

УДК 681.883.054;551.462.8

**А.Л. Агеев, Г.А. Игумнов, В.Б. Костоусов, И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев,
Е.А. Мадисон**

**СИНТЕЗИРОВАНИЕ АПЕРТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО
ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА С КОМПЕНСАЦИЕЙ
ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ***

Рассматривается задача синтеза апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора (ГБО). Описывается алгоритм синтеза, который базируется на прогнозировании закона изменения фазы отраженного сигнала. Для уточнения траектории движения аппарата предлагается и апробируется новый метод автофокусировки. По результатам экспериментов, полученных в морских условиях с помощью аппаратно-программного комплекса «Синтез», выработаны и частично реализованы технические решения по усовершенствованию комплекса и повышению достоверности когерентного сбора и накопления многоканальных данных. Приводится описание моделирующего программного комплекса и результаты обработки модельных и реальных данных.

Синтезированная апертура; гидролокатор бокового обзора; многоканальная антенна; автофокусировка; моделирующий программный комплекс

**A.L. Ageev, G.A. Igumnov, V.B. Kostousov, I.B. Agafonov, V.V. Zolotarev,
E.A. Madison**

**APERTURE SYNTHESIZING FOR MULTICHANNEL SIDE-SCAN SONAR
WITH COMPENSATION OF TRAJECTORY INSTABILITY**

Article is devoted to synthetic aperture image construction for multichannel side-scan sonar system. Synthetic aperture processing algorithm that predicts the phase of reflected signal is described. New autofocus method for elaboration of carrier trajectory is proposed. Technical solutions for improvement of hardware-software complex "Sintez" and increase of reliability of coherent collection and accumulation of multichannel data are developed and partially implemented basing on the result of experiments conducted in sea environment. Modeling software complex and results of processing of real and model data are described.

Synthetic aperture; side-scan sonar; multichannel array; autofocus; modeling software complex.

Введение. В докладе представлены последние результаты совместных исследований ИММ УрО РАН и ИПМТ ДВО РАН, связанных с решением задачи синтеза апертуры многоканального ГБО [1–4].

К основным факторам, препятствующим работе алгоритма синтеза апертуры, относятся [2, 3]: неоднородность и изменчивость морской среды распространения звуковых волн; проблема неоднозначности измерения дальности из-за многолучевости (на мелководье); проблема траекторных неустойчивостей (траектория движения аппарата известна с недостаточной точностью).

Заметим, что в современной литературе [2] основное внимание уделяется алгоритмам, работающим в реальном времени. Эти алгоритмы используют частотное представление траекторного сигнала и быстрое преобразование Фурье. Нас здесь интересуют не столько эффективная бортовая реализация, которая будет возможна на следующих этапах работы, сколько выяснение главных проблем синтеза апертуры в конкретных аппаратных условиях и поиск способов их преодоления.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционных проектов УрО, СО, ДВО РАН № 12-С-1-1001, № 12-И-УО-03-006.

ния. Поэтому здесь описывается алгоритм, работающий в исходном пространстве сигнала, хоть и вычислительно затратный, зато логически более простой. Он предназначен для работы в лабораторных условиях с эхо-сигналом, заданным во временной области, переведенным в плоскость (x, y) .

Многоканальный ГБО и модель траекторного сигнала. Структура, основные принципы построения и технические характеристики аппаратно-программного комплекса «Синтез», разработанного для когерентного сбора и накопления многоканальных данных, приведены в [3]. Комплекс был модифицирован, улучшены его характеристики, сведения о которых и возможности дальнейшего усовершенствования изложены в конце доклада.

Предельная дальность R_{\max} работы ГБО определяется отношением сигнал/шум, которое, в частности, зависит от мощности передатчика. Кроме того, в случае синтезирования апертуры при определении дальности действия системы надо учитывать следующие важные обстоятельства [4]. При увеличении дальности R_{\max} , с одной стороны, для обеспечения заданного разрешения Δu должна пропорционально увеличиваться длина интервала синтезирования. С другой стороны, для обеспечения минимально необходимой частоты дискретизации по u (преодоление эффекта «range ambiguity») скорость носителя должна ограничиваться сверху величиной $V_{\max} = (cL) / (4R_{\max})$, где L – суммарная длина ячеек приемной антенны. Таким образом, увеличение количества приемных ячеек позволяет при прочих равных условиях работать на более высоких скоростях движения носителя при осуществлении обзора на заданной дальности. Увеличение скорости благотворно влияет не только на общую производительность обзорно-поисковой работы, но и на точность и устойчивость движения по заданной траектории, что необходимо для успешного функционирования алгоритма синтезирования апертуры.

Математическая модель траекторного сигнала. Рассмотрим модель траекторного ЛЧМ-сигнала многоканального НЧ ГБО, следуя принятой в литературе методике (например, [6]). Описывать будем плоский случай, поскольку для относительно больших дальностей порядка сотен метров и при относительно малой высоте движения над поверхностью дна приближенно можно полагать, что изображение формируется в горизонтальной плоскости Oxy . Пусть на плоскости Oxy определено комплекснозначное поле отражения $ff(x, y)$, восстановление которого по траекторному сигналу и будет целью алгоритма синтезирования.

Пусть программная траектория носителя совпадает с осью Oy . Ось Ox направлена в сторону посылки сигнала ГБО, т.е. в сторону наблюдения. Траекторный сигнал ГБО формируется, как обычно, путем последовательного приема отраженных посылок импульсного ЛЧМ-сигнала в заданные моменты времени, которым соответствует текущая координата u , взятая вдоль движения. Такие посылки, отвечающие координате u , для краткости будем называть u -посылками. Будем рассматривать задачу восстановления поля для фиксированного отражателя, расположенного в точке (x_0, y_0) . Тогда центр участка траектории синтезирования расположен в точке y_0 (начало отсчета для переменной u). Введем переменную t , имеющую смысл времени прихода отраженного отклика $e(t, u)$ для каждой u -посылки. Геометрически ось t расположена параллельно оси x .

Обозначим сформированный передатчиком импульсный ЛЧМ-сигнал через $p(t)$. Тогда модель принятого траекторного сигнала от m -го канала в случае невозмущенной траектории движения носителя имеет вид [5]:

$$e_m(t, u) \approx \iint ff(x, y) p\left(t - \frac{2}{c} r_m(u, x, y)\right) dx dy, \quad r_m(u, x, y) = \sqrt{x^2 + (y - u_m)^2} \quad (1)$$

Здесь $u_m = u - (m - 4)d$ – u -координата фазового центра m -й приемной ячейки, c – скорость распространения сигнала. В модели (1) не учитывается амплитудная модуляция диаграммой направленности антенны, а эффект уменьшения амплитуды отраженного сигнала за счет увеличения дальности включен в функцию ff , поскольку эти эффекты не играют существенной роли для алгоритма синтеза [5].

Восстановление значения поля $ff(x_0, y_0)$ производится на основе закона изменения фазы φ траекторного сигнала [2]. Фаза вычисляется по формуле $\varphi = 2k \cdot r(u, x_0, y_0)$, где $r(u, x_0, y_0)$ – расстояние от фазового центра приемной антенны до отражателя, $k = 2\pi f / c$ – волновое число.

С учетом операций ЛЧМ-сжатия и демодуляции алгоритм имеет вид

$$\tilde{ff}(x, y) = \iint s(t, u) \exp\left(-j \frac{2\pi c}{\lambda} \left(t - \frac{2}{c} r(u, x, y)\right)\right) dudt, s(t, u) = (e(t, u) * p(t)) \exp(-j\omega_0 t), \quad (2)$$

и работает с комплексной огибающей $s(t, u)$ траекторного сигнала. Здесь символ $*$ означает операцию свертки по переменной t .

Реальное движение носителя во время синтеза отличается от программной траектории. Фаза огибающей траекторного сигнала при этом смещается на величину: $\delta\varphi(u, x_0, y_0) = 2(\omega/c) \cdot \delta r$, где $\delta r = r_1(u, x_0, y_0) - r(u, x_0, y_0)$ и $r_1(u, x_0, y_0)$ – расстояние от реального положения фазового центра до точки (x_0, y_0) . Фазовая ошибка $\delta\varphi$, возникающая за счет траекторных нестабильностей, является главным препятствием для успешной работы алгоритма (2). Задача метода обработки в первую очередь состоит в оценке этой ошибки.

Методы обработки траекторного сигнала. Рассмотрим основные этапы обработки траекторного эхо-сигнала (1), получаемого многоканальным НЧ ГБО. При описании будем использовать обозначения, введенные в предыдущем разделе. Метод синтеза апертуры включает следующие крупные этапы:

1. *Предварительный этап.* Этап включает ЛЧМ-сжатие исходного сигнала $e_m(t, u)$ и построение комплексной огибающей $s_m(t, u)$ отраженного сигнала с помощью преобразования Гильберта и демодуляции. На этом этапе также производится первоначальное построение траектории движения центра приемной антенны и ее угловой ориентации по данным бортовой навигационной системы.
2. *Этап микронавигации* [6]. Это этап для уточнения траектории движения линейки фазовых центров («грубая» оценка δr (4) с помощью модифицированного метода «избыточного фазового центра» (RPC – *Redundant Phase Center method*). Здесь также формируется единая последовательность строк «выправленного» на прямую линию траекторного эхо-сигнала по переменной u (взятой вдоль направления движения). При этом производится «слияние» сигналов приемных каналов в общую последовательность u -строк.
3. *Этап автофокусировки* – дополнительное уточнение траекторной ошибки δr (4) и синтез (3) с фазовой коррекцией $\delta\varphi$. Автофокусировка и синтез могут повторяться итеративно. Подробно обработка сигнала рассмотрена в [1].

Алгоритм был успешно опробован на модельных данных и подтвердил свою работоспособность при наличии траекторных отклонений в пределах одной длины волны λ .

Опишем разработанный программный комплекс «Sonar Imaging», предназначенный для моделирования траекторных эхо-сигналов многоканального ГБО и исследования алгоритмов синтеза апертуры. В программном комплексе реализованы следующие функции:

1. Моделирование поля отражения $ff(x, y)$ (сцена).
2. Моделирование отраженного ЛЧМ-сигнала многоканального ГБО $e_m(t, u)$ (формула (1)) с учетом траекторных нестабильностей.
3. Реализованы обработка и синтезирование отраженного сигнала.
4. Визуализация исходных данных и результатов обработки и управление визуализацией.
5. Обработка реальных данных.

Для реализации комплекса был выбран язык программирования C++ с использованием открытой кросс-платформенной библиотеки Qt, разрабатываемой фирмой Digia, для построения пользовательского интерфейса, и открытой библиотеки FFTW для быстрого преобразования Фурье. Более подробное описание программного комплекса приведено в [1].

Результаты численных экспериментов. Приведем результаты численного моделирования траекторного сигнала многоканального НЧ ГБО и результаты обработки модельного сигнала с целью синтеза апертуры антенны. Параметры модели соответствуют параметрам макетного образца многофункционального комплекса «Синтез».

На данный момент в моделирующем комплексе «Sonar Imaging» реализовано три вида траекторных искажений:

- ◆ движение по синусоиде с заданными амплитудой и периодом;
- ◆ движение «лесенкой» с мгновенными сдвигами носителя по оси Ox с заданной амплитудой, моделирующее кратковременные сносы;
- ◆ движение с нарастающим сдвигом аппарата вдоль оси Ox , моделирующее постоянный снос, например, под воздействием течения.

В дальнейшем планируется реализовать возможность совмещения этих вариантов для создания более сложных траекторий.

Моделирование траекторного сигнала проводилось при следующих характеристиках траекторных нестабильностей:

- ◆ угловое положение носителя задано с точностью не хуже $0,5^\circ$;
- ◆ относительная ошибка по скорости носителя не более 1 %.

Было проведено моделирование на сцене с двумя точечными отражателями, расположенными на расстоянии 0,15 м друг от друга вдоль направления движения. Дальность до отражателя составляет 55 м, скорость движения – 1 м/с, период посылки – 150 мс. Траекторные нестабильности характеризуются следующими параметрами: движение «лесенкой» имеет на интервале синтеза два сдвига по 0,15 м каждый. При таких параметрах удалось восстановить траекторию, провести синтезирование и получить изображение с разрешением не менее 0,3 м вдоль траектории движения и 0,15 м по дальности.

Результаты моделирования иллюстрируются на рис. 1.

Развитие аппаратно-программного комплекса «Синтез». При подготовке к экспедиционному сезону 2012 г. внимание было сосредоточено на следующих основных задачах:

- 1) обеспечение более точного позиционирования антенн;
- 2) повышение стабильности работы цифровой части системы;
- 3) комплексная оценка когерентности антенны и приемо-передающего тракта.

Для решения первой задачи была модифицирована платформа с размещенными на ней антеннами. Взаимное положение приемной и передающей антенн было изменено и достигнута более строгая симметрия положения активной части передающей антенны относительно фазового центра антенны приемной. Введены узлы оперативной регулировки углов наклона обеих антенн в вертикальной плоскости, что позволило более точно совместить в пространстве зону облучения и зону максимума чувстви-

тельности в режиме приема. Также была изменена конфигурация и схема соединения пьезоэлементов в передающей антенне. Последнее обеспечило более точное согласование формы диаграмм направленности (ДН) передающей антенны и ДН каждой из ячеек приемной антенны. Помимо решения основной задачи, модифицированная антенная платформа обеспечила более устойчивое движение носителя при малых скоростях буксировки, что благоприятно сказалось на качестве записываемых эхолокационных данных. На рис. 2 представлен внешний вид буксируемого устройства с модифицированным макетом антенной платформы.

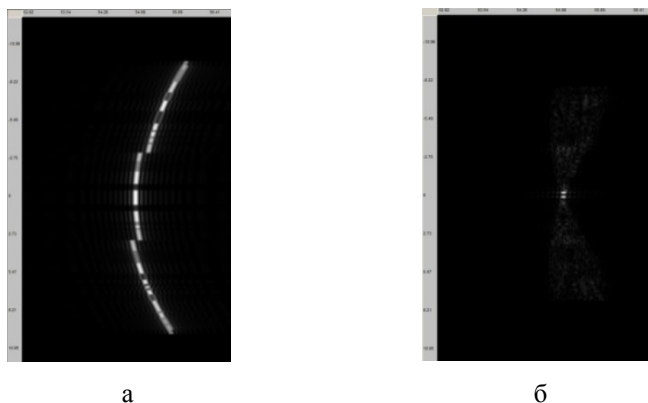


Рис. 1. Результат синтезирования апертуры на дальности 55 м при траекторном искажении типа «ступенька»: а – ГБО-изображение реальной апертурой одного канала двух близко расположенных точечных отражателя при траекторном искажении на интервале синтезирования; б – синтезированное изображение двух близких точечных отражателей, расстояние между которыми 30 см



Рис. 2. Внешний вид буксируемого устройства с модифицированным макетом антенной платформы

Повышение стабильности работы цифровой части системы было достигнуто путем введения многопоточной архитектуры в программное обеспечение сбора данных. Текущая реализация обеспечивает устойчивую работу системы и запись восьмиканальной эхолокационной информации на скорости 5,86 МБ/с. При этом предполагается, что при масштабировании системы и увеличении числа каналов до 16 существенных изменений в ПО не понадобится.

Когерентность всех акустических каналов всегда была одним из основных требований при разработке комплекса «Синтез». Очевидно, что ключевым компонентом при обеспечении когерентности является приемная антенна. Для ее совершенствования было проведено исследование фазовых характеристик ячеек антенны в рабочем диапазоне азимутальных углов приема. Необходимость адекватного измерения взаимных фазовых соотношений по каналам потребовала соблюдения ряда условий. Ввиду практической невозможности выполнять измерения в поле плоского волнового фронта, измерения в испытательном бассейне проводились с акустическим излучателем, формирующим сферический фронт, близкий к идеальному, что достигалось следующим образом:

- а) излучатель был изготовлен на базе сферического пьезоэлемента, размер которого $d_n = 15 \text{ мм}$ не превышал длины волны λ (в воде для частоты 80 кГц $\lambda \approx 19 \text{ мм}$);
- б) расстояние от излучателя до середины приемной антенны L было установлено равным 2,53 м, при этом любая ячейка приемной антенны заведомо находилась в дальней зоне поля излучателя (зоне дифракции Фраунгофера $2 \cdot d_n^2 / \lambda \approx 0,05 \text{ м} \ll L$).

На рис. 3.а представлены графики разностей фаз между выходными сигналами 1-й и 2-й, 1-й и 3-й, ..., 1-й и 8-й ячеек приемной антенны. Номера пар ячеек отмечены по горизонтальной оси, значения разности фаз (в радианах) отложены по вертикальной оси. Прямые измерения сделаны для 8-ми значений угла поворота приемной антенны от 0° до 7° (в одну сторону) и нанесены на координатную плоскость в виде 8-ми сплошных черных кривых. Кривизна графиков обусловлена в первую очередь сферичностью волнового фронта от измерительного излучателя.

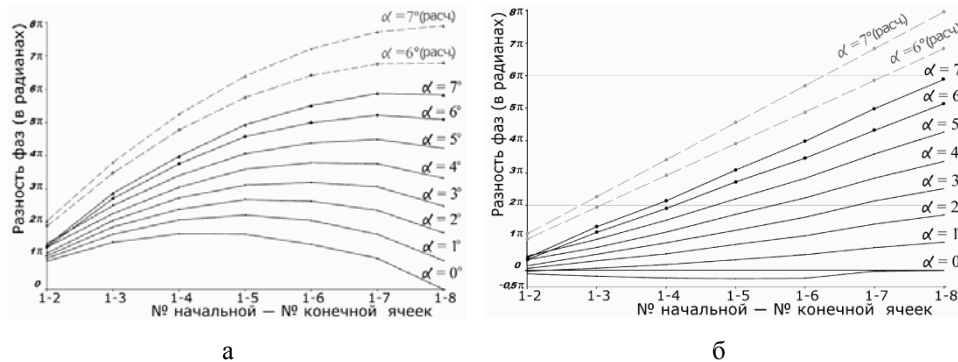


Рис. 3. Графики разностей фаз: а – разности фаз между выходными сигналами 1-й и 2-й, 1-й и 3-й, ..., 1-й и 8-й ячеек приемной антенны, фронт падающей волны – сферический; б – разности фаз полученные в результате «спрямления» волнового фронта путем соответствующего пересчета хода лучей

На рис. 3,б представлены графики этих же разностей фаз, полученные в результате «спрямления» волнового фронта путем соответствующего пересчета хода лучей. В первом приближении графическое представление результата пересчета сферического фронта в плоский кажется тривиальным. Действительно, для эквидистантной линейной многоканальной антенны графики для всех углов ее поворота относительно плоского волнового фронта должны представлять собой прямые линии, сходящиеся в одну точку на оси абсцисс. В целом такая тенденция и прослеживается, при этом отклонения от линейности можно объяснить погрешностями измерений.

Как видно из рис. 3,а,б, расхождение модельных (красные пунктирные линии) и экспериментальных (черные сплошные линии) результатов весьма велико. Например, при $\alpha = 7$ фаза на 8-й ячейке в реальности отстает от фазы на 1-й ячейке не на 8λ , как этого требует теория, а всего на $5,9\lambda$. Для простоты показаны лишь графики, промоделированные для углов поворота антенны $\alpha = 6^\circ$ и 7° .

Анализ результатов измерений и их сравнение с результатами моделирования показывает наличие в поведении фазы как случайной, так и систематической составляющей. Случайную составляющую, связанную преимущественно с погрешностями измерений, можно уменьшить путем совершенствования измерительного стенда и его юстировки. Для уменьшения систематической составляющей в расхождении модели с экспериментом требуются изменения в конструкции антенны.

На основе сказанного можно сделать следующий практический вывод. Учитывая почти линейную зависимость в поведении фазовых задержек на приемных ячейках многоканальной антенны целесообразно ввести в расчеты по синтезированной поправочный коэффициент к геометрическим параметрам реальной приемной антенны.

Кроме антенны, однако, на когерентности данных сказываются и другие узлы приемно-передающего тракта. В частности, интерес представляет и когерентность платы многоканального АЦП. Для ее оценки был использован метод определения сдвига фазы синусоидального сигнала, использующий преобразование Гильберта. Результаты оценки для трех итераций приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, разность фазы между первым и каждым из остальных каналов не превышает $0,3^\circ$. Столь незначительное изменение фазы конечно относится к эффектам второго порядка. Однако эти знания позволяют более полно судить о когерентности системы в целом. Кроме того, введение полной фазовой корректировки для цепочки антенна – кабель – аналоговый блок – модуль АЦП предположительно даст лучшие результаты, чем корректировка только погрешностей антенны.

Таблица 1

Результаты оценки когерентности четырехканального модуля АЦП (градусы)

	1-1	1-2	1-3	1-4
1	0	0,219185	-0,22865	0,299801
2	0	0,219477	-0,22846	0,300067
3	0	0,219712	-0,2283	0,300302

Визуально определить степень когерентности системы можно путем синфазного суммирования всех приемных каналов. Эффект синтезирования при этом начинает проявляться, если разность по фазе между каналами не превышает $1/8$ длины волны [6]. На рис. 4 показан результат подобной обработки экспериментальных данных, записанных в 2012 г. Хорошо видно, что на изображении (б) протяженные объекты «сворачиваются» и детализация изображения повышается, что говорит о сужении диаграммы направленности и соответственно достаточной когерентности системы.

Заключение. Результаты проведенных исследований с использованием программного комплекса «Sonar Imaging» и программно-аппаратного комплекса «Синтез» дают оптимистические оценки для создания многоканального ГБО с синтезированной апертурой. В работе выполнен полный цикл моделирования траекторного сигнала, позволяющий с учетом особенностей носителя ГБО и внешней среды получить синтезированные гидролокационные изображения высокого разрешения. В алгоритме синтезирования апертуры ГБО реализованы операции предварительной обработки, микронавигации и автофокусировки, устойчивые по отношению к опре-

деленному классу траекторных нестабильностей. Все составляющие алгоритма прошли апробацию на модельных данных и подтвердили ожидаемые характеристики синтезированного изображения. Вместе с тем проведенные сравнения модельных и экспериментальных данных в отношении взаимных фаз отдельных ячеек приемной антенны показали их значительное расхождение, что свидетельствует о необходимости коррекции результатов моделирования, используя геометрические пропорции реальной антенны и антенны, закладываемой в процедуру синтеза.

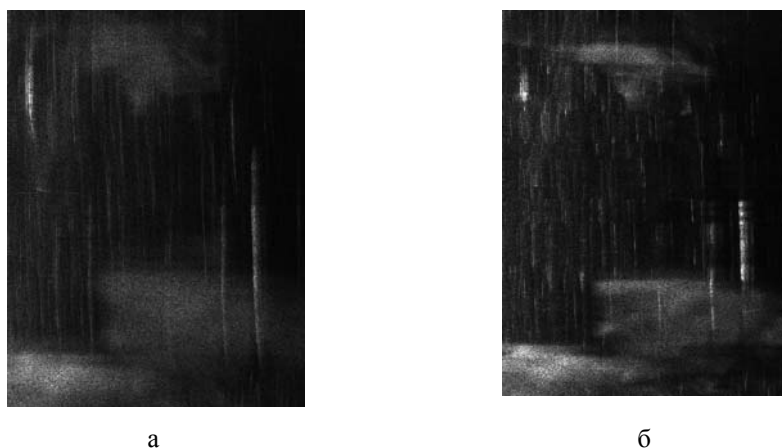


Рис. 4. Фрагменты эхограммы: а – результат ЛЧМ-сжатия данных одного из каналов; б – результат синфазного суммирования всех восьми каналов и последующего ЛЧМ-сжатия

В качестве перспективных направлений исследований следует отметить:

- ◆ развитие модели формирования траекторного сигнала в части построения и программной реализации траекторных нестабильностей, навигационных и динамических ошибок;
- ◆ исследование методов и разработка алгоритмов распознавания синтезированных ГБО-изображений: требуется создание устойчивых и эффективных специализированных алгоритмов обнаружения и локализации (точечных, линейных и площадных) объектов на синтезированных изображениях;
- ◆ разработка антенной системы с увеличением числа каналов приемного тракта при снижении фазовых погрешностей, обусловленных ее конструктивными особенностями;
- ◆ разработка средств, позволяющих перенести процедуры вторичной обработки с программного уровня на уровень первичной обработки в сигнальном процессоре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев А.Л., Игумнов Г.А., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2 (14). – С. 15-29.
2. Костоусов В.Б., Костоусов А.В. Моделирование ГБО с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – № 2 (6). – С. 16-29.
3. Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Анализ применимости первичных гидролокационных данных для синтеза апертуры антенн // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – № 1 (11). – С. 32-40.

4. *Roy Edgar Hansen (2011). Introduction to Synthetic Aperture Sonar, Sonar Systems / Ed. Prof. Nikolai Kolev // ISBN: 978-953-307-345-3. [Electronic resource]. URL: <http://www.intechopen.com/books/sonarsystems/introduction-to-synthetic-aperture-sonar>.*
5. *William W. Bonifant, Jr. Interferometric synthetic aperture sonar processing: a thesis presented to The Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering // Georgia Institute of Technology, 1999.*
6. *Callow H.J. Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement: a thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronic Engineering at the Univ. of Canterbury. // Christchurch, New Zealand, 2003.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.В. Прохоров.

Агеев Александр Леонидович – Институт математики и механики Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: ageev@imm.uran.ru; 620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 16; тел.: 83433628194; д.ф.-м.н.; отдел некорректных задач анализа и приложений; зав. отд.

Игумнов Глеб Александрович – e-mail: g.a.igumnov@gmail.com; тел.: 83433753471; отдел прикладных проблем управления; ведущий программист.

Костоусов Виктор Борисович – e-mail: vkost@imm.uran.ru; тел.: 83433753445; к.ф.-м.н.; отдел некорректных задач анализа и приложений; зав. отд.

Агафонов Илья Борисович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: iks@marine.febras.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А; тел.: 84232215545; доб. 409; лаборатория гидролокационных систем; м.н.с.

Золотарев Владимир Витальевич – e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru; тел.: 84232215545, доб. 416; к.т.н.; лаборатория гидролокационных систем; заведующий.

Мадисон Евгений Александрович – e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru; тел.: 84232215545, доб. 409; лаборатория гидролокационных систем; стажер-исследователь.

Ageev Aleksandr Leonidovich – Institute Of Mathematics And Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy Of Sciences; e-mail: ageev@imm.uran.ru; 16, S. Kovalevskaja street, 620990, Ekaterinburg, Russia; phone: +73433628194; dr. of phis.-math. sc.; the department of ill-posed problems of analysis and applications; head.

Igumnov Gleb Aleksandrovich – e-mail: g.a.igumnov@gmail.com; phone: +73433753471; a problems of control department; leading programmer.

Koustousov Viktor Borisovich – e-mail: vkost@imm.uran.ru; phone: +73433753445; cand. of phis.-math. sc.; applied problems of control department; head.

Agafonov Ilya Borisovich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: iks@marine.febras.ru; 5A, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +74232215545, ext. 409; laboratory of sonar systems; researcher.

Zolotarev Vladimir Vitalyevich – e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru; phone: +74232215545, ext. 416; can. of eng. sc.; laboratory of sonar systems; head.

Madison Evgeniy Aleksandrovich – e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru; phone: +74232215545, ext. 409; laboratory of sonar systems; researcher.