

**АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА
В ГИДРОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ
АНТЕННЫ**

Предложен основанный на современных методах цифровой обработки сигналов обобщенный алгоритм формирования траекторного сигнала в гидролокаторе с синтезированием апертуры, имеющем одноэлементную излучающую и многоэлементную приемную антенны. Алгоритм производит внутриканальную и межканальную обработку и включает дискретизацию по времени и квантование по уровню принятых эхосигналов, цифровое формирование отсчетов квадратурных составляющих в частотной области, согласованную фильтрацию комплексных огибающих в частотной области методом «быстрой» свертки, коррекцию фазы отсчетов временной последовательности сигнала по данным бортовой навигационной системы, компенсацию незначительных траекторных нестабильностей корреляционным методом и объединение приемных каналов.

Гидролокатор, синтезирование апертуры антенны, цифровая обработка сигналов.

Panychev Andrey Ivanovich

AN ALGORITHM OF TRAJECTORY SIGNAL GENERATION IN A SYNTHETIC APERTURE SONAR

A generalized algorithm for a trajectory signal formation in a synthetic aperture sonar with single-element radiating and multi-element receiving antenna based on modern digital signal processing methods is proposed. The algorithm performs in-channel and cross-channel processing and includes time sampling and level quantization of received echo signals, digital forming of signal quadrature components in the frequency domain, coordinated filtering of complex envelopes in the frequency domain by the "fast" convolution method, phase correction of time sequence samples of the signals according to the data of the onboard navigation system, compensation for minor trajectory instabilities by the correlation method and combining of the receiving channel signals.

Sonar, antenna aperture synthesis, digital signal processing.

Введение

Гидролокаторы с синтезированием апертуры антенны (ГСА, в англоязычной литературе SAS – synthetic aperture sonar) совмещают высокую угловую (азимутальную) разрешающую способность гидролокатора с максимально возможной дальностью его действия при минимальных физических размерах устройства. ГСА обеспечивают качество гидролокационных изображений (ГЛИ), недостижимое в традиционных обзорных гидролокаторах и позволяющее обнаруживать и классифицировать малоразмерные и малозаметные донные объекты [1–7].

Анализ алгоритмов обработки сигналов в ГСА

Современные активные ГСА излучают зондирующий ЛЧМ сигнал одним слабонаправленным антенным элементом, а прием отраженного сигнала производят многоэлементной линейной антенной. Такой подход позволяет получить достаточно большую однозначно измеряемую дальность при приемлемой скорости носителя, в качестве которого обычно используются различные типы автономных и телеуправляемых необитаемых подводных и надводных аппаратов [1–7].

Алгоритм функционирования ГСА можно условно разделить на три части:

- 1) формирование траекторного сигнала;
- 2) синтезирование апертуры;
- 3) построения ГЛЛИ.

Алгоритм начинается с предварительной обработки сигналов в независимых элементарных приемных каналах, в процессе которой формируются комплексные огибающие, производится согласованная фильтрация и весовая обработка эхосигналов. Далее для обеспечения высокого разрешения ГСА, определяемого точностью фазовых соотношений сигналов на участке синтезирования, выполняется компенсация траекторных нестабильностей носителя, которая может содержать до трех этапов:

- «грубая» коррекция на основе данных навигационного оборудования, вспомогательных датчиков, дополнительных антенн;

- «точная» коррекция на основе корреляционных методов анализа сигналов, соответствующих одному пространственному положению элементов антенны на двух соседних зондированиях;

- «прецизионная» коррекция методами автофокусировки ГЛЛИ.

Формирование траекторного сигнала завершается объединением каналов, которое совмещает в единую матрицу сигналы, принятые отдельными элементами антенны ГСА на всех зондированиях и подвергнутые обработке, требуемой используемым методом синтезирования апертуры.

Алгоритм формирования траекторного сигнала ГСА

Одним из основных направлений совершенствования ГСА является достижение быстродействия, позволяющего формировать ГЛЛИ в реальном масштабе времени. Задача решается комплексно аппаратно-программными средствами, алгоритмы обработки сигналов при этом играют существенную роль.

Как правило, выполнение внутриканальной предварительной обработки сигналов в темпе поступления эхосигналов не вызывает затруднений. В то время как продолжительность следующих этапов обработки сигналов в ГСА существенно зависит от числа элементов приемной антенны, точности бортового навигационного комплекса, стабильности параметров движения носителя, метода синтезирования апертуры.

Очевидно, максимальное быстродействие ГАС способны обеспечить методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС). На рис. 1 при-

ведена структурная схема алгоритма формирования траекторного сигнала, в основе которого лежит ЦОС.

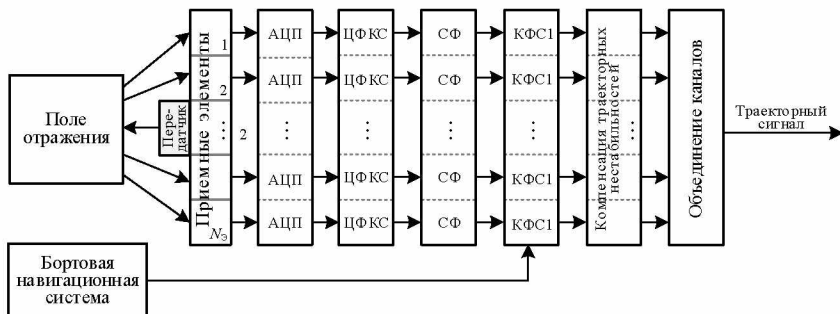


Рис. 1. Структурная схема алгоритма формирования траекторного сигнала ГСА

Внутриканальная обработка эхосигналов выполняется независимо в каждом из N_3 приемных каналов на каждом зондировании в реальном масштабе времени и включает:

- дискретизацию по времени и квантование по уровню с помощью АЦП;
- цифровое формирование квадратурных составляющих (ЦФКС) во временной области;
- согласованную фильтрацию (СФ) комплексных огибающих эхосигналов;
- коррекцию фазы сигналов (КФС1) по данным бортовой навигационной системы.

Межканальная обработка сигналов начинается со второго зондирования и включает:

- компенсацию траекторных нестабильностей (КТН), которая выполняется в темпе поступления эхосигналов;
- объединение каналов, для которого требуется предварительное накопление по всем зондированиям прошедших предыдущие этапы обработки эхосигналов, и которое выполняется за время, составляющее несколько периодов повторения зондирующих сигналов.

Таким образом, время формирования траекторного сигнала ГСА практически равно времени накопления сигналов в приемных каналах на

участке синтезирования и составляет от единиц до нескольких десятков секунд.

Эффективные методы и приемы ЦОС, использующие БПФ и позволяющие формировать траекторный сигнал в темпе реального времени, следующие.

На этапе внутриканальной обработки используются [8]:

- цифровое формирование отсчетов квадратурных составляющих эхосигналов во временной области с использованием стробоскопического эффекта при их дискретизации и двух цифровых фильтров нижних частот, работающих с децимацией выходных отсчетов;
- согласованная фильтрация комплексных огибающих сигналов в частотной области методом «быстрой» свертки;
- «грубая» коррекция фазы сигналов в частотной области.

Этап межканальной обработки начинается «точной» компенсацией траекторных нестабильностей носителя ГСА методом смещенных фазовых центров антенны (Displaced Phase Centers Antenna, DPCA), называемой «микронавигацией» [9–11]. Метод DPCA основан на переходе от бистатической гидролокации к моностатическому приближению, что позволяет существенно сократить вычислительные затраты синтезирования апертуры при приемлемом ухудшении разрешения по путевой дальности [1–3]. Структурная схема алгоритма микронавигации приведена на рис. 2.

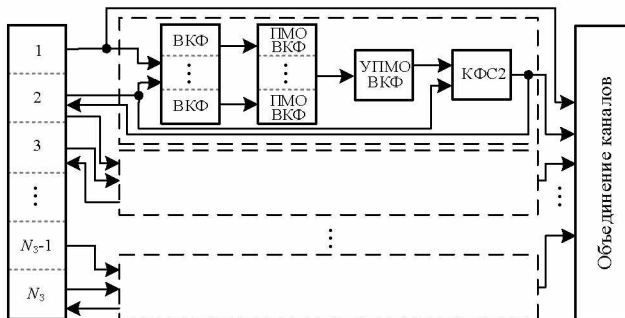


Рис. 2. Структурная схема алгоритма компенсации траекторных нестабильностей носителя ГСА

Алгоритм микронавигации начинает работать со второго зондирования и повторяется до последнего зондирования N_3 .

Тело цикла алгоритма содержит следующие процедуры:

- выбор двух последовательных зондирований, начиная с первого;
- формирование пар приемных каналов, соответствующих перекрывающимся фазовым центрам приемных элементов антенной решетки на двух последовательных зондированиях; количество пар определяется скоростью движения носителя ГСА;

- вычисление взаимных корреляционных функций (ВКФ) сигналов в сформированных парах приемных каналов методом «быстрой» свертки в частотной области;

- вычисление уточненного положения максимального по модулю отсчета (ПМО) ВКФ каждой пары приемных каналов методом центроида, которое характеризует вызванную флуктуациями движения разницу между задержками сигналов, принятых в одной и той же точке траектории на двух последовательных зондированиях;

- вычисление усредненного положения максимального по модулю отсчета (УПМО) на наборе ВКФ всех пар приемных каналов, которое характеризует вызванную флуктуациями движения разницу между задержками сигналов во всех приемных каналах антенной решетки на двух последовательных зондированиях;

- коррекция фазы отсчетов сигналов (КФС2) второго зондирования во всех приемных каналах по вычисленной усредненной разнице задержек на двух соседних зондированиях и замена исходного эхосигнала скорректированным;

- смещение на следующее зондирование.

Таким образом, алгоритм микронавигации корректирует фазы сигналов всех приемных каналов на всех зондированиях, кроме первого. Положение антенны на первом зондировании принимается за эталонное. Особенностью алгоритма «тонкой» компенсации траекторных нестабильностей является то, что информация о флуктуациях положения носителя ГСА извлекается из самих эхосигналов.

Алгоритм объединения каналов включает выполнение:

- перехода в частотно-волновую область, используемую « $\omega-k$ »-методом синтеза апертуры [1-3];

- фазовой коррекции сигналов в частотной области для минимизации ошибки моностатической аппроксимации, которая существенна для десяти- и более многоэлементной приемной антенны [1];

- объединения сигналов приемных каналов для формирования матрицы траекторного сигнала в частотно-волновой области;

- весовой обработки траекторного сигнала по «быстрому» (наклонной дальности) и «медленному» (путевой дальности) времени для повышения четкости ГЛИ.

Выводы

Рассмотренный алгоритм формирования траекторного сигнала в ГСА основан на эффективных методах и приемах ЦОС, таких как использование стробоскопического эффекта при выборе частоты дискретизации, цифровое формирование квадратурных составляющих, корреляционная обработка в частотной области методом «быстрой» свертки, фазовая коррекция сигналов в частотной области. Это позволяет выполнить подготовительные к синтезированию апертуры процедуры в темпе поступления экосигналов, что существенно уменьшает время постобработки накопленных на участке синтезирования данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bonifant W.W.* 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.
2. *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.
3. *Hansen R.E.* Introduction to Synthetic Aperture Sonar, Sonar Systems / Ed. Prof. N. Kolev // Tech. 2011. ISBN 978-953-307-345-3. [Electronic resource]. URL: <http://www.intechopen.com/books/sonarsystems/introduction-to-synthetic-aperturesonar> (дата обращения: 11.05.2024 г.).
4. *Золотарев В.В.* Гидролокаторы с синтезированной апертурой для автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – №1(3). – С.12-20.
5. *Костоусов А.В., Костоусов В.Б.* Моделирование ГБО с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. – №2(6). – 2008. – С.16-29.
6. *Агеев А.Л., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В.* Моделирование и обработка траекторного сигнала гидролокатора с синтезированной апертурой // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2009. – Т. 3. – С. 351-355.

7. Агеев А.Л., Изумнов 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.13-27.

8. Маркович И.И. Реализация алгоритмов цифрового формирования квадратурных составляющих в локационных комплексах различного назначения. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2006. – №6. – С.16-21.

9. *Andrea Bellettini and Marc A. Pinto*, Theoretical Accuracy of Synthetic Aperture Sonar Micronavigation Using a Displaced Phase-Center Antenna IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 27, No. 4, October 2002, pp. 780-789.

10. *Bellettini, A. and Pinto, M. A.* (2000). Experimental investigation of synthetic aperture sonar Micronavigation, Proceedings of the Fifth ECUA 2000, Lyon, France, (445–450).

11. *Bellettini, A. and Pinto, M. A.* (2002). Accuracy of SAS micronavigation using a displaced phase centre antenna: theory and experimental validation, Saclantcen report, SR-355, 24 p.

Панычев Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: aipanychev@sfnedu.ru.

Panychev Andrey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate Professor of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per., Taganrog, Russia, 347922, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: aipanychev@sfnedu.ru.