниях с помощью синтезированной апертуры в гидроакустике имела мощная альтернатива в виде гибких протяженных буксируемых антенн (ГПБА) [2]. Именно в эту область были направлены основные силы исследователей и разработчиков. Сказалось здесь и то, что для эффективного синтеза апертуры требуются мощные вычислительные ресурсы, так что синтез в реальном времени стал возможным лишь в последнее время. Все это привело к тому, что несмотря на выгоды, которые может принести синтез апертуры в гидроакустике, эта тематика развивалась достаточно вяло, в основном, в теоретическом плане. А выгоды эти очевидны. Прежде всего, ГПБА очень трудно (а скорее невозможно) разместить на мобильных плавсредствах (гидросамолетах, быстроходных катерах и т.д.), а иногда быстрая доставка антенны в район обследования очень важна. Существует проблема увеличения длины ГПБА при буксировке подводными лодками. И, наконец, если те же самые результаты

по разрешению можно получить при существенно более короткой антенне, только за счет обработки данных, то зачем применять длинные ГПБА?

Настоящая статья является продолжением работы [3], в которой были изложены теоретические аспекты процесса синтеза апертуры и влияния на него внешних факторов, а также разработаны программные модули, что позволило перейти к созданию универсальной программной модели, позволяющей испытать различные алгоритмы синтеза апертуры для самых разных вариантов нестационарности как антенны, так и целей.

### Универсальная программная модель для синтезирования апертуры

К настоящему времени разработано множество алгоритмов формирования характеристики направленности (ФХН) антенн с использованием синтеза апертуры [4-8], предъявляющих различные требования к характеру априорной информации. Возникла необходимость осуществить широкомасштабное исследование этих алгоритмов, чтобы сопоставить их поведение в заданных условиях и выявить сильные и слабые стороны каждого. Для этого разработана система SynApp, позволяющая различные алгоритмы обработки с синтезированием апертуры исследовать с одних и тех же позиций [12]. Модель позволяет генерировать множество источников колебаний с различными частотами, пеленгами и дистанциями, моделировать движение источников и антенны с различными векторами скорости, одновременно использовать различные алгоритмы синтезирования, осуществлять различные алгоритмы ФХН. Существенно то, что система открытая: например, сигналы, сгенерированные в модели, можно заменить реальными сигналами, при этом блоки, не касающиеся генерирования сигналов, не претерпят изменений.

### Синтезирование апертуры антенны при монохроматическом сигнале (ЕТАМ)

Ранее было показано [4], что из известных методов синтезирования апертуры наиболее эффективен метод, разработанный американскими учеными в 1992 г. и названный ЕТАМ (Extended Towed Array Measurements) [6]. Предлагаемый нами метод является одной из модификаций метода ЕТАМ, поэтому сначала приведем нашу интерпретацию последнего, позволяющую перейти к методу, предложенному нами.

Рассмотрим линейную эквидистантную антенную решетку из  $N$  гидрофонов, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга. Решетка движется вдоль своей оси со скоростью  $v$ . Обозначим за  $D_n(t)$  данные  $n$ -го гидрофона в момент времени  $t$ . Система сбора данных имеет частоту квантования  $f_s$ , т.е. данные гидрофонов доступны в моменты времени  $t = k\Delta t$ ,  $k \geq 0$ , где  $\Delta t = 1/f_s$ . Дополнительно обозначим  $D_{k,n} = D_n(k\Delta t)$ .

Пусть помехосигнальная обстановка состоит из одного источника сигнала с зависимостью амплитуды от времени  $s_0(t)$ , для монохроматического источника с частотой  $\omega$ , например,  $s_0(t) = A_0 e^{-i\omega t}$ . В точке  $\mathbf{r}$  пространства будет наблюдаться сигнал:

$$x(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s, t) = W(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) \cdot s_0(t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|/c), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_s$  – положение источника;  $c$  – скорость звука в воде.

В момент времени  $\tau = Md/v$  решетка расположится в пространстве так, что ее первые  $Q = N - M$  гидрофонов по положению совпадут с последними  $Q$  гидрофонами в момент времени  $t = 0$  (величина  $Q$  отражает размер перекрытия решетки). В системе координат с осью  $Ox$ , совпадающей с осью решетки и направленной в сторону ее движения, положение  $n$ -го гидрофона в момент времени  $t$  равно:

$$\mathbf{r}_n(t) = [vt + (n-1)d, 0, 0].$$

Таким образом,

$$\mathbf{r}_{n+M}(t) = \mathbf{r}_n(t_1) \quad \text{для} \quad 1 \leq n \leq Q, \quad \text{где} \quad t_1 = t + \tau. \quad (2)$$

Используя (1) и (2), запишем:

$$x(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t), t) = W(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t)) \cdot s_0(t - |\mathbf{r}_s(t) - \mathbf{r}_{n+M}(t)|/c), \quad (3)$$

$$x(\mathbf{r}_n(t_1), \mathbf{r}_s(t_1), t_1) = W(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t_1)) \cdot s_0(t_1 - |\mathbf{r}_s(t_1) - \mathbf{r}_{n+M}(t)|/c). \quad (4)$$

Для квантованных значений времени:

$$D_{k,n+M} = W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k\Delta t)) \cdot s_0(k\Delta t - |\mathbf{r}_s(k\Delta t) - \mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t)|/c), \quad (5)$$

$$D_{k_1,n} = W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k_1\Delta t)) \cdot s_0(k_1\Delta t - |\mathbf{r}_s(k_1\Delta t) - \mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t)|/c), \quad \text{где} \quad k_1 = k + [\tau / \Delta t]. \quad (6)$$

Если цель находится достаточно далеко и движется медленно, можно предположить, что:

$$\mathbf{r}_s(k_1\Delta t) \approx \mathbf{r}_s(k\Delta t). \quad (7)$$

Делая такое допущение, получаем, что правые части (5) и (6) содержат одинаковую пространственную информацию  $W(\cdot, \cdot)$  и отличаются лишь сдвигом по времени:

$$s(k\Delta t) \neq s(k_1\Delta t); \quad s(t) = s_0(t - |\mathbf{r}_s(t) - \mathbf{r}_{n+M}(t)|/c). \quad (8)$$

Кроме прочего, это означает, что данные гидрофонов  $(Q+1) \dots N$  в момент времени  $t_1$  (отсчет  $k_1$ ) содержат ту же пространственную информацию, что и данные *несуществующих* гидрофонов с номерами  $(N+1), \dots, (N+M)$  в момент времени  $t$  (отсчет  $k$ ), и, следовательно, могут быть использованы для расширения апертуры исходной решетки. Однако если вектор показаний гидрофонов  $\mathbf{D}_k = [D_{k,1}, \dots, D_{k,N}]$  просто дополнить значениями  $D_{k_1,Q+1}, \dots, D_{k_1,N}$ , то выигрыша такая расширенная апертура может не дать из-за несовпадения исходных сигналов  $s(t)$  и  $s(t_1)$  по времени. Необходимо найти способ компенсации временного сдвига. Оригинальный алгоритм ЕТАМ использует для этой цели фазовый корректирующий множитель. Для монохроматического сигнала с частотой  $\omega$  сдвиг по времени на  $\tau$  соответствует фазовому сдвигу на  $\omega\tau$ , т.е. умножению комплекснозначного сигнала на  $e^{-i\omega\tau}$ . С другой стороны, фазовый сдвиг при физическом перекрытии антенной решетки может быть подсчитан на основе показаний гидрофонов. Вычисляя:

$$\tilde{\Psi}_n = \arg [D_{k,n+M}^* \cdot D_{k_1,n}], \quad (9)$$

получаем приближение фазового сдвига  $\omega\tau$ , построенное на основе данных пары гидрофонов. Наличие в перекрытии  $Q$  пар позволяет вычислить среднее  $\tilde{\Psi} = \frac{1}{Q} \sum_{n=1}^Q \Psi_n$ , дающее более устойчивое приближение. Расширенный вектор показаний гидрофонов равен:

$$\mathbf{D}'_k = [D_{k,1}, \dots, D_{k,N}, (e^{-i\Psi} D_{k_1,Q+1}), \dots, (e^{-i\Psi} D_{k_1,N})]. \quad (10)$$

Уравнение (10) имеет размер  $N+M$  и содержит в себе показания  $N$  реальных гидрофонов и  $M$  виртуальных (синтезированных).

Процесс синтеза может быть продолжен. Так, сопоставляя данные в моменты времени  $t + \tau$  и  $t + 2\tau$ , синтезируем  $M$  показаний гидрофонов, относящихся к моменту  $t + \tau$ . Применяя к ним уже вычисленный фазовый сдвиг (между  $t$  и  $t + \tau$ ), получаем еще  $M$  значений, которые могут дополнить вектор  $\mathbf{D}'_k$ , приводя к вектору  $\mathbf{D}''_k$  размером  $N+2M$ . Количество последовательных шагов синтеза  $L$  ограничено лишь временным диапазоном, в котором сохраняется временная и пространственная когерентность. В итоге получается апертура из  $N$  реальных и  $M$  виртуальных гидрофонов общей длиной  $(N+LM-1)d$ .

Кроме алгоритма ЕТАМ, нами также была исследована его версия с дополнительным временным усреднением МЕТАМ (Modified ЕТАМ) [7], которая заключается в том, что коррекция происходит не один раз в течение времени перекрытия, а в несколько раз чаще. Как и ЕТАМ, она работает только для монохроматического сигнала.

### Синтезирование апертуры антенны при широкополосном сигнале (ТЕТАМ)

Наша модификация описанного алгоритма заключается в том, что вместо фазового сдвига в частотной области мы вводим сдвиг по времени во временной. Модификация получила название ТЕТАМ (Time-domain ЕТАМ). Пусть функция  $s(t)$  является периодичной с периодом  $T$ . Если это условие не выполняется, его всегда можно обеспечить, пропустив сигнал через гребенчатый фильтр. Тогда, если  $\tau \gg T$ , можно подобрать такое  $\delta t$ , что:

$$s(t) = s(t + \tau + \delta t) \quad |\delta t| < T. \quad (11)$$

Для дискретных отсчетов:

$$s(k\Delta t) \approx s([k_1 + \delta k]\Delta t). \quad (12)$$

Перепишем (5) и (6), подставляя (8) и (12):

$$D_{k,n+M} \approx W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k\Delta t)) \cdot s([k_1 + \delta k]\Delta t); \quad (13)$$

$$D_{k_1,n} = W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k_1\Delta t)) \cdot s(k_1\Delta t),$$

$$D_{k_1+\delta k,n} = W(\mathbf{r}_{n+M}([k + \delta k]\Delta t), \mathbf{r}_s([k_1 + \delta k]\Delta t)) \cdot s([k_1 + \delta k]\Delta t). \quad (14)$$

Сопоставляя (13) и (14), видим, что если  $|\delta k|$  достаточно мало, платформа за время  $\delta k\Delta t$  смещается мало:

$$v \cdot \delta k \cdot \Delta t \ll |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|, \text{ то есть } \mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t) \approx \mathbf{r}_{n+M}([k + \delta k]\Delta t).$$

Из тех же соображений пренебрегаем изменением  $\mathbf{r}_s$  за время  $[k_1 - k + \delta k]\Delta t$  и получаем, что  $D_{k_1+\delta k,n} \approx D_{k,n+M}$  при удачном выборе  $\delta k$ .

Значения  $D_{k_1+\delta k,Q+1}, \dots, D_{k_1+\delta k,N}$  являются приближением к показаниям *несуществующих* гидрофонов для отсчета  $k$ :  $D_{k,N+1}, \dots, D_{k,N+M}$  и, следовательно, могут быть использованы для расширения апертуры антенной решетки:

$$\mathbf{D}'_k = [D_{k,1}, \dots, D_{k,N}, D_{k_1+\delta k,Q+1}, \dots, D_{k_1+\delta k,N}], \text{ (ср. с (10)).} \quad (15)$$

Неизвестное  $\delta k$  может быть найдено с помощью максимизации корреляционной функции:

$$\psi(\delta k) = \sum_{n=1}^Q D_{k,n+M}^* \cdot D_{k_1+\delta k,n}.$$

Значение  $\delta k$ , которое доставит максимум  $\psi(\delta k)$ , будет искомым. При этом следует ограничить это значение:  $|\delta k| < K$ . Таким образом, в качестве  $\delta k$  последовательно пробуются все значения  $-K \dots K$ .

Вычисления можно провести, избрав в качестве начального момента времени  $t_1, t_2$  и т.д., увеличивая число шагов синтеза апертуры до значения, ограничиваемого временной и пространственной когерентностью. Длина апертуры для  $L$  шагов получается такой же, как в ЕТАМ:  $(N+LM-1)d$ . Для этого понадобится вычислить значения  $\delta k_1, \dots, \delta k_L$ .

Рассмотрим теперь случай нескольких источников  $J$ , имеющих пространственное расположение  $\mathbf{r}_s^{(j)} \ 1 \leq j \leq J$ . Без потери общности можно предположить, что источники являются монохроматическими. В рассматриваемой дискретной системе сигнал любого источника с более сложной частотной характеристикой может быть рассмотрен как сумма гармоник, или как множество монохроматических источников, имеющих одинаковое пространственное положение. Таким образом,

$$s_j(t) = A_j \cdot e^{-i(\omega_j t + \varphi_j^{(0)})},$$

где  $s_j(t)$  – сигнал  $j$ -го источника;  $A_j, \omega_j$  – его амплитуда и частота, соответственно;  $\varphi_j^{(0)}$  – начальная фаза.

В этом случае наблюдаемый комплекснозначный сигнал в точке  $\mathbf{r}$  в момент времени  $t$  будет равен:

$$x(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=0}^J W(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j) \cdot s_j(t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_j| / c).$$

Для упрощения отбросим задержку  $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j| / c$ , связанную с распространением сигнала. Источники предполагаются достаточно удаленными и разница между различными  $\mathbf{r}$ , в которых наблюдается сигнал (это положения различных гидрофонов в период синтеза), невелика:

$$|\mathbf{r} + \delta \mathbf{r} - \mathbf{r}_j| \approx |\mathbf{r} - \mathbf{r}_j| \quad \text{при } |\delta \mathbf{r}| \ll \mathbf{r}_j.$$

Умножение на функцию  $W(\cdot, \cdot)$ , значение которой является комплексным числом, по модулю меньше единицы, для монохроматического источника может быть заменено фазовым сдвигом. Попутно полагая для удобства начальные фазы  $\varphi_j^{(0)}$  равными нулю, получаем:

$$x(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=0}^J \tilde{s}_j(t - \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j)); \quad \tilde{s}_j(t) = A_j \cdot e^{-i\omega_j t}; \quad (16)$$

$$\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j) = \frac{1}{\omega} \arg [W(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j)].$$

Перепишем (3) и (4) с учетом (16):

$$x(\mathbf{r}_{n+M}(t), t) = \sum_{j=0}^J \tilde{s}_j(t - \Phi(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s^{(j)}(t))),$$

$$x(\mathbf{r}_n(t_1), t_1) = \sum_{j=0}^J \tilde{s}_j(t_1 - \Phi(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s^{(j)}(t_1))).$$

Принимая допущение (7) для всех источников, получаем, что фазовые сдвиги  $\Phi(\cdot, \cdot)$  в обоих выражениях одинаковы, а, следовательно, члены двух сумм отличаются лишь сдвигом во времени. Другими словами,

$$x(\mathbf{r}_{n+M}(t), t) = S(t), \quad x(\mathbf{r}_n(t_1), t_1) = S(t_1),$$

где  $S(t) = \sum_{j=0}^J \tilde{s}_j(t - \Phi(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s^{(j)}(t)))$ .

Функция  $S(t)$ , представляющая сумму синусоид, является *почти периодической* функцией по Бору [11]. *Почти период*  $T$  определяется с точностью до заданного  $\varepsilon$ , удовлетворяя соотношению:

$$|S(t+T) - S(t)| < \varepsilon \quad \forall t.$$

С помощью этого соотношения можно записать приближенный вариант соотношения (11) для функции  $S(t)$ :

$$|S(t) - S(t + \tau + \delta t)| < \varepsilon \quad |\delta t| < T, \quad \tau \gg T.$$

Если значение  $\varepsilon$  соответствует погрешности измерений системы наблюдений, выполнение данного условия приводит к возможности расширения апертуры по формулам (15) и далее. Таким образом, приходим к алгоритму синтеза апертуры, работающему в условиях множественных источников с различными частотами - в противовес оригинальному ЕТАМ. Последний способен синтезировать апертуру только на одной частоте: для сигналов, содержащих в себе различные гармоники, базовая формула ЕТАМ (9) даст некорректное значение  $\tilde{\Psi}_n$ .

### **Исследование методов синтеза апертуры антенны в режиме обработки тестовых сигналов**

Ниже представлены результаты экспериментального исследования на модели SynApp алгоритмов ЕТАМ и ТЕТАМ. Сравнение алгоритмов ЕТАМ и МЕТАМ проведено в нашей работе [12], где сделан вывод о том, что алгоритм МЕТАМ, хотя и использует большее количество информации, не дает существенного выигрыша по сравнению с ЕТАМ, в то же время требует для реализации гораздо больше времени.

При экспериментальных исследованиях алгоритмов ЕТАМ и ТЕТАМ выяснилось, что для эффективной работы алгоритма ТЕТАМ необходима существенно большая частота дискретизации. То, что при ФХН во временной области низкая частота дискретизации дает худшие результаты, чем при работе в частотной области, известно [13], однако при синтезировании это еще больше обостряется. По сравнению с предыдущими экспериментами по алгоритму ЕТАМ частота дискретизации была увеличена в 5 раз, результаты ФХН для следующих алгоритмов обработки: сигналов без синтеза (REAL), с синтезом по алгоритму ЕТАМ и с синтезом по алгоритму ТЕТАМ представлены на рис. 1.

Цель одна, частота излучения цели 750 Гц, азимут цели 22.5°, частота дискретизации генерируемых сигналов 4687,5 Гц. В этом случае алгоритм ТЕТАМ дает результаты практически неотличимые по качеству пика, характеризующего цель, от результатов ФХН полной апертурой (REAL). В то же время ЕТАМ дает несколько худший результат: хотя амплитуда пика выше, чем в ТЕТАМе, сам пик несколько смещен относительно REAL, который мы считаем эталоном. Впрочем, смещение незначительное, так что можно считать, что оба метода для одного монохроматического источника работают. Однако при конструировании специализированных систем с синтезированной апертурой необходимо учитывать тот факт, что при использовании алгоритма ТЕТАМ частоту

дискретизации сигналов следует увеличивать. Очевидно, что для современной электроники это не является проблемой.

Эксперименты для двух разночастотных целей приведены на рис. 2. Цель № 1: пеленг  $22^\circ$ , частота 256 Гц. Цель № 2: пеленг  $77^\circ$ , частота 81 Гц. Алгоритмы: REAL, ETAM, TETAM. Хорошо видно, что алгоритм TETAM дает результаты, практически неотличимые от REAL. А вот ETAM ведет себя совершенно непредсказуемо.

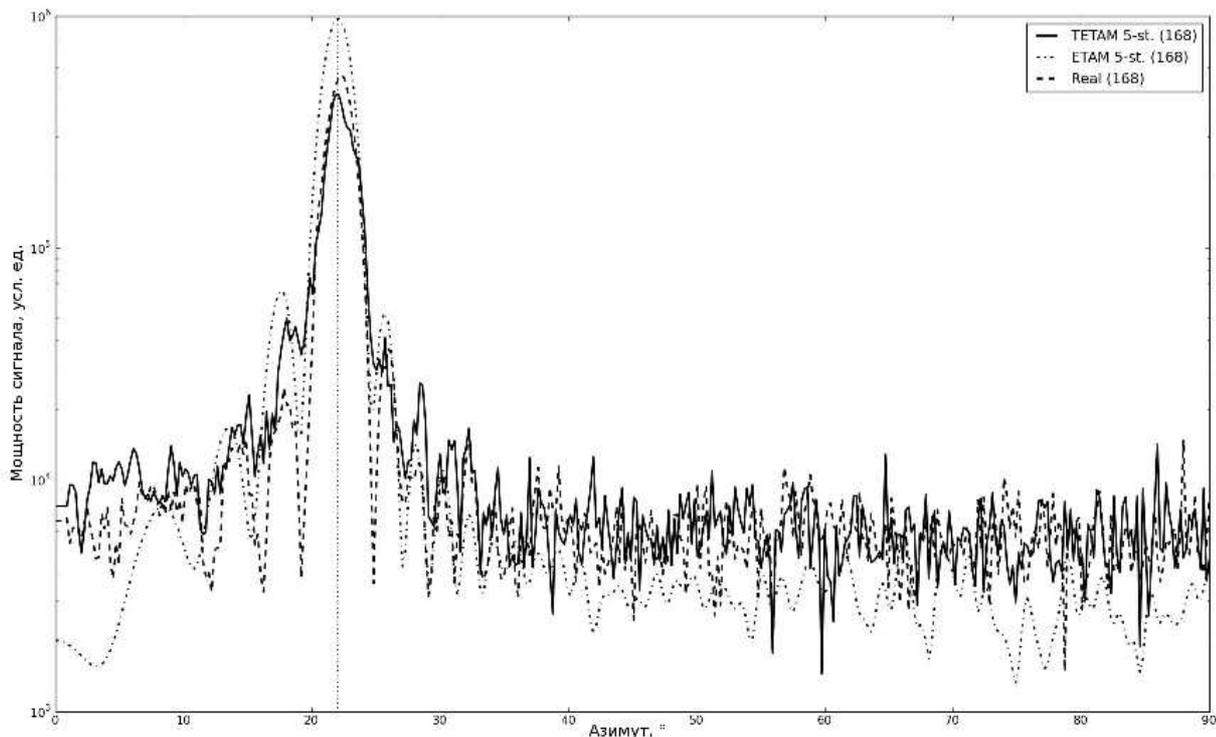


Рис. 1. Внешний вид главного окна программы SynApp.

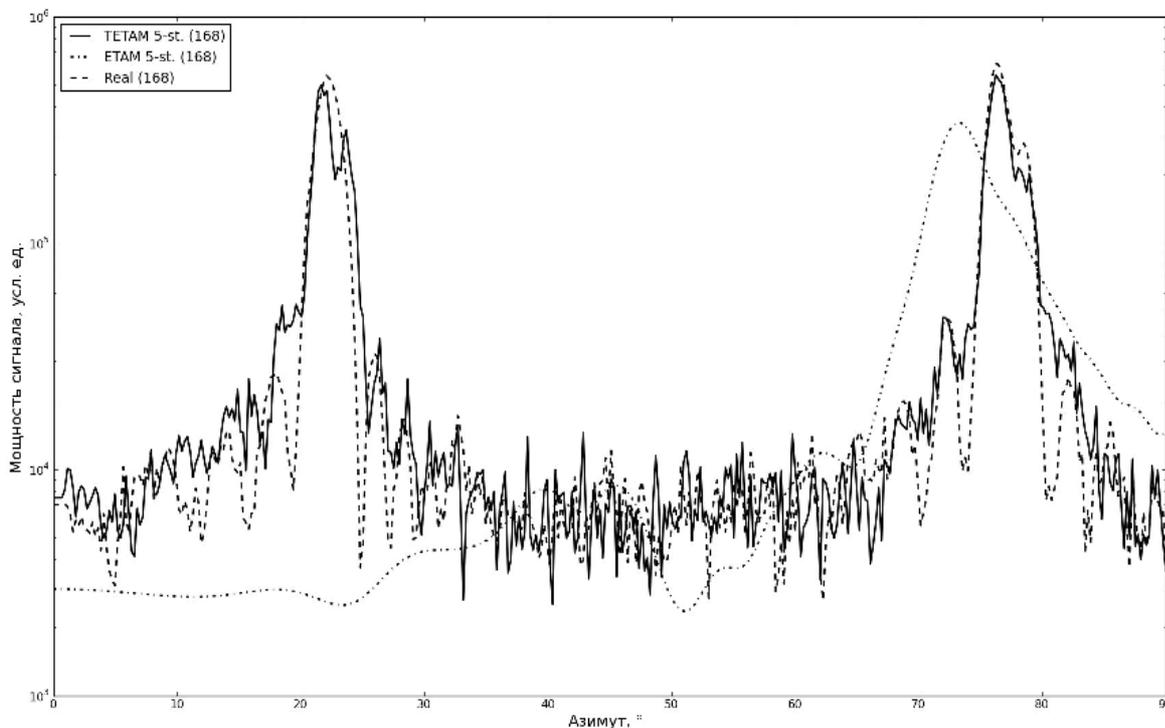


Рис. 2. Сравнение алгоритмов ETAM и TETAM.  
Одна цель, частота излучения цели 750 Гц, азимут цели  $22.5^\circ$ .

При ФХН он по частоте настроен на правый источник ( $77^\circ$ ) и дает один пик, к тому же смещенный. Другие эксперименты показали, что пик может появиться в любом месте, а иногда появляются и два пика. Как и следовало ожидать, ЕТАМ для нескольких источников не работает, т.е. для работы ЕТАМа необходим один монохроматический источник, в противном случае сигналы следует пропускать через узкополосный фильтр и только после этого обрабатывать алгоритмом ЕТАМ.

### **Исследование методов синтезирования апертуры антенны в режиме обработки реальных сигналов**

Главным критерием работоспособности алгоритмов синтезирования апертуры является их испытание на реальных сигналах. Мы приводим результаты синтезирования апертуры с использованием информации ОАО «Концерн «Океанприбор», представляющей временные сигналы 48 гидрофонов, расположенных на ГПБА с интервалом 1,92 м, частота дискретизации 937,5 Гц. Испытания проводились в Баренцевом море в 2008 г., скорость буксировки антенны составляла 6 уз. Сигналы гидрофонов записывались в течение 38 мин. К данным прилагалась информация о приблизительном пространственном положении (азимуте) каждой из целей во время записи.

Схема исследования такова. Сначала формировалась ХН для всей антенны (48 гидрофонов) и выявлялись периоды времени, в которых присутствовали источники звука. Затем сигналы от 24 гидрофонов отбрасывались и ХН формировалась с использованием оставшихся 24 гидрофонов + 24 виртуальных гидрофонов, синтезированных путем использования сигналов оставшихся 24 гидрофонов, переместившихся на место 24 отброшенных. Синтез проводился алгоритмами ЕТАМ и ТЕТАМ, при этом использовалась программа SynApp, в которой вместо модельных присутствовали реальные сигналы. Затем оставлялись сигналы 1/3 гидрофонов (16) и т.д. Результаты формирования ХН для реальной и синтезированной антенн сравнивались по нескольким критериям.

В качестве эталонной обработки принято традиционное ФХН: сначала данные от всех 48 гидрофонов подвергались частотному анализу (БПФ по 512 точкам), а затем по каждой частоте с помощью алгоритма Бартлетта формировалась ХН. В результате был получен пространственно-частотный спектр, который соответствовал имевшейся априорной информации об источниках звука. Спектр показан на рис. 3, где «чернота» соответствует абсолютному значению мощности сигнала для заданной частоты и пеленга.

Алгоритм ЕТАМ проверялся на цели № 1 с азимутом в районе  $30^\circ$ , имеющей почти монохроматический частотный портрет (около 252 Гц). При обеспечении алгоритма ЕТАМ необходимым ему узкополосным сигналом проблема заключается в том, что алгоритм осуществляет совмещенную пространственно-временную обработку сигналов, сопоставляя отсчеты с заданными номерами (дающими необходимое перекрытие). В то же время работает соотношение неопределенности, ограничивая точность одновременного позиционирования в частотной и пространственной областях.

Для получения узкополосного сигнала был избран подход, основанный на цифровой фильтрации. Сначала первоначальный сигнал подвергался демодуляции, когда центр интересующей частотной полосы сдвигается в положение 0 Гц:

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

где  $x_n(i\Delta t)$  – исходный сигнал  $n$ -го гидрофона;  $f_0$  – центр полосы;  $i$  – номер отсчета;  $\Delta t$  – интервал дискретизации. Затем сигнал  $x_n^{(f_0)}(i\Delta t)$  пропусклся через цифровой фильтр низкой частоты, ослабляющий компоненты за пределами интересующей полосы.

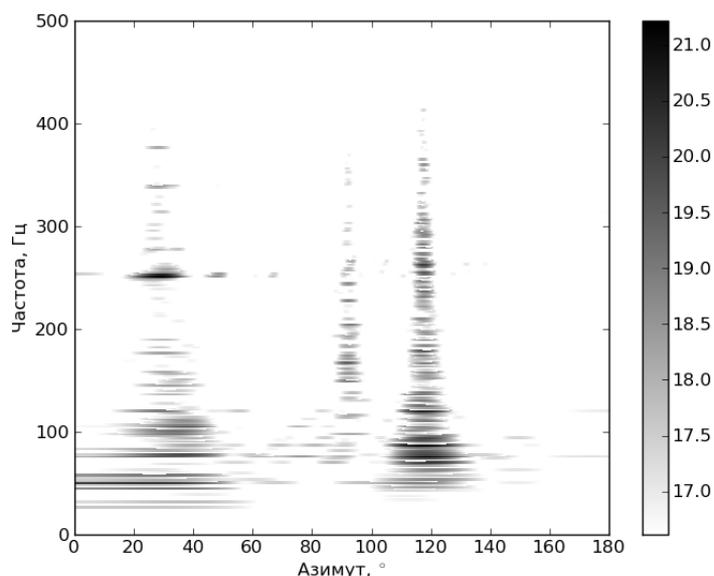


Рис. 3. Программное моделирование, сравнение алгоритмов ETAM и TETAM. Две цели. Цель №1: пеленг 22°, частота 256 Гц. Цель №2: пеленг 77°, частота 81 Гц.

В результате исследования для фильтрации был выбран цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой - БИХ-фильтр Баттеруорта 5-го порядка с частотой среза 2 Гц. В связи с этим возникло одно весьма существенное обстоятельство: БИХ-фильтры вносят в сигнал фазовые искажения, что не может не влиять на качество синтеза, ибо суть алгоритма ETAM заключается в компенсации фазовых сдвигов. Известно, что если фильтр применить последовательно два раза, причем во второй раз в обратном направлении (когда как бы изменяется знак времени), то фазовые искажения будут скомпенсированы. Такая двукратная фильтрация и применялась в дальнейшем для синтеза.

На рис. 4 приведены результаты синтезирования апертуры. Данные были демодулированы с частоты 252,69 Гц, а затем обработаны ФНЧ Баттеруорта 5-го порядка с частотой среза 2 Гц. Кривая 4, *в* изображает референтную ХН полной реальной апертуры из 48 гидрофонов. Кривая 4, *а* отражает ХН 24 гидрофонов (т.е. половины антенны) без синтезирования. Кривая 4, *б* отражает результаты обработки данных с 24 гидрофонов с помощью синтезирования апертуры. Использовалось 50-процентное перекрытие антенны [7], было сделано 2 шага синтеза, что в итоге дало апертуру из 48 гидрофонов (24 реальных + 2\* (0.5\*24) виртуальных = всего 48). Все результаты нормированы на максимум, соответствующий цели № 1 по азимуту около 30°.

Сокращение длины апертуры, как и следовало ожидать, ухудшает результаты: пик, характеризующий цель, не только расширяется, но и существенно искажается: появляется нечто похожее на боковой лепесток; координата максимума пика смещается (ср. кривые *а* и *б*), что, естественно, приведет к ошибке определения пеленга цели. Так, простое уменьшение апертуры антенны приводит, как и ожидалось, к ухудшению параметров целевой функции антенны – определения пеленга цели. Однако синтезирование апертуры позволяет практически полностью исключить отмеченные искажения (ср. кривые *а* и *в*). Координата максимума пика не смещается (сдвиг менее погрешности вычислений), расширение незначительное (полуширина пика на полувысоте у кривой *в* составляет 5,41°; у кривой *а* – 4,29°), причем это расширение связано, скорее всего, с тем, что не учитывалась скорость цели. За счет увеличения боковых лепестков несколько упало соотношение сигнал/шум SNR (отношение амплитуды пика к среднему значению мощности вдоль всей кривой):

для реальной апертуры из 48 гидрофонов  $SNR = 15,6$ ; для синтезированной апертуры из 24 реальных+24 синтезированных гидрофонов  $SNR = 11,6$ .

На рис. 5 показаны результаты синтеза апертуры при еще меньших размерах субапертур в сравнении с ХН реальной апертуры (кривая *a*). Кривая *б* – субапертура 16, 4 шага синтеза (синтезированная апертура  $48 = 16+4*8$ ); *в* – субапертура 12, 6 шагов синтеза ( $48 = 12+6*6$ ); *г* – субапертура 8, 10 шагов синтеза ( $48 = 8+4*10$ ).

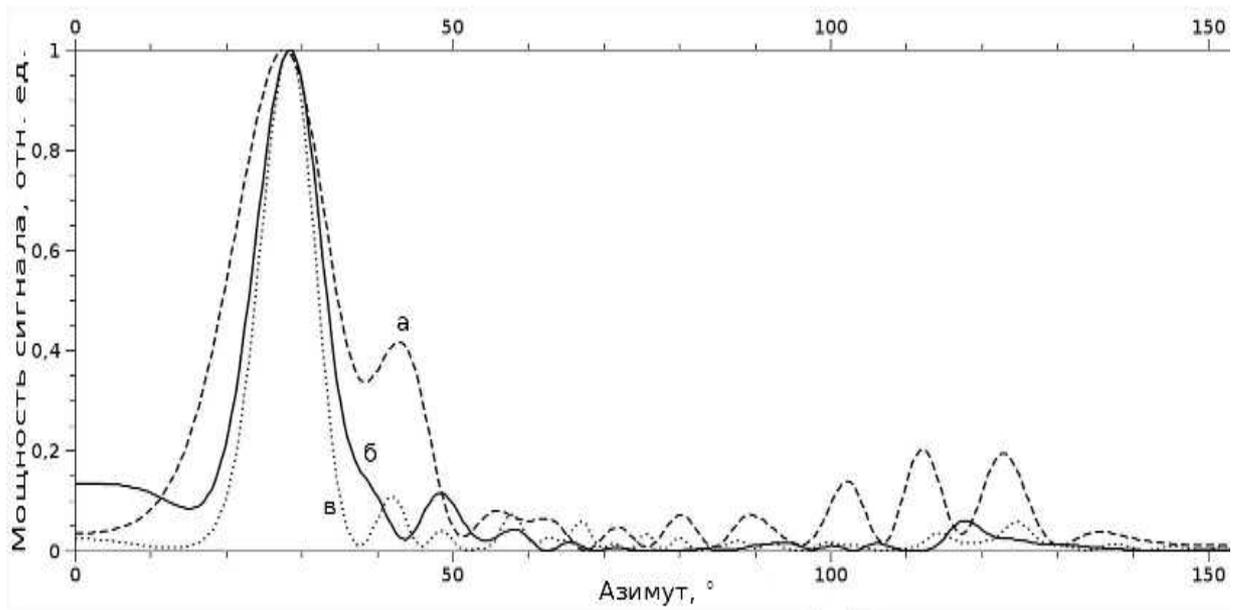


Рис. 4. Пространственно-частотный спектр реальных сигналов.

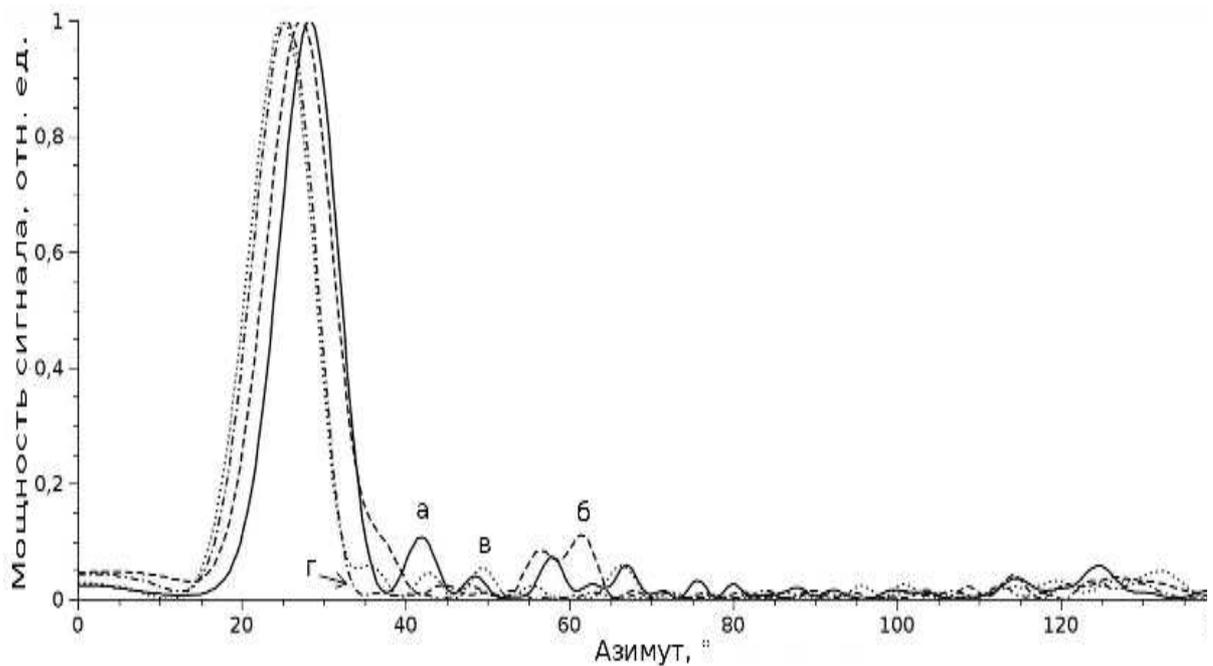


Рис. 5. Реальные сигналы от ГПБА. Синтез апертуры. Алгоритм ЕТАМ.

Параметры пеленгования при синтезировании апертуры с сохранением числа гидрофонов представлены в табл. 1. Смещение пика определялось как разность координат максимумов ХН для реальной и синтезированной апертур.

Таблица 1

Эффективность синтеза для субапертур

Апертура	Параметры пеленгования		
	Смещение пика, °	Ширина пика на полувьсоте, °	Отношение сигнал/шум
Реальная	0	4,29	15,6
Синтезированная 48 = 24+2*12	0	5,41	11,6
Синтезированная 48 = 16+4*8	-1,35	4,74	13,6
Синтезированная 48 = 12+6*6	-3,16	4,51	15,5
Синтезированная 48 = 8+10*4	-3,16	4,51	16,9

Из таблицы видно, что при уменьшении размера субапертуры, используемой для синтеза, полуширина пика и соотношение сигнал-шум изменяются слабо, однако возникает и увеличивается сдвиг по азимуту.

Весьма интересным представляется вопрос о том, как будут изменяться параметры пеленгования при расширении синтезированной апертуры сверх реальной. Рис. 6 отражает результаты синтеза апертуры из субапертуры 24 при увеличении количества шагов синтеза и соответствующем росте длины виртуальной апертуры.

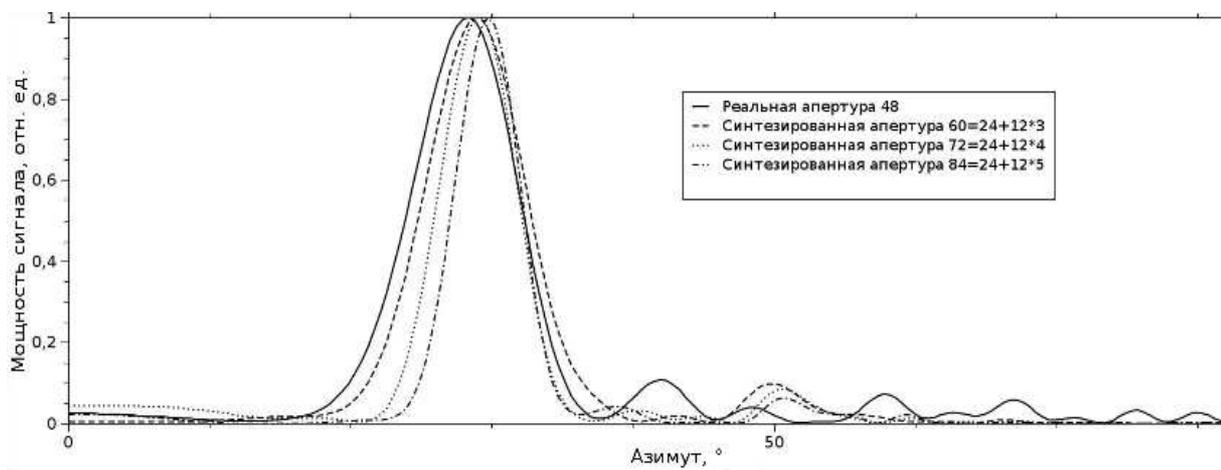


Рис. 6. Реальные сигналы от ГПБА. Синтез апертуры при уменьшении размеров субапертур, создающих синтезированную апертуру. Алгоритм ЕТАМ.

Результаты этого эксперимента представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что увеличение количества шагов приводит к сужению пика и к увеличению соотношения сигнал-шум, однако снова возникает сдвиг по азимуту.

Было выдвинуто предположение о том, что сдвиг ХН возникает из-за движения цели. Для подтверждения этого мы провели моделирование с помощью программы SynApp процесса синтеза с теми же параметрами, что и в случае реальных сигналов, кроме, конечно, моделирования точных параметров движения цели и расстояния до нее. Было принято расстояние до цели 1 км, направление движения ее параллельно движению антенны, скорость цели 20 узлов. На рис. 7а, отражающем синтезирование апертуры с сохранением числа гидрофонов, видно, что смещения ХН аналогично

смещениям на рис. 5. На рис. 8а, отражающем синтезирование апертуры сверх реальной, смещения ХН аналогичны смещениям на рис. 7 (отличия из-за незнания точных параметров движения цели), а на рис. 7б, 8б показаны те же ХН в случае, когда цель находится на существенно увеличенном расстоянии (100 км) и, соответственно, падающая на антенну волна плоская. Как и следовало ожидать, здесь никакого смещения не наблюдается (то, что на рис. 7б все ХН слились, вполне объяснимо).

Таблица 2

Эффективность синтеза для больших виртуальных апертур

Апертура	Параметры пеленгования		
	Смещение пика, °	Ширина пика на полувысоте, °	Отношение сигнал/шум
Реальная	0	4,29	15,6
Синтезированная 60=24+12*3	-0,42	4,06	18,1
Синтезированная 72=24+12*4	-0,90	3,16	22,5
Синтезированная 84=24+12*5	-1,35	2,71	27,6

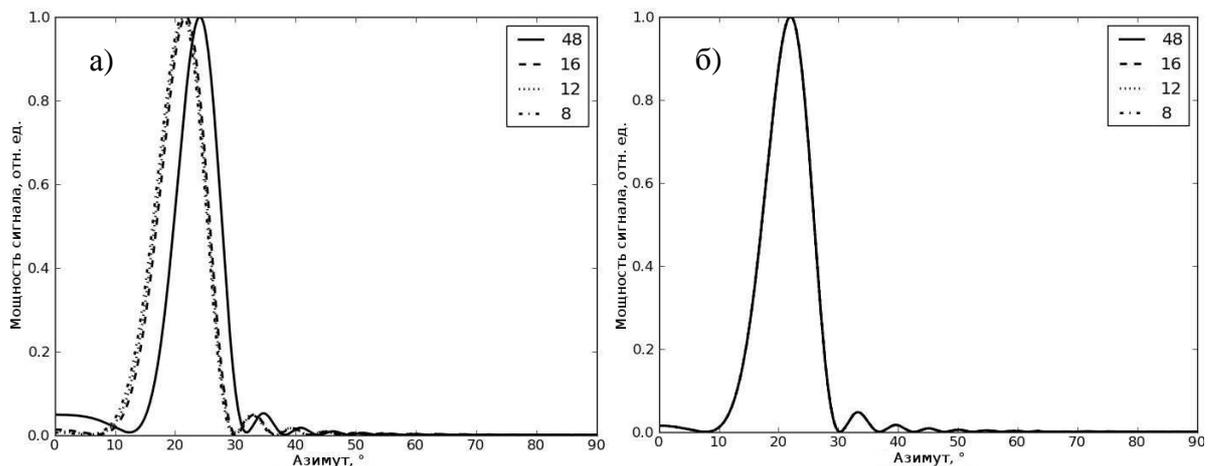


Рис. 7. Реальные сигналы от ГПБА.

Синтез апертуры при увеличении ее более реальной величины. Алгоритм ЕТАМ.

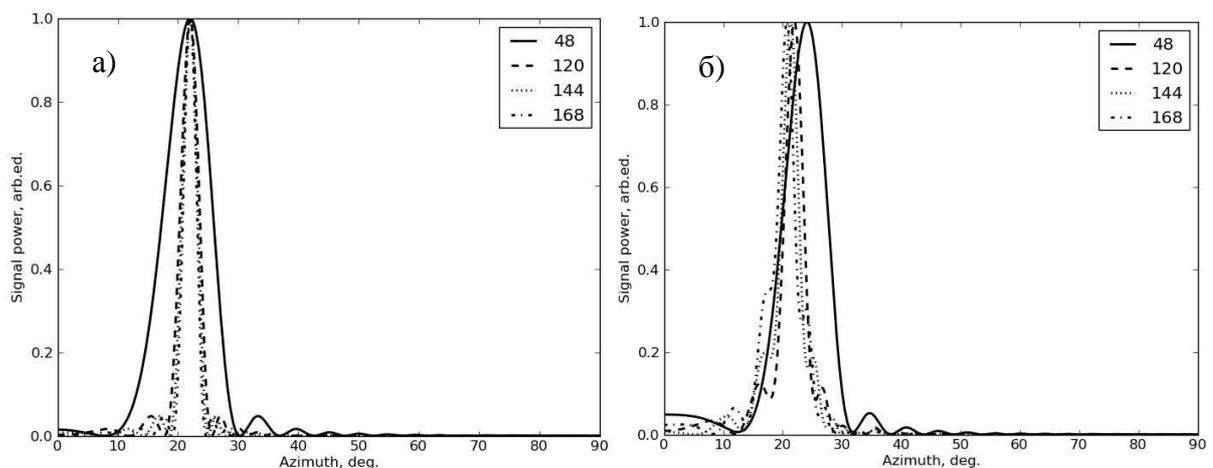


Рис. 8. Программное моделирование синтеза апертуры при увеличении ее более реальной величины. Скорость движения цели 20 уз. Расстояние до цели: а) – 1 км, б) – 100 км. Алгоритм ЕТАМ.

Результаты синтезирования апертуры алгоритмом ТЕТАМ для реальных данных представлены на рис. 9. Выделились все широкополосные источники сигналов на пеленгах 27°, 120° и слабый источник в районе 97°.

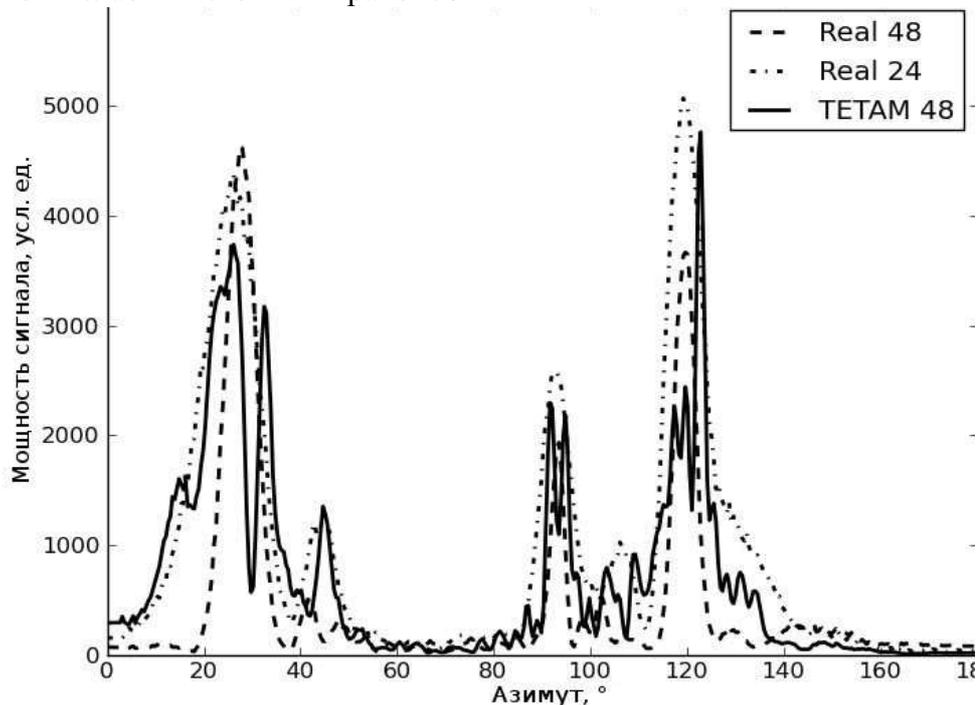


Рис. 9. Реальные сигналы от ГПБА. Синтез апертуры. Сравнение алгоритмов ЕТАМ и ТЕТАМ.

Эти результаты не так убедительны, как полученные при использовании алгоритма ЕТАМ для реальных данных, который, напомним, реализуется в частотной области (отметим, что и эталонная ХН, сформированная алгоритмом REAL для полной апертуры, здесь существенно хуже). Дело в том, что при использовании ТЕТАМ для тестовых сигналов при ФХН во временной области большую роль играет частота дискретизации сигнала. Только повысив эту частоту в 5 раз (сначала мы ее брали такой же, как для реальных сигналов), мы получили удовлетворительные результаты при синтезировании с тестовыми сигналами. Однако это можно делать при моделировании тестовых сигналов, в случае реальных сигналов пришлось «повышать» частоту дискретизации путем интерполяции (метод интерполяции выбран по рекомендации [14] путем использования интерполяционного фильтра), но этот способ конечно же хуже, чем естественное увеличение частоты, а для имеющихся данных мы изменить частоту дискретизации не можем. Очевидно, что при разработке специализированных систем для апертурного синтеза антенн с помощью алгоритма ТЕТАМ выбор частоты дискретизации должен осуществляться с учетом формирования ХН во временной области. Что же касается смещения сигналов ТЕТАМ относительно REAL, то оно объясняется движением цели. Как нам представляется, именно в направлении определения параметров цели будут идти основные исследования и разработки в области синтезирования апертуры в гидроакустике. Что же касается дальнего обнаружения, где в основном важен пеленг, то здесь уже разработанные методы синтезирования можно считать достаточно эффективными.

\*\*\*

Программа SynApp, созданная для исследования алгоритмов обработки данных с антенн с синтезированной апертурой, 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 открытой и может быть использована для моделирования любого участка системы обработки гидроакустических данных (при разработке соответствующих модулей). Предложен, проанализирован и экспериментально испытан алгоритм ТЕТАМ, что позволило подтвердить его работоспособность при синтезировании апертуры антенны в случае нескольких некогерентных сигналов, в том числе и от различных источников.

Использование программы SynnApp для обработки реальных широкополосных сигналов подтвердило эффективность процедуры синтезирования апертуры при пассивной гидролокации с помощью алгоритма ЕТАМ и показало, что синтезирование апертуры позволяет при уменьшении антенны в два раза получить практически те же результаты по пеленгованию цели, что и с целой антенной, то есть уменьшить аппаратную часть за счет наращивания объема вычислений. Также показано, что параметры пеленгования целей (ширина пика, SNR) могут быть улучшены путем увеличения синтезированной апертуры, однако, при этом для исключения смещения пика необходимы дополнительные исследования при учете параметров движения цели. В результате испытания алгоритма ТЕТАМ на реальных сигналах сделан вывод о том, что для его успешного применения следует повышать частоту дискретизации сигналов. Необходимо отметить, что реальные данные были получены с ГПБА, форма которой в процессе буксировки не идентифицировалась. При небольшой субапертуре антенны, используемой для синтезирования, вполне реально разместить ее на жестком буксируемом аппарате, снабженном навигационным оборудованием, что позволит повысить качество синтеза и, соответственно, улучшить параметры пеленгования целей антеннами с синтезированной апертурой по сравнению с ГПБА.

*Авторы благодарят сотрудников ОАО «Концерн «Океанприбор», и, прежде всего, заместителя генерального директора по научной работе Селезнева И.А. за предоставление реальных гидроакустических данных для настоящей статьи.*

## Литература

1. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: Сов. радио, 1972.
2. Lemon S.G. Towed-array history // IEEE J. Oceanic Eng., 2004. V.29. P.365–373.
3. Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С. Исследование влияния мешающих факторов на качество синтезирования апертуры в гидролокации // Автометрия. 2008. Т.44. № 4. С.76-90.
4. Stergiopoulos S., Sullivan E.J. Extended towed array processing by an overlap correlator // J. Acoust. Soc. Am. 1989. 86(1). July.
5. Yen N.-C., Carey W. Application of synthetic-aperture processing to towed-array data // J. Acoust. Soc. Am. 1989. 86(2). August.
6. Stergiopoulos S., Urban H. A new passive synthetic aperture technique for towed arrays // IEEE J. Oceanic Eng. 1992. 17(1). January.
7. Kim D.H., Youn C.Lee. Temporal domain processing for a synthetic aperture array // IEEE J. Oceanic Eng. 2002. 27(2). April.
8. Язык программирования Python. <http://www.python.ru>.
9. <http://www.riverbankcomputing.co.uk/pyqt>.
10. <http://matplotlib.sourceforge.net>.
11. Левитан, Б.М. Почти-периодические функции. М.: Гос.изд-во техн.-теорет. лит., 1953.
12. Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С. Исследование эффективности программно-алгоритмических средств синтезирования апертуры в гидролокации на тестовых и реальных сигналах // Автометрия. 2009. № 5. С.70-81.
13. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988.
14. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и практика цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

Статья поступила в редакцию 14.05.2010 г.

