



Издается с 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Корчак В.Ю.</i> К 60-летию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН	4
Статьи	
<i>Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И.</i> Компьютерные технологии корабельной гидромеханики: состояние и перспективы	8
<i>Родионов А.А., Хантулева Т.А.</i> Нелокальная гидродинамика и ее приложения	22
<i>Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.</i> Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: современные технологии и перспективы	37
<i>Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.</i> Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетецентрических войн	49
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С., Чулков В.Л.</i> Апертурный синтез гидроакустических антенн – основа мобильных гидроакустических систем наблюдения	65
<i>Тарасов С.П., Воронин В.А.</i> Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска	78
<i>Белогубцев Е.С., Кирюхин А.В., Кузнецов Г.Н., Михайлов С.Г., Пудовкин А.А., Смагин Д.А., Федоров В.А.</i> Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде	93
<i>Иванов М.П., Степанов Б.Г.</i> Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога	108
<i>Стародубцев Ю.Д., Надолишняя А.П.</i> История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения	123
Перспективные направления развития науки и техники	
<i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i> Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ	129
Конференции	135
Поздравляем!	138
Хроника	140
Правила представления материалов в редакцию.....	142

CONTENTS

<i>Korchak V.Yu.</i> To the 60-th Anniversary of Section of Applied Problems at Presidium of RAS	4
--	---

Articles

<i>Guriev U.V., Tkachenko I.V., Ykushenko E.I.</i> Computer Technologies in Marine Hydrodynamics: State-of-the-Art and Perspectives	8
---	---

The basic stages and perspective directions of marine hydrodynamics development are considered. Efficiency of computer technologies in hydrodynamic and engineering analysis is demonstrated. Necessity of their wider use in shipbuilding is substantiated.

Key words: computer-aided technologies, marine hydromechanics, mathematical and physical experiments, multidisciplinary modeling.

<i>Rodionov A.A., Khantuleva T.A.</i> Nonlocal Hydrodynamics and Its Applications	22
---	----

Modern problems of science and engineering lead outside the scope of continuum mechanics. In order to solve the problems a new nonlocal hydrodynamics of nonequilibrium processes had been developed on the base of statistical mechanics using methods of nonlinear operator sets and adaptive control. The allowance for self-organization and selfregulation provides the mathematical model to be completed and results discrete structure spectra and structure transitions in a system. Application of the new approach to problems of flow and wave propagation in condensed media allows the description of the observed effects that have no explanation in the framework of the classical hydrodynamics.

Key words: nonequilibrium process, nonlocality, memory, selforganization, structure, multi-scaling, control..

<i>Kuzmitsky M., Gizitdinova M.</i> Mobile Underwater Robots for the Navy Tasks: Modern Technologies and Prospects	37
--	----

In the article the state-of-the-art review of prospects of mobile underwater robots using for solving some naval problems is resulted: MCM, surveys, ports, harbors and sea borders protection, targeting and underwater surveillance. Possible technologies of the specified problems solving using mobile underwater robotics are considered.

Key words: mobile underwater robot, technical shape, mission, energy source, carriers, problems, technologies.

<i>Kovalenko V.V., Korchak V.J., Chulkov V.L.</i> Concepts and Key Technologies of Underwater Surveillance Systems in Networked Centric Warfare	49
---	----

This paper presents the concept of creation and main features of integrated networked underwater surveillance systems. Several key aspects of such systems variants creation and their features are discussed.

Key words: net-centric warfare; integrated networked underwater surveillance system; sensor networks; distributed network system.

<i>Dashevsky O.Yu., Nejevenko E.S., Chulkov V.L.</i> Sonar Array Aperture Synthesis as a Foundation for Mobile Surveillance Sonar Systems	65
---	----

The paper analyzes the most effective aperture synthesis methods in hydroacoustics. A synthesis method for wide-band signals is suggested. A SynApp program developed for comparative analysis of different methods is described. The results of an experimental study with test signals (generated by the program) and real signals (obtained from a real towed array) are presented. Aperture synthesis availability in hydroacoustics is concluded.

Key words: hydroacoustics, synthetic aperture, flexible underwater towed array, wide-band acoustic signals, real signals.

<i>Tarasov S.P., Voronin V.A.</i> Prospects of Application of Nonlinear Acoustics Methods in Hydroacoustic Search Technologies	78
--	----

In the report the results of theoretical and experimental researches of the nonlinear phenomena in acoustics are discussed. It is shown, that using of these phenomena allows to create sonar devices and integrated systems for underwater and buried objects search, underwater surveillance, mineral and biological resources exploration, ocean environment monitoring. Characteristics of parametrical devices are discussed and results of their applications for solving various problems of hydroacoustics are considered. Ways of sonar means perfection and

principles of their construction using methods of nonlinear acoustics are discussed.

Key words: nonlinear phenomena, nonlinear interaction, parametrical arrays, beam pattern.

Belogubtsev E.S., Kirukhin A.V., Kuznetsov G.N., Mikhailov S.G., Pudovkin A.A., Smagin D.A., Fedorov V.A. Testing of Low Frequency Water and Air Sound Active Cancellation Techniques: Problems and Preliminary Results 93

Active control of low frequency sound vibration is considered. The necessity of solving this problem by active means in consequence of low cancellation effectiveness of passive techniques and means for signals on low frequencies is concluded. The algorithms and techniques development results are discussed for active cancellation of sound signals in water and air medium. The importance of solving this problem to ensure sea objects stealth and maintenance staff environmental safety is concluded. The real opportunity to cancel low frequency discreet components on not less then 8–15 dB and to reduce wide band level on not less then 6...8 dB is demonstrated. It is denoted that discreet frequency components cancellation both increase objects latency hiding and falsify objects classification characteristics.

Key words: Object ADT (armament and defense technology), Active cancelling of inner and outer noises, perceptibility decrease, environmental safety support, discreet receiving and radiating elements, falsification of classification characteristics, designer alternative.

Ivanov M.P., Stepanov B.G. Study of the Dolphin Acoustic Biosonar and Feasibility of Constructing Its Technical Analogue 108

Presented below are the results of experimental studies of the biosensor system of dolphins using acoustic channel for search and identification of underwater objects as well as for orientation in three dimensional space and underwater communications between individuals. The dolphin's (*Tursiops truncatus*) sonar functioning in complicated conditions of acoustic noise of the dolphin sonar is analyzed. It is shown that the basic mechanisms that provide noise immunity of the dolphin sonar are: the radiation of broadband pulses with zero carrier, use of burst (accumulation), burst rate variable repetition (time selection), and burst with interval-time coding. Possible ways of constructing of broadband underwater transducers and arrays capable to radiate acoustic signals similar to echolocation impulses of cetaceans are considered. Analyzed in the paper is functioning of two electrically operated models of broadband transducers: rod with phased excitation of sections and waveguide type transducer in the form of a coaxial set of piezoactive rings. Some results of solving synthesis and analysis problems for the above models of transducers are presented. It is shown that these transducers provide bandwidth, respectively, 1.5–2 octaves and 2–3 octaves and more.

Key words: echolocation signals, the analysis and synthesis of broadband signals, noise immunity, broadband signal, signal without carrier, wideband underwater transducer.

Starodubtsev Yu.D., Nadolishnyaya A.P. History, State-of-the-Art and Perspectives of the Cetaceans Use as a Part of Biotechnical Dual-Purpose Systems 123

Here we present the history of using marine mammals (MM) as humans' assistants, the place and time of the Soviet Navy Aquarium creation, the main tasks of Lomonosov Moscow State University (MSU) involved into the research of dolphins' abilities. We describe the biotechnical system for the underwater search (UwS) creation by MSU, about the active work of the USA on using MM. It is shown that the effectiveness and the economy of UwS using MM is much higher than using divers and technical means. The forecast of biotechnical systems development perspectives is given, and the necessity of creation of the Federal base for working with MM in Russia is pointed out.

Key words: marine mammals, aquarium, oceanarium, office use, biotechnical systems, underwater search, echolocation, training animals, cognitive activities of animals.

Perspective Tendency of Development of Science and Technics

Arsentiev V.G., Krivolapov G.I. Some Results of Undersea Networks Technologies Realization in SibSUTIS 129

This article represents some results, achieved in Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS) in research of networks for underwater monitoring. Also, this article reports development and small series manufacturing of the range of unified underwater communication, control and navigation modules. These modules are needed for work in the near-field zone. Now they are used in the University experimental researches in the field of underwater networks technologies. These modules can be used as basis for solution of wide class of underwater researching and manufacturing problems.

Key words: underwater network technologies, underwater communication, control, navigation.

УДК 681.883.024

© О.Ю. Дашевский¹, Е.С. Нежевенко¹, В.Л. Чулков², 2011

¹Учреждение Российской академии наук Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения РАН, г.Новосибирск

²Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г.Москва
avt393095@yandex.ru

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН – ОСНОВА МОБИЛЬНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Исследуются наиболее эффективные известные методы синтезирования апертуры в гидроакустике, предлагается метод синтезирования для широкополосных сигналов. Описывается программа SynApp для сравнительного анализа различных методов. Приводятся результаты экспериментального исследования процесса синтезирования апертуры с использованием тестовых сигналов, сгенерированных в программе, и сигналов, полученных с реальной гибкой протяженной буксируемой антенной (ГПБА). Делается вывод о перспективности синтеза апертуры в гидроакустике..

Ключевые слова: гидроакустика, синтезированная апертура, гибкая протяженная буксируемая антенна, широкополосные гидроакустические сигналы, реальные сигналы.

Целью проведенных в Институте автоматизации и электротехники исследований являлось разработка средств наблюдения за морскими подводными объектами гидроакустических систем, работающих в активно-пассивном режиме и установленных на самолетах-амфибиях. Было разработано два варианта гидроакустических антенн: гибкая протяженная буксируемая антенна (ГПБА), модифицированная для размещения на самолете-амфибии, и антенна с синтезированной апертурой (АСА). Сравним эти два варианта. При самых малогабаритных гидрофонах, минимальном весе и размерах основы, на которой они крепятся, для стометровой ГПБА требуется спуско-подъемное устройство весом в несколько тонн. Поэтому очевидно, что здесь могут использоваться только тяжелые самолеты-амфибии типа Бе-200. К тому же облегченная ГПБА будет сильнее менять свою траекторию при буксировке, что приведет к ухудшению качества наблюдения. Что же касается АСА, то габариты этого варианта существенно меньше и в пределе вместо ГПБА может использоваться буксируемый жесткий аппарат (БЖА), угловые координаты которого измеряются с большой точностью, что соответственно приводит к минимальному искажению характеристики направленности из-за рыскания БЖА. Такая антенна может буксироваться малым самолетом-амфибией типа Бе-103, вес которого в 20 (!) раз меньше, чем вес Бе-200.

Известно, что в самолетной радиолокации синтезированная апертура стала основным способом обеспечения высокого разрешения изображений объектов наблюдения [1]. В гидроакустике эта апертура начала активно исследоваться только в последнее двадцатилетие. Почему? Конечно, здесь сказались и чисто физические факторы: скорость звука сравнима со скоростью как смещения антенны, так и объектов наблюдения; однако, по нашему мнению, сыграло роль и такое соображение: у самолетной радиолокации альтернативы синтезированной апертуре не было, а у гидролокации была, да она и сейчас осталась: требуемое высокое разрешение можно обеспечить за счет длины ГПБА. Ведь для надводного корабля спуско-подъемное устройство весом в несколько тонн – не проблема. Но повышение требований к мобильности, а также некоторые другие сообра-

жения (например, ограничение длины ГПБА при ее размещении на подводной лодке) привели к повышению интереса к синтезированной апертуре. Исходя из сказанного выше, в качестве основного варианта гидроакустической антенны, буксируемой самолетом-амфибией, была выбрана синтезированная апертура.

Краткий обзор известных вариантов синтезирования апертуры в гидроакустике. Любой способ синтезирования апертуры основан на замене пространственного увеличения апертуры временным перемещением субапертуры. Главная проблема синтеза заключается в следующем: как сфазировать сигналы с субапертуры в нескольких точках ее траектории так, чтобы результирующие сигналы с субапертур казались сигналами с единой антенны. Известно несколько способов реализации этой процедуры. Практически одновременно было предложено два метода синтеза апертуры: метод Йена и Кэри [2], метод ЕТАМ (Extended Towed Array Measurements) [3]. В первом методе обработка ведется в частотной плоскости, коррекция фазы сигналов в различных точках положения субапертуры производится путем домножения сигналов на фазовый множитель, вычисляемый исходя из знания относительной скорости субапертуры и цели. Недостатки такого способа очевидны: если скорость субапертуры можно измерить с большой точностью, то определение скорости цели – большая проблема. Метод ЕТАМ, с нашей точки зрения, является наиболее эффективным методом синтезирования в фазовой плоскости, а также прототипом предложенного нами метода. Поэтому опишем его подробнее.

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. они 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 ω , например, $s_0(t) = A_0 e^{-i\omega t}$. В точке \mathbf{r} пространства будет наблюдаться следующий сигнал:

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

Функция $W(r, r_s)$ является функцией распространения сигнала. Для плоских волн без затухания $W(r, r_s) = \exp\{ik(r, r_s)r\}$, где k – волновой вектор, $k(r, r_s) = \frac{\omega r - r_s}{c|r - r_s|}$, \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,

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

Для квантованных значений времени

$$D_{k,n+M} = W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k\Delta t)) \cdot s_0(k\Delta t - |\mathbf{r}_s(k\Delta t) - \mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t)|/c); \quad (1)$$

$$D_{k_1, n} = W(\mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t), \mathbf{r}_s(k_1\Delta t)) \cdot s_0(k_1\Delta t - |\mathbf{r}_s(k_1\Delta t) - \mathbf{r}_{n+M}(k\Delta t)|/c), \quad (2)$$

где $k_1 = k + [\tau/\Delta t]$.

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

$$\mathbf{r}_s(k_1\Delta t) \approx \mathbf{r}_s(k\Delta t). \quad (3)$$

Делая такое допущение, получаем, что правые части (1) и (2) содержат одинаковую пространственную информацию $W(\cdot, \cdot)$ и отличаются лишь сдвигом по времени:

$$s(k\Delta t) \neq s(k_1\Delta t), \quad s(t) = s_0(t - |\mathbf{r}_s(t) - \mathbf{r}_{n+M}(t)|/c). \quad (4)$$

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 очевидно, что сигналы первых $Q = N - M$ гидрофонов и последних Q гидрофонов кроме совпадения по амплитуде должны совпадать и по фазе, что в общем случае маловероятно. Для решения этой проблемы оригинальный алгоритм ЕТАМ использует для этой цели фазовый корректирующий множитель. Для монохроматического сигнала с частотой ω сдвиг по времени на τ 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

$$\tilde{\Psi}_n = \arg \left[D_{k, n+M}^* \cdot D_{k_1, n} \right],$$

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

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

и имеет размерность $N+M$, содержа в себе показания N реальных гидрофонов и M виртуальных (синтезированных). Применяя эту процедуру L раз, получим апертуру из N реальных и M виртуальных гидрофонов общей длиной $(N+LM-1)d$.

На основе алгоритма ЕТАМ была предложена его модификация [4], 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. Было предложено еще несколько методов синтеза апертуры, однако все они отличаются тем, что, будучи основаны на коррекции фазы, пригодны для идентификации одного монохроматического источника сигнала.

Синтезирование апертуры антенны для идентификации нескольких источников (ТЕТАМ). В работе [5] нами была предложена модификация алгоритма ЕТАМ, заключающаяся во введении вместо фазового сдвига в частотной области сдвига по времени во временной. 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 δt , что

$$s(t) = s(t + \tau + \delta t) \quad |\delta t| < T. \quad (5)$$

Поскольку предлагаемый алгоритм работает полностью во временной области, для большей ясности не будем переводить время в дискретные отсчеты.

Перепишем (1) и (2) во временной области, подставив (4):

$$x(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t), t) \simeq W(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t)) \cdot s([t_1 + \delta t]) = x_{t, n+M} \quad (6)$$

$$x(\mathbf{r}_n(t_1), \mathbf{r}_s(t_1), t_1) = W(\mathbf{r}_{n+M}(t), \mathbf{r}_s(t_1)) \cdot s(t_1) = x_{t_1, n}$$

$$x(\mathbf{r}_n(t_1 + \delta t), \mathbf{r}_s(t_1 + \delta t), t_1 + \delta t) = W(\mathbf{r}_{n+M}(t + \delta t), \mathbf{r}_s(t_1 + \delta t)) \cdot s(t_1 + \delta t) = x_{t_1 + \delta t, n}. \quad (7)$$

Сопоставляя (6) и (7), видим, что при малом $|\delta t|$ и соответственно малом смещении платформы за время δt : $v \cdot \delta t \ll |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|$ можно считать $\mathbf{r}_{n+M}(t) \simeq \mathbf{r}_{n+M}(t + \delta t)$. Из тех же соображений пренебрегаем изменением \mathbf{r}_s за время $t_1 - t + \delta t$ и получаем, что $x_{t_1 + \delta t, n} \simeq x_{t, n+M}$ при удачном выборе δt .

Из этого следует, что значения $x_{t_1 + \delta t, Q+1}, \dots, x_{t_1 + \delta t, N}$ являются приближением к показаниям *несуществующих* гидрофонов для времени t : $x_{t, N+1}, \dots, x_{t, N+M}$ и, следовательно, могут быть использованы для расширения апертуры антенной решетки:

$$X_t = [x_{t,1}, \dots, x_{t,N}, x_{t_1 + \delta t, Q+1}, \dots, x_{t_1 + \delta t, N}]. \quad (8)$$

Неизвестное δt может быть найдено с помощью максимизации корреляционной функции

$$\Psi(t) = \sum_{n=1}^Q x_{t, n+M}^* \cdot x_{t_1 + \delta t, n};$$

значение δt , которое доставит максимум $\Psi(t)$, и будет искомым. При этом следует ограничить это значение: $|\delta t| < T$, таким образом, в качестве δt последовательно пробуются все значения $-T \dots T$.

Вычисления, описанные в предыдущем разделе, 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 $\delta t_1, \dots, \delta t_L$.

Рассмотрим теперь случай нескольких взаимно некогерентных источников J , имеющих пространственное расположение $\mathbf{r}_s^{(j)}$ $1 \leq j \leq J$. Без потери общности можно предположить, что источники являются монохроматическими. Если сигнал любого источника имеет более сложную частотную характеристику, то его можно представить 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, ω_j – его амплитуда и частота соответственно; $\varphi_j^{(0)}$ – начальная фаза. В работе [5] показано, что

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

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

где $x(\mathbf{r}_{n+M}(t_k), t_k)$ – сигнал, поступающий на $(n+M)$ -й гидрофон в момент времени t_k : $\Phi(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_s^{(j)})$ – фазовый сдвиг между сигналом, поступающим на n -й гидрофон и сигналом, излучаемым j -м источником: $\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j) = \frac{1}{\omega} \arg [W(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j, \omega_j)]$.

Принимая допущение (3) 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,

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

Функция $S(t)$, имеющая дискретный спектр, называется почти периодической функцией по Бору [6]. Почти период T удовлетворяет соотношению

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

т.е. сигнал в каждом периоде повторяется с точностью до заданного ε . С помощью этого соотношения можно записать приближенный вариант соотношения (5) для функции $S(t)$:

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

Если значение ε удовлетворяет заданной погрешности измерений системы наблюдений, выполнение данного условия приводит к возможности расширения апертуры по формулам (8) и далее. Таким образом, описанный алгоритм синтезирования апертуры работает 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 даст некорректное значение $\tilde{\Psi}_n$.

Программная модель для синтезирования апертуры. Как видно из предыдущих разделов, к настоящему времени разработано множество алгоритмов формирования характеристики направленности (ФХН) антенн с использованием синтеза апертуры. Они отличаются в основном различными требованиями к характеру априорной информации. Очевидно также, что разные методы будут обеспечивать разное качество синтезирования. Для того чтобы сравнить различные алгоритмы, сопоставить их поведение в заданных условиях и выявить сильные и слабые стороны каждого, была разработана система SynApp, позволяющая различные алгоритмы обработки с синтезированием апертуры исследовать с одних и тех же позиций.

К системе были сформулированы следующие требования:

- расширяемость (возможность добавления новых алгоритмов);
- удобный интерфейс пользователя (легкое редактирование модели);
- возможность применять алгоритмы обработки к одним и тем же данным и сравнивать результаты;
- максимальное быстродействие;
- возможность замены тестовых сигналов реальными, а отдельных программных модулей – аппаратными.

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, отображающей 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 может 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. То есть если в графе есть ребро $A \rightarrow B$, то выход модуля A поступает на вход модуля B . В программе SynApp данный подход реализован практически. 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), при этом информация проходит по всем возможным путям и обрабатывается, а в конце открывается окно с результатами.

На рис. 1 приведен внешний вид главного окна программы SynApp.

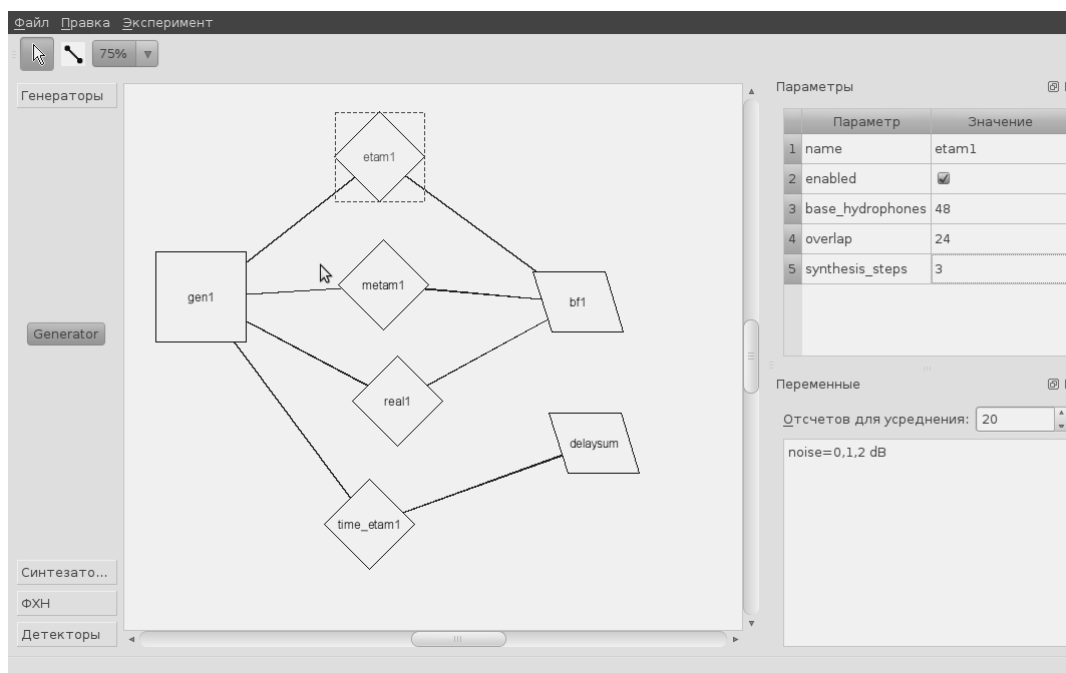


Рис. 1.

Модель состоит из пяти модулей: генератора, четырех модулей синтезирования апертуры, а также 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 четыре модуля синтезирования апертуры: etam1, реализующий алгоритм ЕТАМ [3]; metam1, реализующий алгоритм модифицированный ЕТАМ с временным усреднением [4]; real1, осуществляющий обработку без синтеза (с реальной апертурой того же размера); time_etam1 – алгоритм, предложенный нами и являющийся модификацией алгоритма ЕТАМ для широкополосного сигнала. Результат работы каждого

из четырех модулей поступает на ФХН Бартлетта bf1, при обработке во временной области с модуля time_etam1 сигнал поступает на ФХН с временным сдвигом.

Программный инструментарий. Программа SynApp написана на языке Python [7] с использованием библиотеки графического интерфейса PyQt4 и библиотек численных расчетов NumPy и SciPy [8]. Для построения графиков задействована библиотека matplotlib [9].

Система получилась открытой: добавление в нее нового модуля не требует переделки самой системы. Благодаря тому что Python является интерпретируемым языком с динамической типизацией, разработка программы прошла гораздо быстрее, чем если бы программа писалась на C++. При этом основную вычислительную сложность приняли на себя библиотеки NumPy и SciPy, по сути являющиеся интерфейсом к максимально эффективным математическим подпрограммам, написанным на Фортране. Профилирование работы программы подтвердило, что львиная доля процессорного времени затрачивается на математические операции (в частности, перемножение матриц), а не на исполнение кода на Python.

Первые версии алгоритмов синтезирования апертуры разрабатывались в системе MATLAB. Сейчас можно с уверенностью заявить, что MATLAB применительно к данной задаче не выдерживает никакого сравнения с выбранным инструментарием как по удобству, так и по скорости работы. Немаловажным фактом является также то, что и интерпретатор Python, и все использованные библиотеки являются бесплатными, с открытым исходным кодом. В последующих разделах приводится анализ алгоритмов синтеза, исследованных в программе SynApp.

Экспериментальное исследование алгоритмов на реальных и тестовых сигналах. Для подтверждения эффективности процедуры синтезирования апертуры и сравнения различных методов синтезирования были проведены эксперименты на реальных данных. Они были переданы нам ОАО Концерном «Океанприбор» и представляют собой 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 на протяжении 38 мин. К данным прилагалась информация о приблизительном пространственном положении (азимуте) каждой из целей на время записи. Для того чтобы сравнить синтезированную апертуру с реальной, принята следующая схема эксперимента. Сначала формировалась характеристика направленности (ХН) для всей антенны (48 гидрофонов) и выявлялись периоды времени, в которых присутствовали источники звука. Затем имитировалось укорочение субапертуры антенны: сигналы от 24 гидрофонов отбрасывались и ХН формировалась с использованием оставшихся 24 гидрофонов плюс 24 виртуальных гидрофонов, синтезированных путем использования сигналов оставшихся 24 гидрофонов, переместившихся на место 24 отброшенных. Затем оставались сигналы 1/3 гидрофонов (16) и т.д. Результаты формирования ХН для реальной антенны и синтезированной сравнивались по нескольким критериям.

Формирование характеристики направленности (ХН) для несинтезированной (полной) антенны производилось стандартно: сначала данные от всех 48 гидрофонов подвергались частотному анализу по 512 точкам, а затем по каждой частоте с помощью алгоритма Бартлетта формировалась ХН. В результате был получен пространственно-частотный спектр, показанный на рис. 2, где «чернота» соответствует значению мощности сигнала для заданных частоты и пеленга.

Из рисунка видно, что в поле наблюдения имеются три цели: цель № 1 с азимутом в районе 30°, имеющая почти монохроматический частотный портрет (около 252 Гц);

широкополосная цель № 2 с азимутом в районе 87°, в среднем частотном диапазоне; цель № 3, имеющая широкополосный портрет по азимуту 120°.

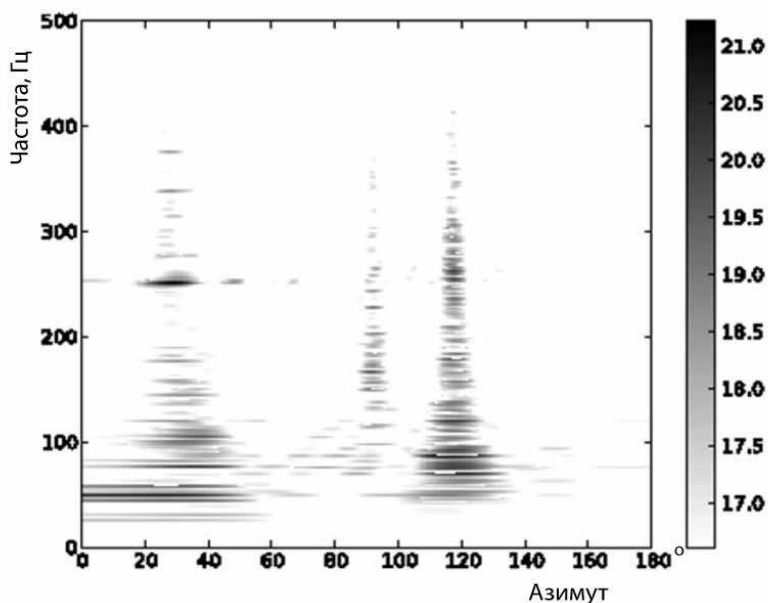


Рис. 2.

Испытывались алгоритмы ЕТАМ и ТЕТАМ. Алгоритм ЕТАМ требовалось обеспечить 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

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

$$x^{(f_0)}[k] = \exp\{j2\pi f_0 k \Delta t\},$$

где f_0 – центр полосы, k – номер отсчета.

Затем сигнал $x^{(f_0)}[k]$ пропускается через цифровой фильтр нижних частот, ослабляющий компоненты, которые находятся за пределами интересующей полосы. В качестве полосовых были опробованы фильтры с бесконечной и конечной частотными характеристиками. Результаты синтезирования апертуры на момент времени 01 ч 08 мин приведены на рис. 3.

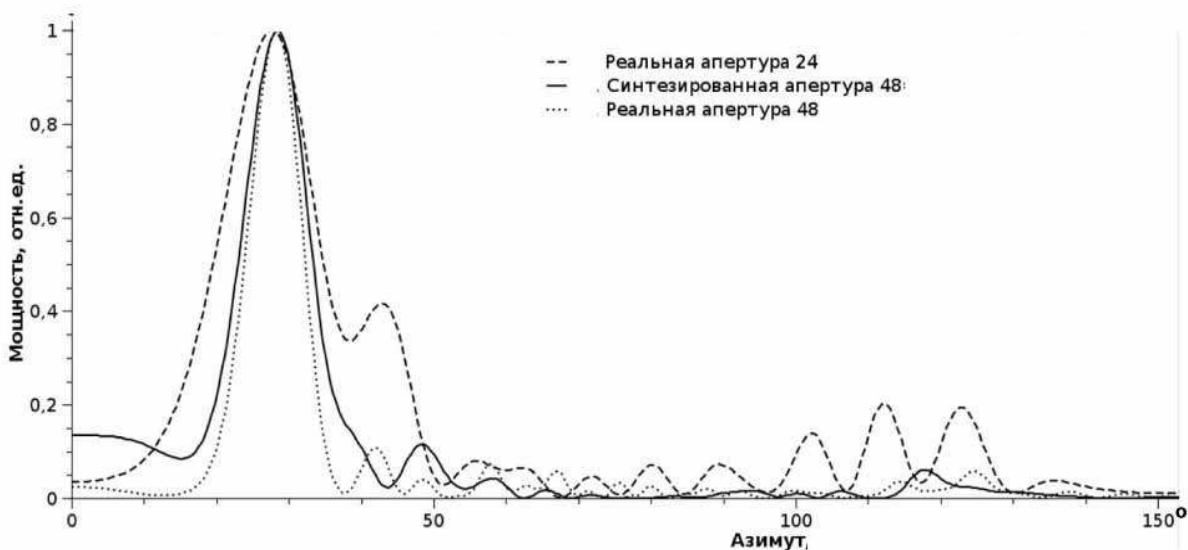


Рис. 3. Результаты синтезирования апертуры на момент времени 01 ч 08 мин.

Данные были демодулированы с частоты 252.69 Гц, а затем обработаны ФНЧ Батуруорта 5-го порядка с частотой среза, равной 2 Гц. Пунктирная линия изображает референтную ХН полной реальной апертуры из 48 гидрофонов, штрихпунктирная линия – ХН 24 гидрофонов (т.е. половины антенны) без синтезирования, сплошная линия – результаты обработки данных с 24 гидрофонов с помощью синтезирования апертуры. Использовалось 50%-ное перекрытие антенны, сделано два шага синтеза, что в итоге дало апертуру из 48 гидрофонов (24 реальных + $2 \cdot (0.5 \cdot 24)$ виртуальных = 48). Все результаты нормированы на максимум, соответствующий цели № 1 по азимуту около 30° .

Сокращение длины апертуры без синтезирования, 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. пунктирную и штрихпунктирную кривые), что, естественно, приводит к ошибке определения пеленга цели. То есть простое уменьшение апертуры антенны, как и следовало ожидать, ухудшает параметры целевой функции антенны – определение пеленга цели. Однако синтезирование апертуры позволяет практически полностью исключить отмеченные искажения (ср. пунктирную и сплошную кривые). Координата максимума пика не смещается (сдвиг менее погрешности вычислений), расширение незначительно (полуширина пика на полувысоте у сплошной кривой составляет 5.41° ; у пунктирной кривой – 4.29°), причем это расширение связано 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 $SNR = 11.6$. Таким образом, можно утверждать, что, используя алгоритм ТЕТАМ, можно с половинной апертурой антенны получить практически те же результаты по разрешению и по отношению сигнал/шум, что и с полной апертурой (для одной цели). Конечно, очень интересен вопрос, насколько можно уменьшать размер субапертуры без существенного ухудшения характеристик синтезированной антенны. Результаты такого экспериментального исследования приведены в виде таблицы, поскольку кривые ХН для различных субапертур практически сливаются. Из таблицы видно, что при уменьшении пика отношение сигнал/шум по сравнению с реальной апертурой увеличивается, ширина пика уменьшается (увеличивается разрешение); единственной неприятностью является смещение пика (ошибка пеленга), особенно при числе гидрофонов в субапертуре 2. Для определения причины этого явления необходимы дополнительные исследования, но с учетом того, что пик, характеризующий цель, не разваливается и не уширяется, можно предположить, что это связано с изгибом антенны: при полной апертуре он приводит к уширению пика (первая строчка таблицы), а при малой субапертуре в 2 гидрофона они занимают последовательные позиции на линии под углом к траектории движения антенны, что и приводит к пику узкому, но смещенному. С помощью датчика рыскания, установленного на субапертуре, можно было бы исключить эту ошибку.

Результаты испытания алгоритма ТЕТАМ приведены на рис. 4. Видно, что ХН для реальной апертуры и ТЕТАМ очень близки, хотя отношение сигнал/шум в последнем несколько хуже. Однако следует заметить следующее. Алгоритм ТЕТАМ работает во временной области; известно [10], что в этом случае для хорошей работы алгоритма необходима более высокая частота дискретизации, чем при работе в частотной области, но в случае реальных данных этот параметр мы изменить не можем.

Представим теперь результаты исследования алгоритмов синтезирования при использовании тестовых сигналов. Зачем это нужно, если мы показали эффективность работы алгоритмов на реальных сигналах? Дело в том, что получение этих сигналов, связанное с выходом в море, записями сигналов, обеспечением целями и т.д., – весьма до-

рогостоящее мероприятие. Практически невозможно обеспечить требуемый диапазон характеристик целей по частотному диапазону, скорости и т.д. Поэтому, если показать, что моделирование при использовании тестовых сигналов и параметрах антенны тех же, что и реальных, дает близкие результаты, можно быть уверенными, что модель верна и моделирование надо проводить в широком диапазоне параметров сигналов и антенны.

Таблица 1

Параметры пеленгации для синтеза из малых субапертур

Апертура	Параметры пеленгации		
	Смещение пика, градус	Полуширина пика на полувысоте, градус	Отношение сигнал/шум
Реальная ($N = 48$)	0	4.30	16.9
Синтезированная:			
$N = 24 + (24/2) \cdot 2 = 48$	-0.18	3.44	19.9
$N = 16 + (16/2) \cdot 4 = 48$	-2.04	3.58	18.7
$N = 12 + (12/2) \cdot 6 = 48$	-1.52	3.77	20.1
$N = 8 + (8/2) \cdot 10 = 48$	-1.92	4.01	19.2
$N = 6 + (6/2) \cdot 14 = 48$	-1.21	3.85	20.2
$N = 4 + (4/2) \cdot 22 = 48$	-1.28	3.81	19.1
$N = 2 + (2/2) \cdot 46 = 48$	3.47	3.12	21.7

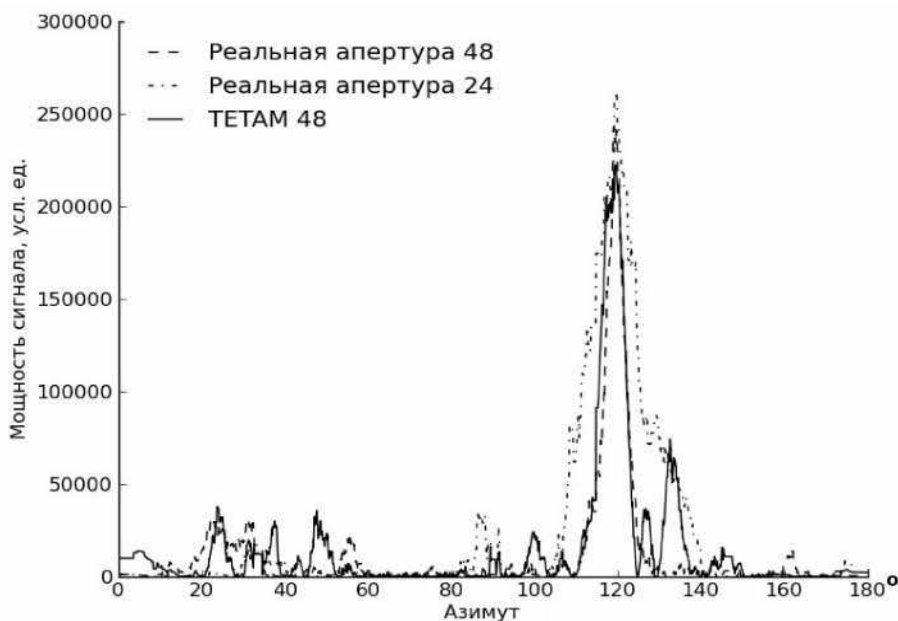


Рис. 4.

На рис. 5 представлены результаты синтеза с параметрами антенны и сигнала цели такими же, как на рис. 3. По соотношению сигнал/шум, ширине пика результаты для реального и модельного экспериментов близки. Было проделано множество подобных экспериментов, и во всех случаях результаты были похожи. Поэтому приведем результаты нескольких экспериментов на тестовых сигналах, в которых параметры антенны и сигналов существенно отличаются от вышеприведенных.

На рис. 6 показана ХН для антенны из 168 гидрофонов, реальных и виртуальных: без синтеза (REAL), с синтезом по алгоритму ЕТАМ, с синтезом по алгоритму ТЕТАМ.

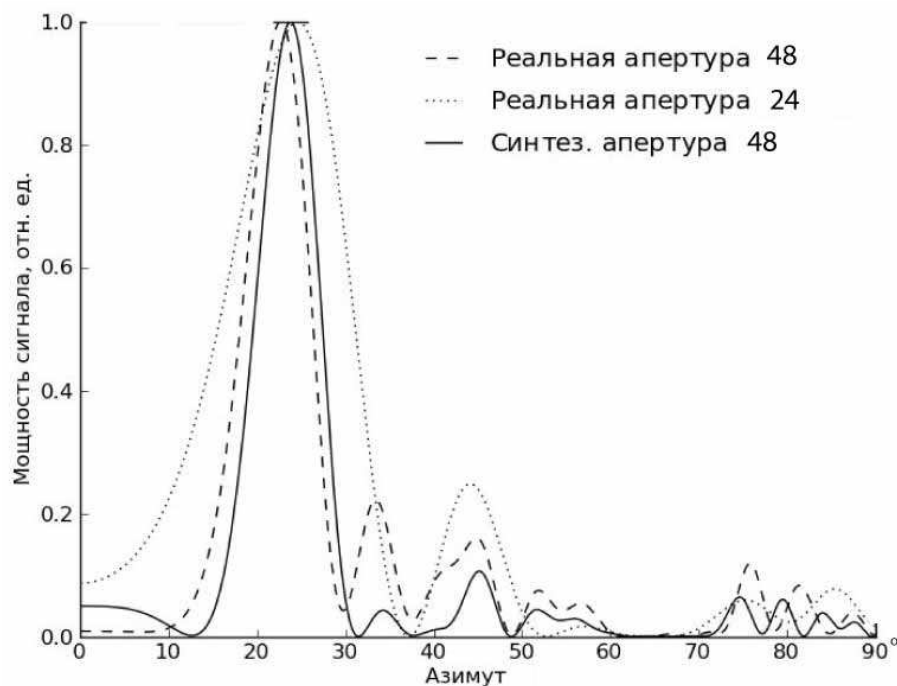


Рис. 5.

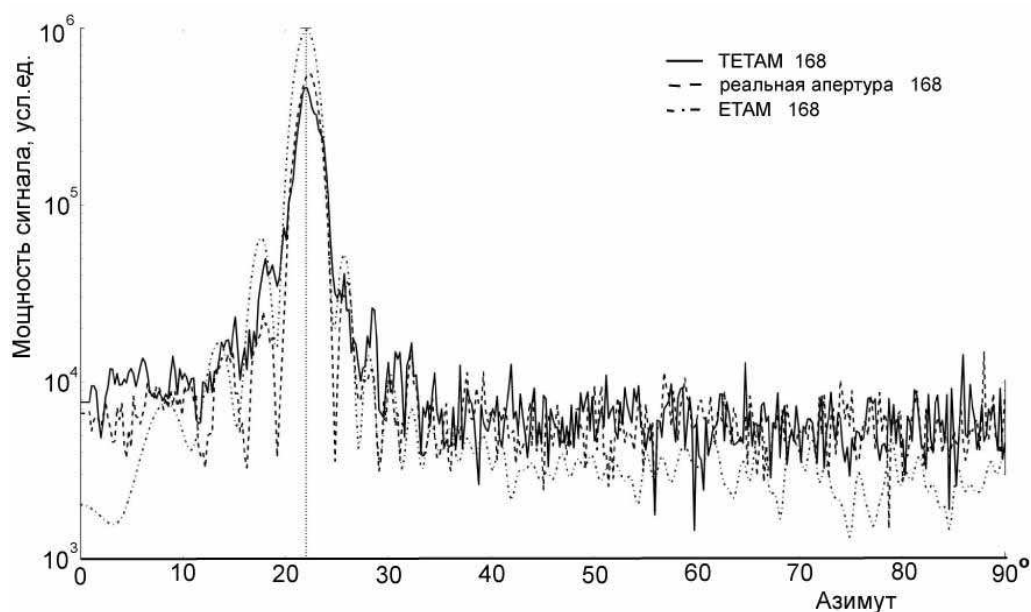


Рис. 6.

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.

Для подтверждения эффективности алгоритма ТЕТАМ проведен эксперимент с двумя целями. Его результаты представлены на рис. 7 (усл. обозн. те же, что на рис.6).

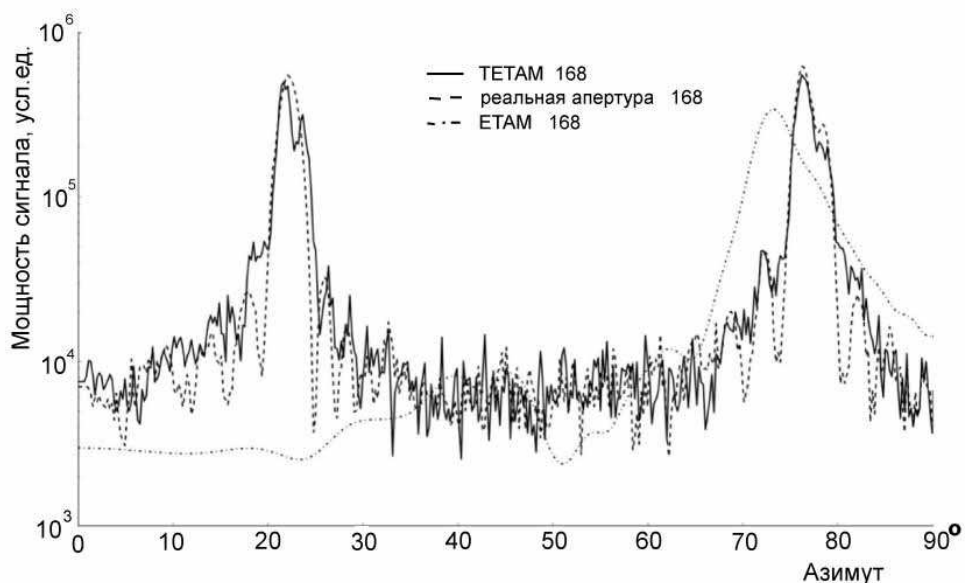


Рис. 7.

Цель № 1: пеленг 22°, частота 256 Гц. Цель № 2: пеленг 77°, частота 81 Гц. Алгоритмы: REAL, ETAM, TETAM. Хорошо видно, что алгоритм TETAM дает результаты, практически не отличимые от REAL. А вот ETAM ведет себя совершенно непредсказуемо, что и следовало ожидать.

Алгоритмы синтеза апертуры в гидроакустике весьма эффективны при необходимости обеспечения высокой мобильности – например, при использовании для буксировки антенны гидросамолета. Длина буксируемой антенны сокращается в несколько раз, вплоть до размера, позволяющего разместить ее на жестком буксируемом аппарате. Особый интерес может представить буксировка такой антенны подводной лодкой. С помощью программы SynApp был выбран наилучший алгоритм синтеза апертуры в случае одной цели (ETAM), требующий минимальной априорной информации. На его базе был разработан алгоритм синтеза TETAM, позволяющий формировать ХН для нескольких целей, излучающих взаимно некогерентные сигналы. Его работоспособность также подтверждена с помощью программы SynApp; при этом эффективность алгоритмов синтеза была показана как на тестовых, так и на реальных сигналах. При размещении антенны, используемой для синтеза, на жестком буксируемом аппарате, снабженном навигационным оборудованием, можно существенно повысить качество синтеза и соответственно улучшить параметры пеленгования целей антеннами с синтезированной апертурой по сравнению с ГПБА. Дальнейшее развитие работ по синтезу апертуры в гидроакустике будет, скорее всего, идти в направлении определения (одновременно с пеленгом) параметров движения цели – скорости, направления, что позволит при малых субапертурах исключить искажение ХН.

Авторы благодарят сотрудников ОАО «Концерн «Океанприбор», особенно заместителя генерального директора по научной работе И.А.Селезнева, за предоставление реальных гидроакустических данных, использованных в настоящей статье.

Литература

1. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: Сов. радио, 1972.
2. Yen N.-C., Carey W. Application of synthetic-aperture processing to towed-array data // J. Acoust. Soc. Am. 86 (2). August 1989.
3. Stergiopoulos S., Sullivan E.J. Extended towed array processing by an overlap correlator // J. Acoust. Soc. Am. 86 (1). July 1989.
4. Kim D., Youn H., Lee C. Temporal domain processing for a synthetic aperture array // IEEE J. Oceanic Eng. 27 (2). April 2002.
5. Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С. Методы апертурного синтеза гидроакустических антенн в пассивном режиме и их испытание на тестовых и реальных сигналах // Сб. науч. тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». 2010. № 3(9). С.72–85.
6. Левитан Б.М. Почти-периодические функции. М.: Гос.изд-во техн.-теорет. лит., 1953.
7. Язык программирования Python. <http://www.python.ru>.
8. <http://www.riverbankcomputing.co.uk/pyqt>.
9. <http://matplotlib.sourceforge.net>.
10. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и практика цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

Статья поступила в редакцию 18.05.2011 г.

