

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ В СИСТЕМЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

© 2023

С. Н. Гусев кандидат технических наук, начальник лаборатории;
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург;
gusev_sn@mail.ru

А. В. Мороз старший научный сотрудник;
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург;
yka@mil.ru

Изложены основные принципы определения тангенциальной скорости быстроходных судов в системе цифровой обработки траекторного сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с амплитудно-фазовым программным дискриминатором в канале азимута. Предложен комплекс алгоритмов оперативного определения параметров движения быстроходных судов с помощью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны. Приведены результаты полунатурных экспериментов, подтверждающие работоспособность алгоритмов и их эффективность при решении задачи мониторинга морской поверхности.

Радиолокатор с синтезированной апертурой; радиолокационное изображение; селекция движущихся целей; тангенциальная скорость; амплитудно-фазовый дискриминатор

Цитирование: Гусев С.Н., Мороз А.В. Комплекс алгоритмов оперативного определения параметров движения быстроходных судов в системе цифровой обработки траекторного сигнала космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 145-157. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-145-157

Введение

Современные тенденции использования морского флота и морских перевозок свидетельствуют о возросшей необходимости контроля морской обстановки как в глобальном масштабе, так и в зонах особого внимания (пограничные территориальные зоны, морские зоны на направлениях незаконной миграции и рыболовства, арктическая зона, экономические зоны интересов Российской Федерации) [1; 2]. Географическое расположение этих зон и актуальность их контроля как в обеспечении безопасности, так и в интересах предотвращения возможной агрессии требуют привлечения средств космического наблюдения.

Одним из основных средств космического наблюдения морской поверхности являются космические аппараты (КА) с радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА), позволяющие в любых погодных условиях (облачности, полярных ночей) и в любое время суток получать радиолокационные изображения (РЛИ) морской поверхности, обнаруживать и распознавать надводные объекты, а также определять параметры их движения [3; 4; 5].

Однако использование КА с РСА имеет один существенный недостаток – низкую оперативность получения информации потребителем (при стандартных методах обработки радиолокационных данных время получения потребителем информации об объектах в интересующем секторе обзора составляет от нескольких часов до суток). Указанное время получения информации не удовлетворяет требованиям потребителей вследствие быстрого устаревания информации об их курсе и прогнозируемом местопо-

ложении. Особенно остро данная проблема наблюдается при решении задач мониторинга быстроходных судов (БС), получивших в последнее время широкое применение.

Таким образом, в практике радиолокации складывается противоречие между необходимостью повышения оперативности определения параметров движения БС, с одной стороны, и недостаточной оперативностью решения этой задачи существующими системами цифровой обработки сигналов (ЦОС) РСА, с другой стороны.

Экстенсивные методы решения указанной проблемы, такие как наращивание орбитальной группировки КА с РСА и увеличение расчётных мощностей бортовых вычислительных комплексов, связаны с большими временными и финансовыми затратами. Альтернативным методом является оптимизация алгоритмов обработки, в частности, применение в системе ЦОС космических РСА амплитудно-фазового программного дискриминатора (АФПД) в канале азимута, который позволяет обрабатывать РЛИ в режиме времени, близком к реальному.

Соответственно актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки комплекса алгоритмов оперативного определения параметров движения БС в системе ЦОС РСА с АФПД.

Постановка задачи

Из анализа информационных возможностей и способов применения существующих и перспективных РСА следует, что на настоящий момент чётко определённой системы оперативного определения параметров движения БС нет. Существующие алгоритмы селекции движущихся целей (СДЦ) требуют значительных вычислительных и временных затрат, что неприемлемо для БС, информация о параметрах движения которых быстро устаревает и требует постоянного обновления. С учётом проведённого анализа одним из наиболее перспективных методов определения параметров движения БС является совершенствование алгоритмов определения скорости за счёт использования АФПД в канале азимута системы ЦОС РСА. В этом случае процесс обработки радиолокационной голограммы (РЛГ) и формирования формуляра объекта для потребителя в ЦОС с АФПД можно представить в виде этапов, представленных на рис. 1.

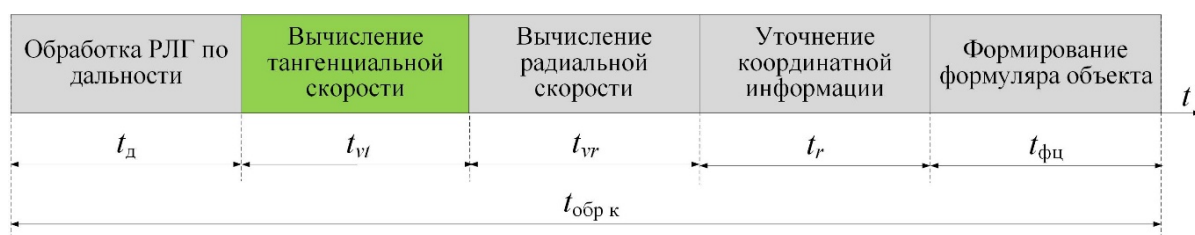


Рис. 1. Этапы обработки радиолокационной голограммы

Здесь t_d – время обработки РЛГ по дальности; t_{vt} – время вычисления тангенциальной скорости; t_{vr} – время вычисления радиальной скорости; t_r – время уточнения координат БС; t_{fc} – время формирования формуляра объекта; $t_{обр\ к}$ – время обработки кадра, определяемое выражением:

$$t_{обр\ к} = t_d + t_{vt} + t_{vr} + t_r + t_{fc} \quad (1)$$

При типовом способе обработки кадра t_{vt} составляет от 10 до 40% от общего времени обработки в зависимости от количества целей. Таким образом, оптимизации алгоритма определения t_{vt} позволит ускорить формирование формуляра объекта.

Для решения поставленной задачи была сформулирована содержательная постановка задачи разработки комплекса алгоритмов оперативного определения параметров движения БС, которая выглядит следующим образом.

Исходные данные:

1. $\Pi_{\text{рса}} = \langle P, S_{\text{н}} \rangle$ – параметры РСА, где P – параметры бортовой аппаратуры РСА; $S_{\text{н}}$ – вектор состояния КА-носителя РСА.
2. $S_{\text{бнц}}$ – вектор состояния БС.

Требуется разработать комплекс алгоритмов оперативного определения параметров движения БС в системе ЦОС космических РСА, включающий:

- 1) алгоритм A_1 определения параметров АФПД в канале азимута, такой, что: $\langle \Delta v_t, \alpha_d \rangle = A_1(\Pi_{\text{рса}}, S_{\text{бнц}})$, где Δv_t – полоса захвата АФПД; α_d – крутизна дискриминационной характеристики (ДХ) АФПД;
- 2) алгоритм A_2 определения параметров движения БС в системе ЦОС РСА, такой что:
 - а) $\langle v_t, v_r \rangle = A_2(\Pi_{\text{рса}}, J_0, \Delta v_t, \alpha_d)$ – оценка тангенциальной и радиальной скоростей БС соответственно, где J_0 – радиолокационная голограмма заданного сектора обзора РСА;
 - б) с целью повышения оперативности определения параметров БС за счёт минимизации времени обработки РЛГ:

$$t_{\text{обр}} \left(N_{\text{к}}, A_1(\Pi_{\text{рса}}, J_0, \Delta v_t, \alpha_d), A_2(\Pi_{\text{рса}}, S_{\text{бнц}}) \right) \Big|_{\substack{\sigma_{v_t} \leq \sigma_{v_t \text{ доп}} \\ \sigma_{v_r} \leq \sigma_{v_r \text{ доп}}}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $N_{\text{к}}$ – количество кадров в сеансе съёмки; $\sigma_{v_t}, \sigma_{v_r}$ – среднеквадратическая ошибка (СКО) оценки тангенциальной и радиальной составляющих скорости БС соответственно; $\sigma_{v_t \text{ доп}}, \sigma_{v_r \text{ доп}}$ – допустимые значения СКО оценки тангенциальной и радиальной составляющих скорости БС соответственно.

Ограничения и допущения при построении модели РСА космического базирования: РСА работает в режиме бокового обзора; уровень отраженного сигнала от БС достаточен для его обнаружения системой ЦОС РСА; скорость БС находится в пределах 50 ... 100 км/ч.

Модель амплитудно-фазового программного дискриминатора в системе цифровой обработки сигнала радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть влияние тангенциальной скорости БС на формирование отметки от объекта на РЛИ. Синтез РЛИ основан на согласованной фильтрации отражённого сигнала с применением опорной функции, точно компенсирующей закон распределения фазы сигнала по траектории носителя РСА [3; 4].

В случае со стационарными объектами опорная функция по азимуту соответствует закону частотной модуляции отражённых сигналов, зависящей от наклонной дальности до объекта на интервале синтезирования. Наличие же тангенциальной составляющей скорости БС приводит к рассогласованию закона изменения фазы отражённых сигналов по координатам азимута с опорной функцией системы ЦОС РСА и соответ-

ственно к уменьшению амплитуды формируемой отметки на РЛИ. Так как тангенциальная скорость приводит к уменьшению амплитуды отметки на РЛИ без её смещения, то возможно алгоритмическое формирование дискриминатора по тангенциальной скорости v_t (в канале азимута) с целью определения знака и величины относительно первичной её оценки \bar{v}_t , при которых решена задача обнаружения. С учётом вышесказанного, модель АФПД, интегрируемого в систему ЦОС РСА для оценки тангенциальной скорости БС, может быть описана схемой, приведённой на рис. 2.

Предложенный АФПД представляет собой суммарно-разностный дискриминатор с двумя каналами, которые выполнены в виде согласованных фильтров. Такой вариант дискриминатора является наиболее совершенным, так как позволяет исключить влияние изменений амплитуд и фазы сигналов на стабильность ДХ и тем самым обеспечить наибольшую точность определения тангенциальной скорости.

На вход каналов дискриминатора поступают строки РЛГ ($u_{вх}$), свёрнутые по дальности, в которых обнаружены отметки движущихся объектов. После свёртки входного сигнала с опорными функциями $h_{аз1}$ и $h_{аз2}$ (рис. 2), сформированными для различных значений скорости носителя РСА, на выходе каждого канала формируются следующие сигналы:

$$u_{вых1} = \max \left| J_1 \left(v_n - \bar{v}_t - \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right|, \quad u_{вых2} = \max \left| J_2 \left(v_n - \bar{v}_t + \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right|, \quad (3)$$

где J_1, J_2 – строки РЛИ в первом и втором каналах; v_n – скорость носителя РСА; Δv_t – заданное при расчёте значение полосы захвата АФПД.

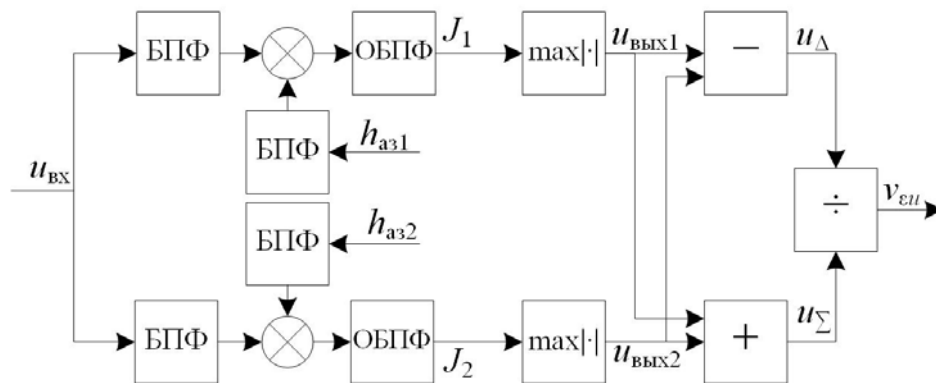


Рис. 2. Схема амплитудно-фазового программного дискриминатора в системе цифровой обработки сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны

Здесь БПФ и ОБПФ – быстрое преобразование Фурье и обратное БПФ соответственно. Суммарный и разностный сигналы в этом случае будут иметь вид:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma} &= \max \left| J_1 \left(v_n - \bar{v}_t - \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right| + \max \left| J_2 \left(v_n - \bar{v}_t + \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right|, \\ u_{\Delta} &= \max \left| J_1 \left(v_n - \bar{v}_t - \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right| - \max \left| J_2 \left(v_n - \bar{v}_t + \frac{\Delta v_t}{2} \right) \right|. \end{aligned} \quad (4)$$

Выходной сигнал дискриминатора формируется как отношение:

$$v_{\varepsilon u}(\bar{v}_t) = \frac{u_{\Delta}(\bar{v}_t)}{u_{\Sigma}(\bar{v}_t)}. \quad (5)$$

Полученные значения крутизны и калибровочного значения «нуля» ДХ используются в АФПД с целью определения тангенциальной скорости БС относительно её первичной оценки:

$$v_t = \bar{v}_t + \frac{(v_{\varepsilon u} - v_{\varepsilon 0})}{\operatorname{tg}(\alpha_d)}, \quad (6)$$

где $v_{\varepsilon 0}$ – калибровочное значение «нуля» ДХ.

Реализованный АФПД является мгновенным безынерционным устройством по измеряемому параметру, что позволяет получить значение тангенциальной скорости с минимальными вычислительными затратами в бортовом вычислительном комплексе РСА.

Комплекс алгоритмов оперативного определения параметров движения быстроходных судов в системе цифровой обработки сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны

Алгоритм A_1 определения и настройки параметров АФПД предназначен для предварительного расчета ДХ и определения таких параметров АФПД, как полоса захвата дискриминатора и крутизна ДХ. Указанный алгоритм выполняется на подготовительном этапе с целью повышения оперативности определения параметров движения БС. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 3.

В схеме алгоритма можно выделить следующие основные этапы (рис. 3):

1. Ввод исходных данных, необходимых для формирования нескольких РЛГ с движущимися объектами и расчёта крутизны ДХ.
2. Формирование набора комплексных РЛГ, сжатых по дальности.
3. Формирование двух подапертур из комплексных РЛГ в соответствии с заданными координатами БС. По причине наличия эффекта миграции дальности в ходе работы алгоритма обрабатывается несколько строк по азимуту, в которых обнаружен объект.
4. Формирование ДХ для различных полос захвата (полученные ДХ сохраняются в отдельный файл).
5. Определение калибровочных значений смещения «нуля» и крутизны рабочих участков ДХ. Для этого осуществляется выборка ДХ, в которых при заданной оценке тангенциальной скорости определяются калибровочные значения смещения «нуля» ДХ для различных значений полосы захвата. С учётом калибровочных значений смещения «нуля» ДХ рассчитывается крутизна рабочих участков. Полученные калибровочные значения и значения крутизны рабочих участков ДХ сохраняются в виде матрицы.

Структурная схема алгоритма A_2 приведена на рис. 4.

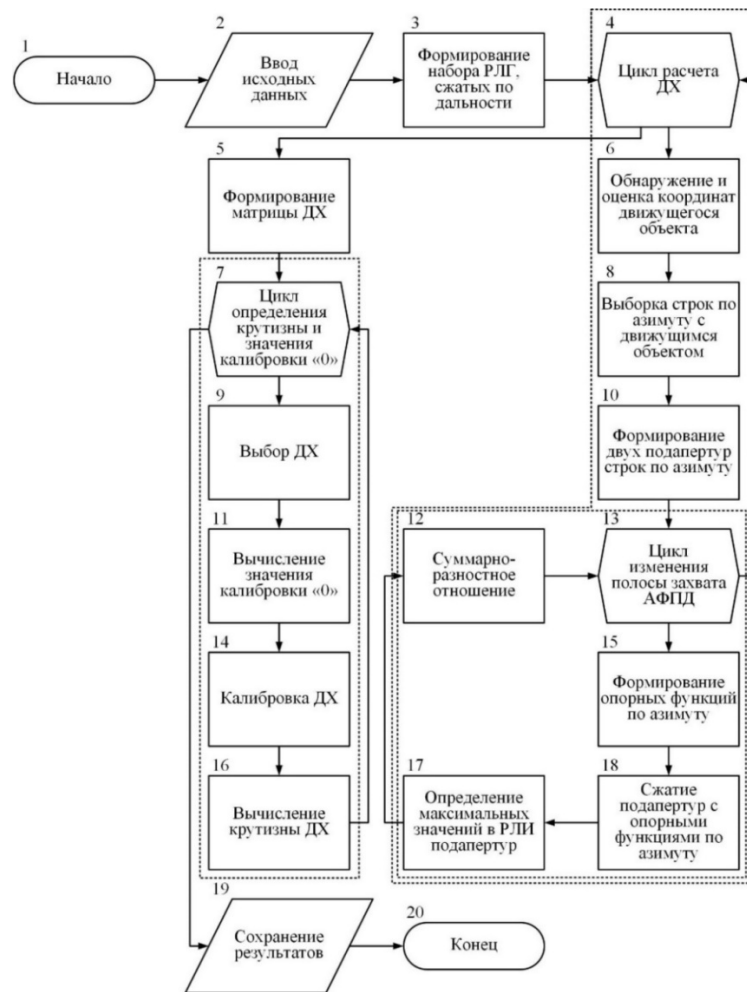


Рис. 3. Схема алгоритма определения и настройки параметров амплитудно-фазового программного дискриминатора в канале азимута

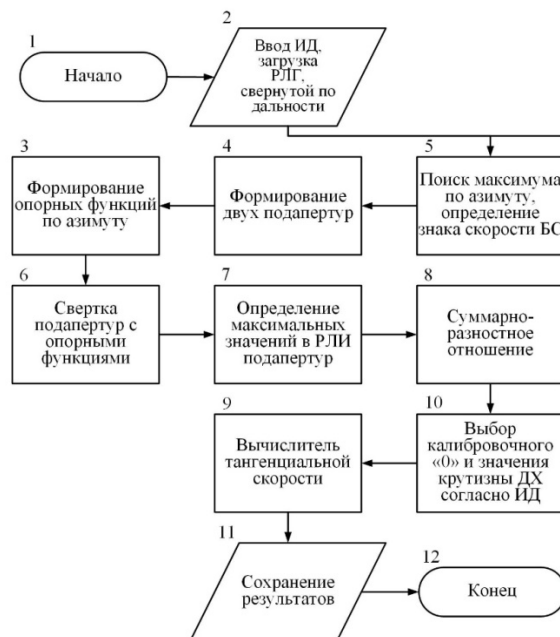


Рис. 4. Схема алгоритма определения тангенциальной скорости быстроходных судов

Указанный алгоритм можно описать последовательностью следующих этапов:

1. Ввод исходных данных, необходимых для работы системы ЦОС с АФПД.
2. Цикл селекции объекта по дальности, на котором производится последовательная выборка парциальных кадров комплексной РЛГ и поэлементное суммирование строк:

$$J_{\text{сум}}(n) = \sum_1^n |J_0(n)|, \quad (7)$$

где n – количество строк по азимуту.

На основании полученного значения в парциальном кадре определяется наклонная дальность до БС $R_{\text{БС}}$ и осуществляется выборка строк по азимуту, в которых присутствуют локационные сигналы от объекта.

3. Определение направления движения БС, осуществляемое двухапертурным методом, при этом для каждой из подапертур по азимуту рассчитываются опорные функции, сформированные симметрично путевой скорости носителя РСА:

$$h_{\text{аз1}}(t) = \frac{2\pi \left(v_{\text{н}} - \bar{v}_t - \frac{\Delta v_t}{2} \right)^2 t^2}{\lambda R_{\text{БС}}}, \quad h_{\text{аз2}}(t) = \frac{2\pi \left(v_{\text{н}} - \bar{v}_t + \frac{\Delta v_t}{2} \right)^2 t^2}{\lambda R_{\text{БС}}}, \quad (8)$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала; Δv_t выбирается из условия гарантированного перекрытия по скоростям БС (в пределах от 50 до 100 км/ч); $R_{\text{БС}}$ – дальность.

4. Определение выходного значения дискриминатора $v_{\text{εи}}$ в соответствии с выражением (5).

5. На основании параметров носителя РСА, а также выбранного значения рабочей полосы АФПД, определяются значения калибровки $v_{\text{ε0}}$ и значение крутизны ДХ $\alpha_{\text{д}}$.

6. Расчёт тангенциальной скорости БС по выражению (6).

Полученное значение v_t также позволяет рассчитать опорную функцию по азимуту для формирования РЛИ, сфокусированного на БС:

$$h_{\text{аз бнц}}(t) = \frac{2\pi (v_{\text{н}} + v_t)^2 t^2}{\lambda R_{\text{бнц}}}. \quad (9)$$

Таким образом, предложенный алгоритм в отличие от традиционных алгоритмов определения скорости БС, требующих построения РЛИ и проведения нескольких итераций, позволяет рассчитать тангенциальную скорость БС по нескольким строкам РЛГ. Несмотря на то, что дальнейшее определение радиальной скорости и местоположения БС для формирования вектора состояния БС осуществляется стандартными методами [3; 4], использование АФПД в системе ЦОС РСА значительно сокращает время обработки радиолокационных данных.

Методика проведения и результаты экспериментальной отработки комплекса алгоритмов оперативного определения параметров движения быстроходных судов

Для апробации разработанного комплекса алгоритмов и оценивания оперативности определения тангенциальной скорости БС были проведены полунатурные эксперименты с использованием локационного акустического комплекса (ЛАК) [6; 7]. Технические характеристики приведены в табл. 1, внешний вид ЛАК в режиме отработки алгоритмов СДЦ представлен на рис. 5.

Таблица 1. Технические характеристики локационного акустического комплекса

№	Характеристика	Значение
1	Тип модуляции зондирующего сигнала	линейная частотная модуляция, фазовая манипуляция
2	Рабочая полоса частот	10...100 кГц
3	Частота следования зондирующих импульсов	1...30 Гц
4	База зондирующего сигнала	до 50
5	Ширина спектра зондирующего сигнала	до 20 кГц
6	Разрешающая способность [азимут – дальность]	0,017 × 0,008 м
7	Угол наблюдения в горизонтальной плоскости	90°
8	Угол визирования в вертикальной плоскости	45°
9	Длина синтезированной апертуры	1,8 м
10	Скорость перемещения приёмо-передатчика	до $5 \cdot 10^{-2}$ м/с
11	Высота установки приёмника макета	1...2,3 м
12	Частота дискретизации АЦП	48/96/192/384 кГц
13	Разрядность АЦП	14/16/24 бит



Рис. 5. Внешний вид локационного акустического комплекса

Экспериментальная отработка разработанного комплекса алгоритмов осуществлялась на основе методики, структурная схема которой приведена на рис. 6. Согласно предложенной схеме методику можно разделить на несколько этапов.

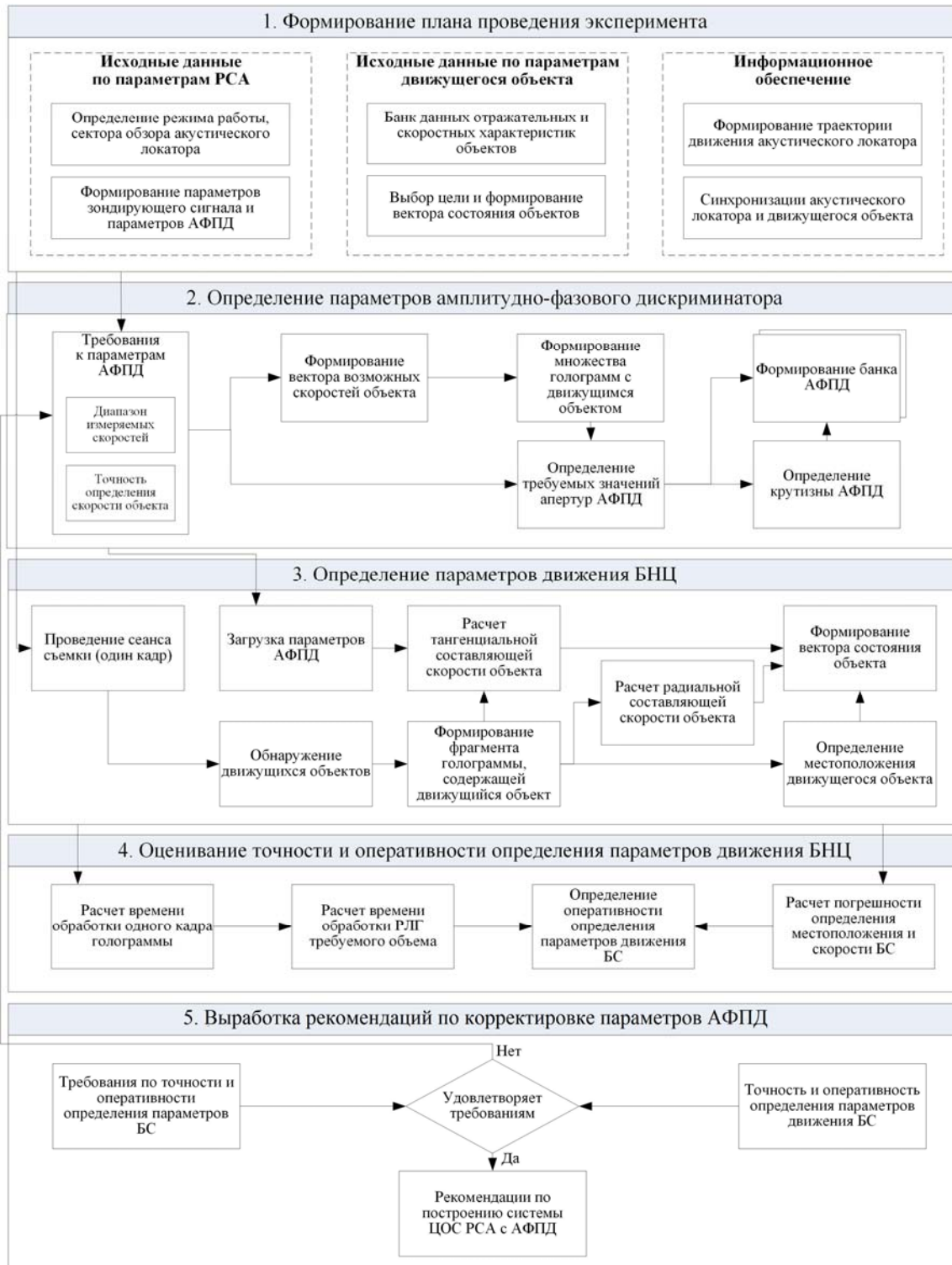


Рис. 6. Схема методики экспериментальной обработки алгоритмов оперативного определения параметров движения быстроходного судна

Основной задачей первого этапа является формирование плана проведения эксперимента и определение исходных данных (рис. 6) по модели РСА, характеристикам наблюдаемых объектов и параметрам информационного обеспечения РСА. В рамках реализации этой задачи формируется мишенная обстановка, имитирующая характеристики требуемого района мониторинга (геометрические размеры, состав и количество БС, время наблюдения), а также формируется диаграмма временных интервалов наблюдения сектора обзора с учётом ракурса съёмки.

На втором этапе, который является подготовительным, реализуется алгоритм A_1 . По результатам выполнения данного этапа формируется банк данных, содержащий ДХ с различными значениями крутизны и полосы захвата, перекрывающие весь требуемый диапазон скоростей исследуемых БС. Данная процедура позволяет существенно повысить оперативность определения параметров движения БС за счёт использования заранее рассчитанных ДХ для различных вариантов геометрии обзора РСА.

На третьем этапе производится расчёт параметров движения БС, который сводится к оценке их вектора состояния. При этом радиальная составляющая скорости БС оценивается стандартными методами (по доплеровскому сдвигу частоты либо смещению отметки на РЛИ), а тангенциальная составляющая скорости рассчитывается по алгоритму A_2 . Сформированный на данном этапе вектор состояния БС может быть передан с борта РСА непосредственно потребителю.

На четвёртом этапе проводится оценивание точности и оперативности определения параметров движения БС. Оперативность в данном случае определяется по выражению (1), при этом погрешность определения местоположения и скорости БС не должна превышать заданные допустимые значения.

На пятом этапе определяется соответствие рассчитанных значений точности и оперативности определения параметров АФПД требованиям потребителя. Выполнение данного условия свидетельствует о выборе оптимальных параметров АФПД, в противном случае принимается решение об изменении его параметров.

Наряду с полунатурными экспериментами оценка оперативности определения параметров движения БС осуществлялась путём математического моделирования процесса обработки РЛГ участка водной поверхности с БС с использованием системы ЦОС с АФПД в канале азимута.

Стоит отметить, что основным этапом, позволяющим значительно снизить скорость обработки РЛГ для получения формулара объекта, является этап вычисления тангенциальной скорости (рис. 1) с использованием разработанного алгоритма. Учитывая, что в обзорном режиме работы РСА съёмка осуществляется покадрово на протяжении всего интервала синтезирования, время определения параметров движения БС методом моделирования вычислялось на примере одного кадра, после чего результаты аппроксимировались для серии из N_k кадров. В связи с этим было проведено моделирование процесса расчёта тангенциальной скорости объекта в кадре размерами 10×10 км. По результатам статистической обработки (рис. 7) была получена усреднённая оценка значения времени t_{ν} для систем ЦОС РСА с АФПД и без.

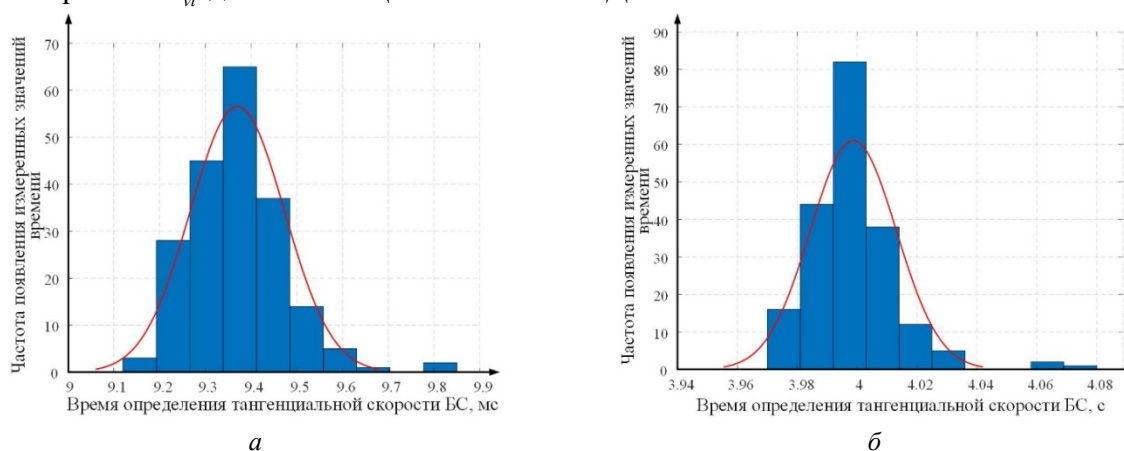


Рис. 7. Гистограмма распределения времени определения тангенциальной скорости быстроходного судна в кадре 10×10 км системами цифровой обработки сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны без использования АФПД (а) и с использованием АФПД (б)

На основе полученных данных был произведён расчёт времени и погрешности определения тангенциальной скорости БС при функционировании РСА в обзорном режиме. На рис. 8 приведена зависимость времени определения параметров движения БС от величины полосы обзора РСА вдоль линии пути при различных значениях полосы поперёк линии пути (L_{\perp}), при этом скорость БС составляла 75 км/ч.

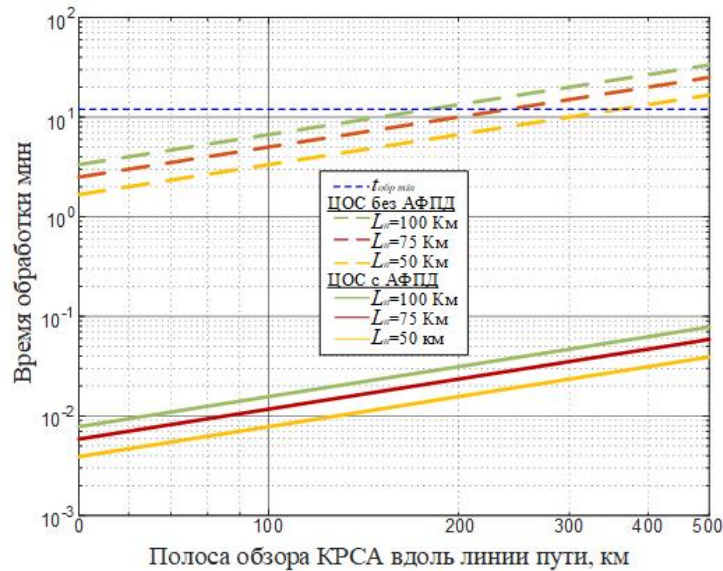


Рис. 8. Зависимость времени определения параметров движения быстроходного судна от размера полосы обзора радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны

Как видно из рис. 8, за счёт использования системы ЦОС с АФПД при определении тангенциальной скорости БС оперативность определения параметров движения БС сокращается в среднем в 2,5 раза. Зависимости СКО определения тангенциальной скорости БС от параметров АФПД при различных значениях ширины спектра зондирующего сигнала (ΔF) приведены на рис. 9.

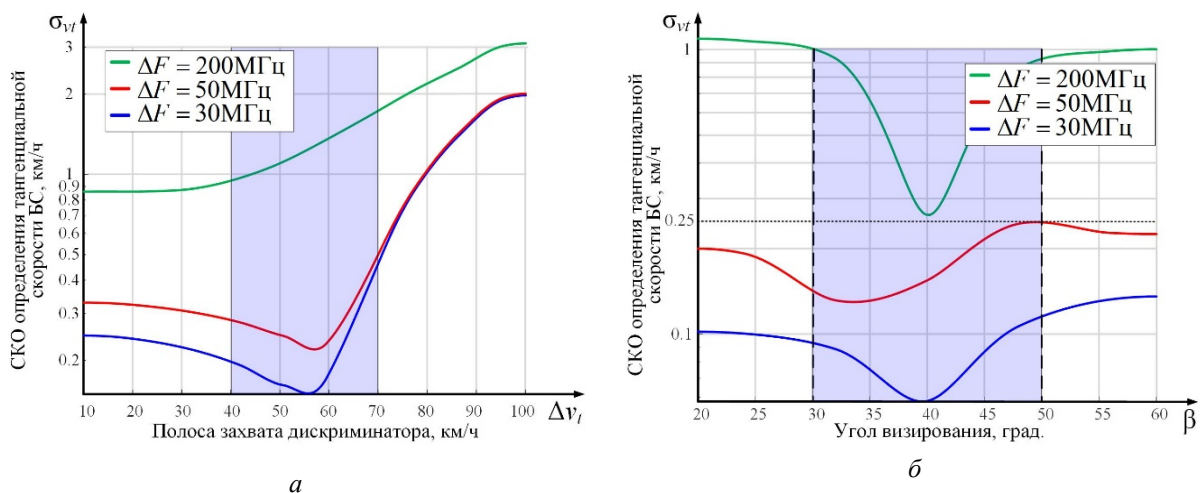


Рис. 9. Зависимости среднеквадратической ошибки определения тангенциальной скорости быстроходного судна от рабочей полосы дискриминатора (а) и угла визирования (б)

Так, при $\Delta F = 50$ МГц среднеквадратическая ошибка (СКО) определения тангенциальной скорости БС с использованием АФПД не превышает 0,25 км/ч (рис. 9, б), тогда как без использования АФПД – порядка 0,2 км/ч, т.е. наблюдается незначительное снижение точности оценки тангенциальной скорости, несущественное для решения задачи мониторинга БС.

Аналогичные результаты, подтверждающие сокращение времени определения параметров движения БС при использовании разработанного комплекса алгоритмов, были получены для всего диапазона скоростей, указанных в постановке задачи, а также для различных размеров сектора обзора РСА.

Выводы

Применение АФПД в азимутальном канале системы ЦОС РСА при решении задачи оперативного определения параметров движения БС позволяет при определённых допущениях уменьшить время обработки радиолокационных данных и соответственно ускорить получение потребителем формуляра объекта с требуемой точностью.

Формирование формуляра объекта осуществляется за счёт разработанного комплекса алгоритмов оперативного определения параметров движения БС в системе ЦОС РСА, позволяющего существенно повысить скорость расчёта тангенциальной скорости. Данное обстоятельство в совокупности с формированием базы данных ДХ, осуществляемым на подготовительном этапе, позволит снизить требования к вычислительным мощностям системы ЦОС и осуществлять обработку непосредственно на борту носителя РСА, тем самым ещё больше повысив оперативность получения потребителем необходимых данных.

Библиографический список

1. Клименко Н.Н., Занин К.А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // *Воздушно-космическая сфера*. 2019. № 2 (99). С. 72-82. DOI: 10.30981/2587-7992-2019-99-2-72-82
2. Paduan J.D., Washburn L. High-frequency radar observations of ocean surface currents // *Annual Review of Marine Science*. 2013. V. 5. P. 115-136. DOI: 10.1146/annurev-marine-121211-172315
3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора комического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
4. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. М.: Советское радио, 1964. 732 с.
5. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
6. Гусев С.Н., Козлов А.В., Косынкин А.И. Моделирование многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны с использованием ультразвукового диапазона длин волн // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» (16-17 апреля 2013 г., г. Санкт-Петербург). Вып. 10, т. 1. СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2013. С. 419-429.
7. Важенин В.Г., Дядьков Н.А., Боков А.С., Сорокин А.К., Марков Ю.В., Лесная Л.Л. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. 208 с.

COMPLEX OF ALGORITHMS FOR FAST DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF MOTION OF HIGH-SPEED VESSELS IN THE DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEM OF A SPACE SYNTHETIC APERTURE RADAR

© 2023

S. N. Gusev Candidate of Science (Engineering), Chief of Laboratory;
Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russian Federation;
vka@mil.ru

A. V. Moroz Senior Researcher;
Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russian Federation;
vka@mil.ru

The article presents the main considerations for determining the tangential velocity of high-speed vessels in the digital signal processing system of a space synthetic aperture radar with an amplitude-phase program discriminator in the azimuth channel. The article suggests a complex of algorithms for fast determination of the parameters of motion of high-speed vessels in the digital signal processing system of a space synthetic aperture radar. The article contains the results of semi-natural experiments that confirm the reliability of the algorithms and their effectiveness in solving the problem of observing the sea surface.

Synthetic aperture radar; radar image; moving target selection; tangential velocity; amplitude-phase discriminator

Citation: Gusev S.N., Moroz A.V. Complex of algorithms for fast determination of the parameters of motion of high-speed vessels in the digital signal processing system of a space synthetic aperture radar. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 145-157. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-145-157

References

1. Klimenko N.N., Zanin K.A. New generation of satellites for maritime surveillance. *Aerospace Sphere Journal*. 2019. No. 2 (99). P. 72-82. (In Russ.). DOI: 10.30981/2587-7992-2019-99-2-72-82
2. Paduan J.D., Washburn L. High-frequency radar observations of ocean surface currents. *Annual Review of Marine Science*. 2013. V. 5. P. 115-136. DOI: 10.1146/annurev-marine-121211-172315
3. Verba B.C., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Space-based Earth surveying radar systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 675 p.
4. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii / pod red. V.E. Dulevicha* [Theoretical foundations of radar / ed. by V.E. Dulevich]. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1964. 732 p.
5. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. *Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Radar systems for remote sensing of the Earth]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2005. 368 p.
6. Gusev S.N., Kozlov A.V., Kosynkin A.I. Modelirovanie mnogopozitsionnoy radiolokatsionnoy sistemy s sintezirovannoy aperturoy anteny s ispol'zovaniem ul'trazvukovogo diapazona dlin voln. *Trudy XXVIII Vserossiyskogo Simpoziuma «Radiolokatsionnoe Issledovanie Prirodnikh Sred» (April, 16-17, Saint Petersburg)*. Iss. 10, V. 1. SPb.: Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2013. P. 419-429. (In Russ.)
7. Vazhenin V.G., Dyad'kov N.A., Bokov A.S., Sorokin A.K., Markov Yu.V., Lesnaya L.L. *Polunaturalnoe modelirovanie bortovykh radiolokatsionnykh sistem, rabotayushchikh po zemnoy poverkhnosti: uchebnoe posobie* [Semi-natural modeling of airborne radar systems operating on the earth's surface]. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2015. 208 p.