

УДК 681.883

# ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ УСТОЙЧИВЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ГИДРОЛОКАТОРАХ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ

А.А. Войтов, Ю.А. Корнеев,  
Р.К. Хаметов

Кировский филиал ОАО «Концерн «Океанприбор»<sup>1</sup>

Обнаружение и идентификация подводных объектов средствами гидролокационных систем осуществляются путем обработки сигналов, подверженных воздействию нестационарных и дискретных помех. С этой целью используются функциональные и математические модели, основанные на процедурах обработки сигналов, устойчивых по отношению к внешним помехам различного типа. Речь идет о разработке алгоритмов оценивания параметров гладких реверберационных, точечных и локально-протяженных дискретных помех при отсутствии их достоверных статистических характеристик. В частности, это относится к обнаружению и распознаванию ложных тревог. Задача сводится к построению моделей изменения параметров помех и робастных процедур оценивания их вероятностных характеристик. Решение задачи находится путем категоризации обучающей выборки (процедуры цензурирования с замещением). Общий алгоритм обработки нестационарных гидролокационных изображений содержит ряд частных алгоритмов, в том числе алгоритмы категоризации, оценивания полей параметров изображений, помехоустойчивого оценивания квантиля, соответствующего заданной вероятности ложной тревоги. Частные алгоритмы, имеющие свои особенности, применяются для решения ряда реальных практических задач.

## ВВЕДЕНИЕ

Для вновь проектируемых гидролокаторов освещения ближней обстановки (ГЛ ОБО) характерной чертой является существенное повышение уровня автоматизации при обработке гидролокационных сигналов (ГЛ-сигналов).

Основные проблемы, возникающие при разработке высокоматематизированных ГЛ ОБО, обусловлены следующими причинами:

- нестационарностью характеристик реверберационных помех (что характерно для донной и поверхностной реверберации), большим динамическим диапазоном обрабатываемых сигналов, изменчивостью характеристик помех в зоне обзора);
- априорной неопределенностью модулирующих функций

интенсивности помех, неопределенностью и изменчивостью законов распределения помех и их параметров;

- априорной неопределенностью пространственных размеров, формы и ориентации обнаруживаемых объектов и навигационных препятствий.

Проблемы априорной неопределенности и нестационарности сигнально-помеховой обстановки могут быть решены при применении адекватных условиям алгоритмов первичной (внутриобзорной) и вторичной (межобзорной) обработки ГЛ-сигналов.

Для случаев полной априорной информации о распределениях помех и сигналов ко второй половине 60-х – первой половине 70-х годов прошлого века были разработаны алгоритмы оптимальной обработки сигналов [1, 2, 3]. Создавалось впечатление, что большинство вопросов обнаружения и измерения координат объектов в условиях помех решены [3]. Однако реальные и очень непростые проблемы обусловливались тем фактом, что «полная априорная определенность в приложении к практическим задачам являлась экзотикой» [4]. Во второй половине 70-х – 80-х годов интенсивно разрабатывались методы и тесты для проверки статистических гипотез при априорной неопределенности [5]. Однако на практике часто оказывалось так, что модели распределений формулировались при разработке статистических тестов проверки гипотез слишком «жесткими». Эту ситуацию очень хорошо прокомментировали из-

<sup>1</sup> 187341, Ленинградская обл., г. Кировск, ул. Северная, 1. Тел.: (81362)-24-768, факс: (81362)-24-807. E-mail: kf@oceanpribor.ru

вестные статистики Ф. Мостеллер и Дж. Тьюки: «История статистики и анализа данных – это пестрая смесь здорового скептицизма и наивного оптимизма относительно точных видов распределения наблюдений» [6]. Поэтому практическое развитие алгоритмов обработки сигналов в условиях априорной неопределенности о характеристиках помех и сигналов шло по пути разработки как адаптивных [4], так и робастных алгоритмов обработки статистических данных [7, 8].

### **1. Особенности ГЛ-сигналов, отраженных объектами разных классов**

Объекты, обнаруживаемые и идентифицируемые (классифицируемые) ГЛ ОБО, имеют существенно отличающиеся пространственные характеристики и структурные особенности.

Классы обнаруживаемых объектов и помех можно разделить на 4 группы.

**Класс 1.** Малые объекты, близкие к точечным, по сравнению с размерами элемента разрешения ГЛ ОБО по координатам, например, швартовая бочка, якорная мина.

Точечным объектом (ТО) считается объект, геометрические размеры которого меньше, чем размеры пространственного элемента разрешения гидролокатора.

**Класс 2.** Подводная лодка (ПЛ).

**Класс 3.** Надводный корабль (НК).

Для объектов этих классов отражения формируются как от корпуса судна, так и от «спутного» следа (шлейфа), образуемого движущимся судном. Протяженность обнаруживаемого ГЛ ОБО шлейфа по дальности зависит от скорости объекта и может достигать 1–3 км. От судна на стопе или на очень малом ходу отражения формируются

только от корпуса протяженного объекта (длина 100–200 метров) – в зависимости от класса и ракурса объекта.

**Класс 4.** Реверберационные помехи. Эти помехи, в свою очередь, подразделяются на поверхностную, объемную и донную реверберацию.

Поверхностная реверберация обусловлена волнением водной поверхности. Даже небольшие волны на морской поверхности (высотой 10–20 см) формируют на гидролокационном изображении (ГЛИ) заметные отражения. При более сильном морском волнении структуру водной поверхности можно представить двумасштабной моделью – крупные ветровые волны и небольшие капиллярные волны [9, 10]. При этом степень отражения ГЛ-сигнала от разных участков морских волн различна, что формирует более сложную характерную картину двумасштабного волнения на ГЛИ.

Объемная реверберация обусловлена присутствием в водной толще различных организмов, пузырьков воздуха. Акустические волны отражаются мелкими ракообразными, стаями (косяками) рыб.

Донная реверберация формируется неровностями рельефа дна и различными донными отложениями. «Пересеченность» рельефа дна, разная степень заиленности приводят к неоднородности (не-стационарности) отражений от дна.

На рис. 1 приведены примеры сигналов, отраженных объектами разных классов.

На рис. 1, *a*, *b* и *v* по вертикали отложены дискреты дальности, а по горизонтали – характеристики направленности (ХН) статического веера лучей ГЛ ОБО.

На рис. 1, *a* показаны несколько ТО, на рис. 1, *b* – одиночный

ТО – швартовая бочка. Данный объект формирует отраженный сигнал, раздробленный по дальности на два дискрета, между которыми заметен провал интенсивности отраженного сигнала (в 1–2 дискрета дальности). Такая ситуация обусловлена многопутным распространением отраженных ГЛ-сигналов, а замирание между отдельными отметками – интерференцией сигналов.

Этот же объект, что и на рис. 1, *b*, представлен на рис. 1, *d*, но уже в виде амплитудной развертки сигнала по дальности (сигнал цели попадает в 14-ю ХН веера лучей). Дистанция до объекта 253 м, протяженность отметки от объекта – около 5 м. Отраженный от швартовой бочки сигнал заметно флюктуирует, что вызвано интерференцией парциальных отраженных сигналов – от бочки, якорной цепи, которая крепит бочку, якоря.

На рис. 1, *e* показан локально-протяженный объект (ЛПО), который на ГЛИ выглядит как группа близко расположенных отметок. ГЛИ, приведенное на рис. 1, *e*, соответствует обнаружению ЛПО, отраженный сигнал от которого принимается не только главными, но и боковыми лепестками ХН антенной системы ГЛ ОБО. Указанные особенности (проблемы) требуют их всестороннего анализа и учета при проектировании алгоритмов обработки ГЛ-сигналов.

Рис. 1, *g* развернут по отношению к рисункам рис. 1, *a*, *b* и *v*: по горизонтали отложены дискреты дальности, а по вертикали – ХН, при этом шкала дальности редуцирована. На данном рисунке показан шлейф от движущегося объекта (движется относительно изображения слева направо). Протяженность шлейфа составляет на данном ГЛИ около 1300 метров.

На рис. 1, *e* приведено изображение шероховатой морской по-

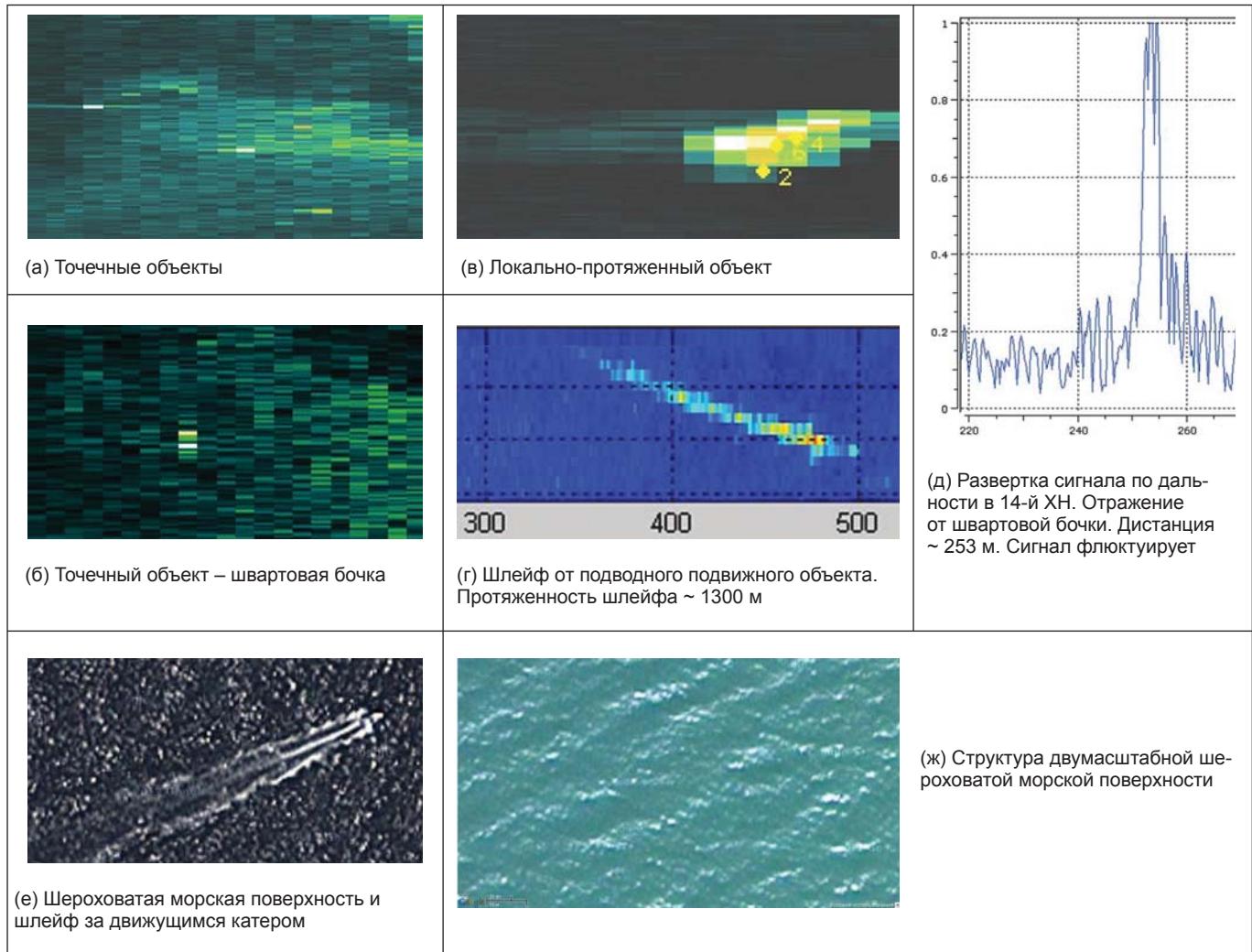


Рис. 1. Примеры сигналов, отраженных объектами разных классов

верхности и шлейфа за движущимся катером. На рис. 1, ж показана структура двумасштабной шероховатой морской поверхности.

## 2. Реализация устойчивых процедур оценивания полей параметров распределения

Распределение отсчетов огибающей сигналов на выходе узкополосного тракта обработки (приемника) ГЛ ОБО может существенно варьироваться. Это обусловливается как особенностями (характеристиками) тракта обработки, так и особенностями поверхностей, на которых происходит рассеяние сигналов.

Обрабатываемые ГЛИ характеризуются нестационарным фоном и объектами на этом фоне. Нестационарный фон на выходе линейного тракта приемника можно представить как совокупность поля гладких помех  $\{y_{gp}(i, j)\}$  (ГП), поля дискретных помех  $\{S_{dp}(i, j)\}$  (ДП), а объекты  $S_u(i, j)$  классифицировать по их протяженности на ТО, ЛПО и протяженные объекты (ПрО). Рис. 2 демонстрирует применение различных методов оценивания полей параметров распределения для получения устойчивых оценок при наличии аномальных наблюдений.

Варианты оценивания полей параметров положения  $\{m_y(i, j)\}$

и размаха  $\{\sigma_y(i, j)\}$  нестационарного поля ГП (рис. 2, бл. 5) представлены несколькими методами, при этом на формирование оценки каждым из этих методов влияют объекты и ДП (рис. 2, бл. 6). Блоки 7, 8, 8.1, 8.2, 9 на рис. 2 соответствуют реализации того или иного метода оценивания параметров ГП с учетом влияния на оценки полей ГП аномальных наблюдений, обусловленных наличием объектов и ДП на ГЛИ.

Рассмотрим подробнее возможные методы оценивания полей неизвестных параметров.

Линейные оценки параметров  $\{m_y(i, j)\}$  и  $\{\sigma_y(i, j)\}$  полей ГП (рис. 2, бл. 7). Данная разно-

видность оценивания параметров может быть легко реализована с использованием локальных полиномиальных моделей параметров ГП [12], формируемых на одномерных или двумерных обучающих выборках (ОВ). Такие оценки параметров распределений ГП в отсутствии аномальных наблюдений имеют высокую точность. Но серьезным недостатком данной группы алгоритмов является их неустойчивость к воздействию аномальных наблюдений, причем чем большую амплитуду имеет аномальное наблюдение, тем сильнее оно искажает результат оценивания (оценку параметров ГП).

Нелинейные оценки полей параметров (рис. 2, бл. 8). Данные методы оценивания позволяют исключить аномальные наблюдения из нецензуриванной ОВ (нечензуриванная ОВ помимо отсчетов основного поля содержит и аномальные выбросы).

В группе методов оценивания, соответствующих бл. 8.1 на рис. 2, в ходе обработки ОВ производится обнаружение аномальных наблюдений и их цензуривание, т.е. удаление их из отсчетов исходной ОВ. При обработке двумерной ОВ – обучающего ГЛИ – обнаруживаются объекты (способ обнаружения рассматривается отдельно), а «следы», которые соответствуют этим объектам на изображении, обнуляются. В результате формируется поле гидролокационных данных (ГЛ-данных), содержащее нулевые области в тех местах, где были обнаружены аномальные наблюдения. Положение этих областей априорно неизвестно, что заметно усложняет реализацию алгоритмов обработки, меняет логику построения оценок модулирующих функций фона. Поэтому при оценивании необходимо учитывать неизвестность положения нулевых областей, которые соот-

ветствуют аномальным наблюдениям.

Для преодоления проблем, возникающих при оценивании «цензуриванных» полей, используется модифицированный алгоритм (бл. 8.2 на рис. 2), состоящий в обнаружении и **замещении** аномальных наблюдений на наблюдения, которые строятся с использованием окаймляющих «неаномальных» наблюдений. После проведения процедуры замещения аномаль-

ных (выделяющихся) наблюдений полученное поле ГЛ-данных можно обрабатывать с помощью линейных алгоритмов. Алгоритм цензуривания аномальных отсчетов с замещением называется алгоритмом **категоризации** [11].

К устойчивым методам оценивания (но при этом и к нелинейным) относится медианное оценивание, суть которого заключается в цензурировании аномально больших наблюдений в соответствии

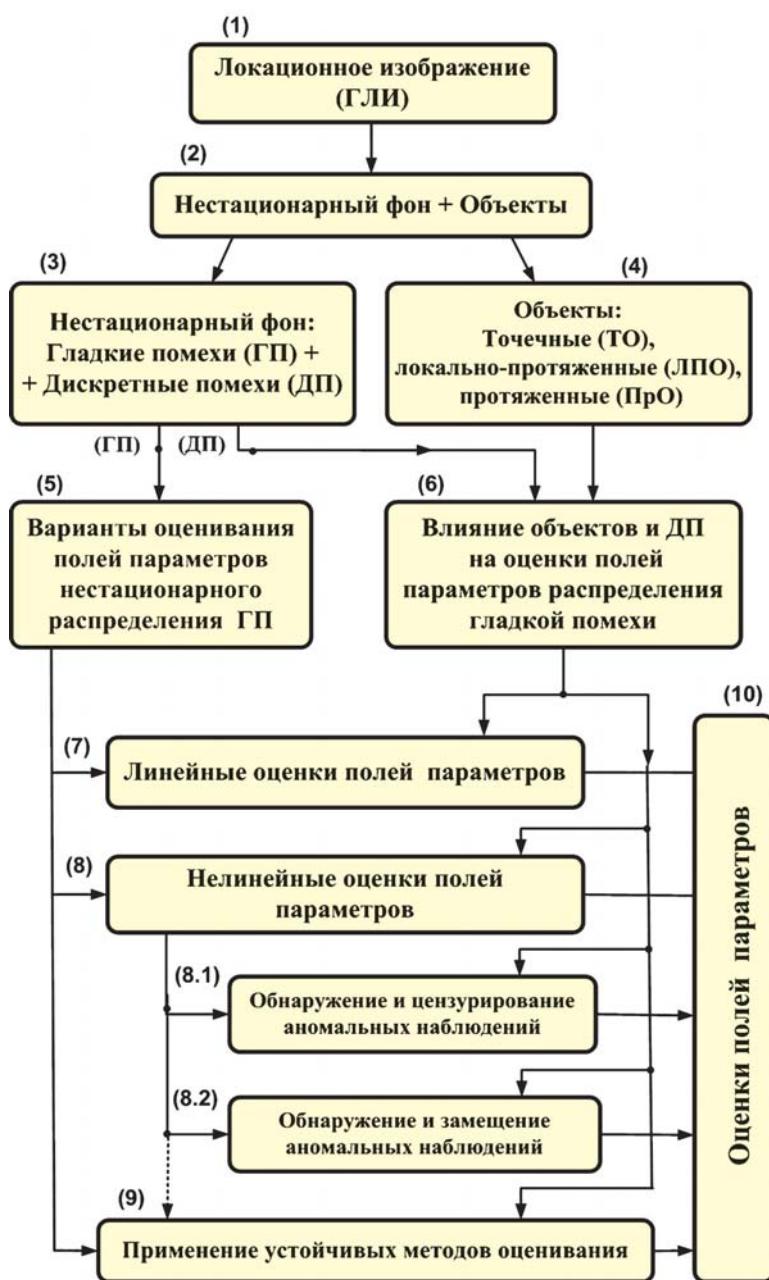


Рис. 2. Варианты реализации устойчивых процедур оценивания полей параметров распределения нестационарной ГП

с основным «принципом» работы алгоритма медианной фильтрации. Подобная процедура хорошо работает на стационарных полях, но ее применение становится менее эффективным при обработке больших блоков изображения (данных), на которых присутствуют нестационарные участки.

### 3. Общая структура устойчивых алгоритмов адаптивного обнаружения

Рисунок 3 раскрывает проблемы реализации адаптивных алгоритмов обнаружения объектов на нестационарном фоне при наличии ДП и пути их преодоления.

В качестве входных данных для алгоритмов обнаружения используется двумерное (в данном случае) ГЛИ, которое имеет две основные составляющие: нестационарный фон и объекты на этом фоне. Особенностью нестационарного фона в гидролокации является наличие достаточно мощной флюктуационной (шумовой) компоненты, такой, что отношение среднего значения фона к величине шумовой компоненты (СКО флюктуационной компоненты) близко к единице. Изображения, имеющие подобный фон, называют малоконтрастными. Компоненты нестационарного фона представлены в бл. 3 на рис. 3:

- ГП – могут быть аппроксимированы гладкими поверхностями;

- ДП – это неоднородности с быстро изменяющейся интенсивностью по координатам. К таким помехам относятся отражения от береговой черты, донных неоднородностей.

Дискретными по структуре являются также и объекты, перечисленные в бл. 4 на рис. 3: ТО, ЛПО, ПрО.

При формировании порога обнаружения  $\Pi_{\text{обн}}$  в используемой модели ГП учитываются два параметра распределения:

- параметр положения (могут использоваться поля средних значений, медиан),
- параметр размаха или флюктуационной компоненты (могут использоваться поля СКО).

При этом для фона, распределенного по закону Релея, оценивается только один параметр – среднее значение, а СКО может быть получен с помощью умножения среднего значения на коэффициент, близкий к 1, так как среднее и СКО для закона Релея функционально связаны.

Для квадратичного детектора отсчеты фона распределены по экспоненциальному закону, а при линейном детекторе – по закону Релея [2].

В реальных ситуациях детектор не является строго линейным или квадратичным, а его характеристики могут совмещать параметры линейного и квадратичного детектора. В таком случае распределение не может быть строго описано одним законом, а содержит в себе особенности разных распределений. При модификациях изображения также может «произойти» изменение распределения гладких помех. Например, при редукции изображения по дальности с использованием

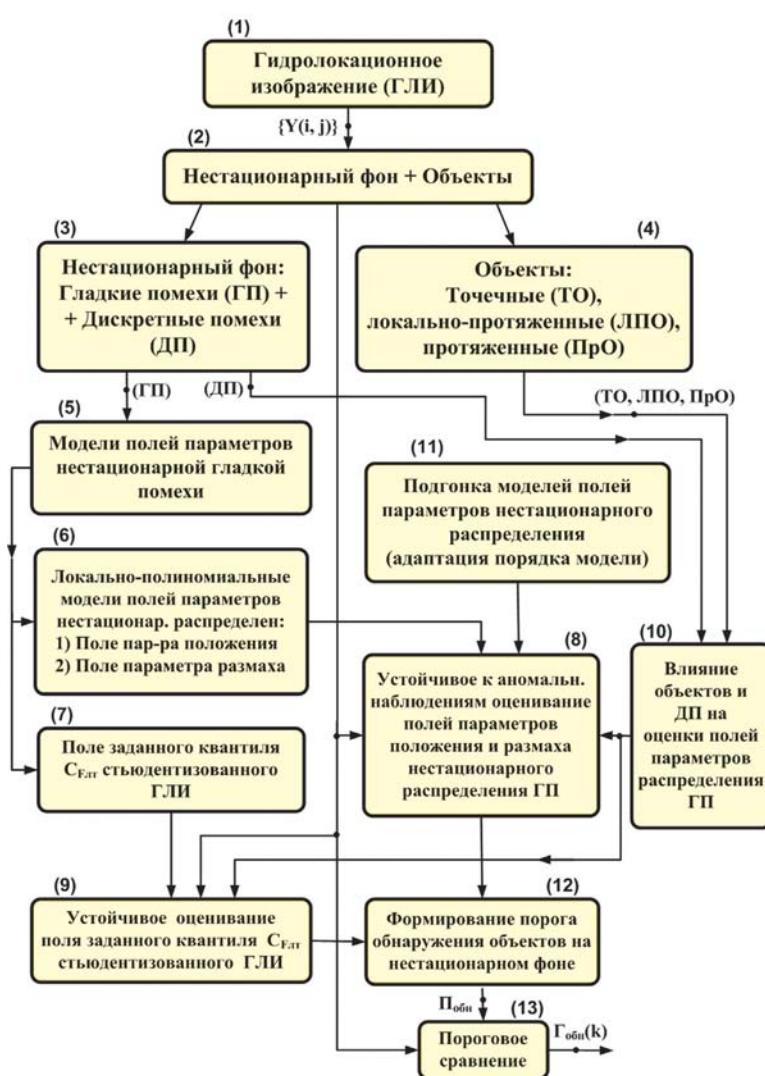


Рис. 3. Общая структура реализации алгоритмов адаптивного обнаружения

экстремальных статистик на коротких временных интервалах распределение экстремальных отсчетов отличается от исходного релеевского [2]. Распределение огибающей отраженных от морской поверхности сигналов является нерелеевским, имеет более длинный правый хвост [9, 10].

Учитывая даже только такие «простые» особенности, нельзя использовать для описания гладких фоновых помех однопараметрический закон распределения. Порог адаптивного обнаружения, сформированный с учетом простой однопараметрической модели распределения (релеевское или экспоненциальное), не будет соответствовать реальным помехам, вследствие этого и уровень ложной тревоги будет отличаться от заданного оператором.

Поскольку распределения реальных помех и параметры реальных систем обработки ГЛ-сигналов точно априорно неизвестны и, более того, нестационарны, можно ввести более универсальную модель распределения гладких помех, описываемую двумя параметрами: параметрами положения и размаха (рис. 3, бл. 6).

В блоке 7 задается модель поля заданного квантиля  $C_{F_{LT}}$  ложной тревоги стьюдентизованного ГЛИ. Стьюдентизованное ГЛИ – это изображение, над которым произведена процедура стационаризации как по параметру среднего (центрирование), так и по параметру размаха флюктуаций (нормированное на размах флюктуаций ГЛИ). Поле заданного квантиля удобнее вычислять именно для стьюдентизованного изображения.

Необходимо отметить, что при использовании данной модели предполагается, что процедура стационаризации реализовалась «идеально» и поэтому поле кван-

тиля для данной модели имеет или постоянный уровень или небольшие отклонения от постоянного значения.

Как было отмечено выше, объекты (бл. 4) и ДП (бл. 3) имеют похожие структуры, отличающиеся от структуры ГП. Поэтому в блок-схему на рис. 3 введен блок 10, который описывает влияние объектов и ДП на оценку полей параметров распределения ГП. Для описания подобного влияния используется понятие ОВ, по отсчетам которой реализуются процедуры формирования оценок полей параметров распределений ГП. В ОВ попадают отсчеты, соответствующие аномальным наблюдениям, т.е. объектам дискретной структуры, которые вызывают смещение оценок полей параметров ГП. Такая ситуация приводит к различного рода негативным последствиям,

ется устойчивое к таким аномальным наблюдениям оценивание. В блоке 8 реализуется устойчивое оценивание поля параметра положения и поля параметра размаха нестационарного распределения ГП. В блоке 9 осуществляется устойчивое оценивание поля заданного квантиля  $C_{F_{LT}}$  стьюдентизованного ГЛИ. Наличие ДП и объектов при оценивании параметров распределений ГП нестационарного ГЛИ приводит к необходимости использования при оценивании алгоритма категоризации ОВ.

Основываясь на полученной устойчивой (категоризованной) оценке полей параметра положения  $\{m_y^k(i, j)\}$ , параметра размаха  $\{\sigma_y^k(i, j)\}$  [11] и заданного квантиля  $\{C_{F_{LT}}(i, j)\}$  [12], в блоке 12 выполняется формирование порога обнаружения объектов  $\Pi_{\text{обн}}(i, j)$  на нестационарном фоне, устойчивое к аномальным наблюдениям:

$$\begin{cases} Y(i, j) > \Pi_{\text{обн}}(i, j) + m_y^k(i, j) + C_{F_{LT}}(i, j) \sigma_y^k(i, j) \text{ при } \Gamma_{\text{обн}} = 1, \\ Y(i, j) < \Pi_{\text{обн}}(i, j) + m_y^k(i, j) + C_{F_{LT}}(i, j) \sigma_y^k(i, j) \text{ при } \Gamma_{\text{обн}} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{ct}(i, j) = [Y(i, j) - m_y^k(i, j)] / \sigma_y^k(i, j) > \Pi_{\text{обн}}^{cr}(i, j) = C_{F_{LT}}(i, j) \text{ при } \Gamma_{\text{обн}} = 1, \\ Y_{ct}(i, j) = [Y(i, j) - m_y^k(i, j)] / \sigma_y^k(i, j) < \Pi_{\text{обн}}^{cr}(i, j) = C_{F_{LT}}(i, j) \text{ при } \Gamma_{\text{обн}} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

например к появлению аномальных значений вероятности ложной тревоги (может отличаться от номинального значения на 3...4 порядка).

Блоки 3...7 и 10 на рис. 3 описывают модели полезных сигналов (объектов) и помех, а также их взаимное влияние, но не содержат алгоритмов для их обработки. Описание последующих блоков – 8, 9, 11, 12, 13 – непосредственно относится к функционированию алгоритмов обработки.

В блоках 8 и 9 учитывается влияние выбросов ДП и объектов, описанное в блоке 10, и выполня-

ется устойчивое сравнение отсчетов поля исходного ГЛИ  $\{Y(i, j)\}$  со сформированным с использованием помехозащищенных алгоритмов порогом  $\Pi_{\text{обн}}(i, j)$ . При этом может быть реализовано сравнение как исходного поля  $\{Y(i, j)\}$  с нестационарным порогом (1), так и стационаризованного поля  $\{Y_{ct}(i, j)\}$  с порогом, соответствующим заданному квантилю  $C_{F_{LT}}(i, j)$  (соответствующему ложной тревоге) распределения (2). На выходе блока 13 формируются решения об обнаружении по каждой  $k$ -й отметке  $\Gamma_{\text{обн}}(k)$ .

При формировании полиномиальных регрессионных моделей поля параметров  $\{m^k_y(i, j)\}$ ,  $\{\sigma^k_y(i, j)\}$  указываются (постулируются) порядки полиномов, которыми описываются поля параметров распределения неоднородного фона (бл. 6 и бл. 8 на рис. 3) [13]. Для согласования порядка постулированной полиномиальной модели и порядка реальной модулирующей функции фона используются методы подгонки моделей помех (рис. 3, бл. 11). Решение данной проблемы соответствует адаптации порядка регрессионной модели.

#### 4. Примеры структур аддитивно-непараметрических обнаружителей

Структуры обнаружителей, показанные на рис. 4, а и 4, б, технически реализуют задачи, обозначенные блоками 8 и 9 на рис. 3. А именно: в них реализуются устойчивое оценивание полей параметров положения (среднего) и размаха (СКО) при наличии засоряющих аномальных выбросов (рис. 3, бл. 8), а также устойчивое оценивание поля заданного квантиля  $C_{\text{ФИЛ}}$  стьюдентизованного ГЛИ (рис. 3, бл. 9). Блок-схемы на рисунках 4, а и 4, б реализуют оценивание поля параметра положения в соответствии с алгоритмом работы блока 8.2 на рис. 2, т.е. с помощью процедуры предварительного обнаружения и замеще-

ния аномальных наблюдений [11]. Использование алгоритма категоризации соответствует реализации робастной процедуры оценивания полей параметра положения и параметра размаха.

Рассмотрим подробнее структуру обнаружителей. В блоке категоризации (бл. 1 на рис. 4, а и 4, б) реализуется процедура предварительного обнаружения аномальных выбросов (которыми являются выбросы от объектов-целей, береговой черты, донных неоднородностей и т.п.). Для исключения влияния на процедуру оценивания параметров фона (бл. 2 и бл. 3) аномальных выбросов, приводящего к смещению оценок полей параметров, дополнительным этапом обработки, реализуемым в блоке категоризации, является замещение аномальных выбросов отсчетами, сформированными (интерполированными) из отсчетов «окружающего» выбросы фона.

Выходом бл. 1 является поле данных, подвергнутых процедуре категоризации, т.е. поле  $\{Y^k(i, j)\}$ , не содержащее аномальных наблюдений. Благодаря применению процедуры категоризации достигается возможность формирования робастных оценок, поэтому фильтр-оценщик (бл. 2 на рис. 4, а, б) может быть линейным, т.к. влияние аномальных выбросов на результат оценивания «подавлено» процедурой категоризации. На выходе фильтра-оценщика (бл. 2) формируется оценка параметра

положения (в частном случае – скользящего среднего  $m^k_y(i, j)$ ).

Оценка поля размаха флюктуаций (в частном случае поля СКО – бл. 3, рис. 4, а, б) может быть реализована разными способами: либо непосредственно как оценка СКО, либо с использованием скользящего среднего модуля второй конечной разности (МВКР) «категоризованного» поля  $\{Y^k(i, j)\}$ , т.е.  $|\Delta^2 Y^k(i, j)|$ . Оценка среднего МВКР по своей сути близка к оценке СКО, но его алгоритмическая реализация заметно проще, поэтому такая реализация оцениваемого параметра размаха в большинстве случаев оправдана. Оценка скользящего среднего МВКР может быть реализована с использованием линейного фильтра-оценщика (независимо от фильтра, используемого в блоке 2). Рациональнее при обработке изображений (двумерных полей данных) использовать двумерные фильтры, например фильтр с конечными импульсными характеристиками по дальности и азимуту. Выход бл. 3 – это оценка СКО (или МВКР)  $\sigma^k_y(i, j)$ , которая поступает на блок формирования порога категоризации  $\Pi_{\text{кат}}$  (бл. 4). Порог  $\Pi_{\text{кат}}$  по величине существенно меньше основного порога обнаружения  $\Pi_{\text{обн}}(i, j)$  и определяется вероятностью ложной категоризации  $F_{\text{ктр}}$ , которая существенно больше вероятности ложной тревоги  $F_{\text{лт}}$ .

Типичные значения этих вероятностей:  $F_{\text{лт}} = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ ,  $F_{\text{ктр}} = 2 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-2}$ .

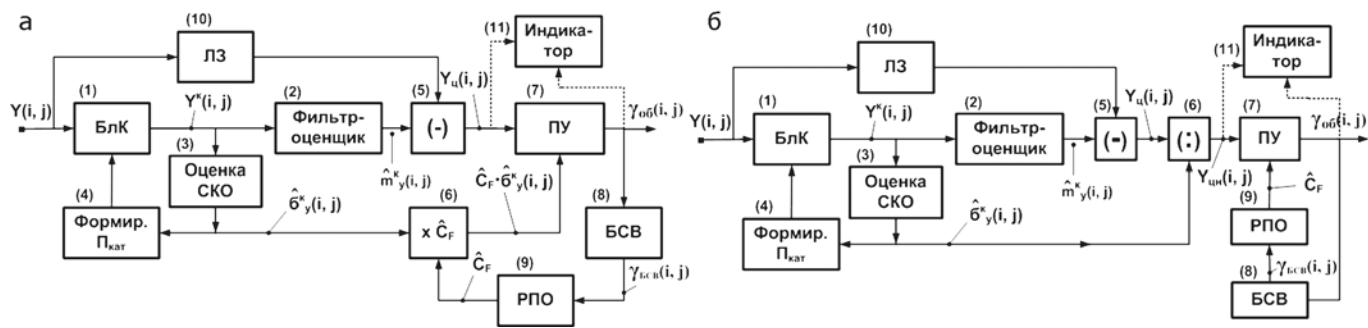


Рис. 4. Аддитивно-непараметрический обнаружитель сигналов с категоризацией данных: а – вариант 1; б – вариант 2

На рис. 4, б в бл. 5 выполняется процедура центрирования, результатом является центрированное поле данных  $\{Y_u(i, j)\}$ , а в блоке 6 реализуется процедура нормирования центрированного поля на параметр размаха, в результате формируется поле  $Y_{\text{шн}}(i, j)$ , стационаризованное по параметру положения  $\{m^k_y(i, j)\}$  и параметру размаха  $\{\sigma_y^k(i, j)\}$ .

В алгоритме, приведенном на рис. 4, а, выполняется только процедура центрирования (бл. 5), операция нормировки не производится, вследствие этого по-разному реализовано формирование порога обнаружения  $\Pi_{\text{обн}}(i, j)$ , поступающего на пороговое устройство (бл. 7). На рис. 4, а значение порога формируется как произведение оценки квантиля  $C_{\text{Фlt}}$  на оценку СКО. Этот порог является «плавающим», т.к. включает оценку параметра размаха распределения фона. На блок-схеме рис. 4, б используется операция нормирования центрированного поля данных  $\{Y_u(i, j)\}$  на поле размахов  $\{\sigma_y^k(i, j)\}$ , поэтому порог этого обнаружителя формируется как оценка поля квантиля  $\{C_{\text{Фlt}}(i, j)\}$ , соответствующего заданной вероятности ложной тревоги  $F_{\text{лт}}$ .

Рассмотрим функционирование на рис. 4, а, б замкнутой петли, формирующей оценку квантиля  $C_{\text{Фlt}}(i, j)$  (блоки 8 и 9 на рис. 4, а, б). Оценка данного квантиля формируется блоком селекции выбросов (БСВ – бл. 8) и регулятором порога обнаружения (РПО – бл. 9). Для обнаружителя, показанного на рис. 4, б, оценка квантиля  $C_{\text{Фlt}}(i, j)$  является порогом обнаружения, который после формирования подается на пороговое устройство. А порог обнаружителя на рис. 4, а, как было отмечено выше, соответствует произведению  $C_{\text{Фlt}} \sigma_y^k(i, j)$ . Алгоритм работы БСВ соответствует

реализации процедуры структурного анализа аномальных выбросов (см. блоки 5 и 5.1 на рис. 7) и использования только шумовых выбросов для регулировки порога обнаружения. Аналогом функционирования петли БСВ и РПО на рис. 4 является алгоритм 9 на рис. 3, причем устойчивость формирования оценки квантиля  $C_{\text{Фlt}}(i, j)$  обеспечивается предварительным цензурированием в БСВ выбросов, которые не являются шумовыми, а непараметрическая регулировка (оценка) поля квантиля  $\{C_{\text{Фlt}}(i, j)\}$  выполняется блоком РПО. Нужно отметить, что оценка квантиля может быть выполнена как по рекуррентной процедуре, так и по прямой разомкнутой процедуре оценивания «хвоста» распределения решающей статистики [12].

## 5. Варианты реализации частных алгоритмов обработки ГЛИ при реализации процедур аддитивно-непараметрического обнаружения

### 5.1. Классификация процедур категоризации

В соответствии со сделанными выше замечаниями процедура предварительного обнаружения аномальных отсчетов, выполняемая на этапе оценивания полей параметров (рис. 2, бл. 8.2; рис. 4, бл. 1) по своей идее ничем не отличается от «основного» обнаружения (алгоритмы (1) или (2)). Кроме того, при формировании обучающей последовательности  $\{Y(i, j)\}$  для блоков оценки  $m_y^k(i, j)$  (бл. 2 на рис. 4) и  $\sigma_y^k(i, j)$  (бл. 3 на рис. 4) основного обнаружителя целесообразно ввести процедуру замещения элементов последовательности, для которых выполняется гипотеза  $H_1$  (т.е. в этих элементах

присутствуют ДП), на статистики, параметры которых соответствуют параметрам  $m_y(i, j | H_0)$ ,  $\sigma_y(i, j | H_0)$ .

Указанная процедура была названа процедурой категоризации обучающей последовательности [11, 14].

Таким образом, процедура категоризации включает:

а) предварительное обнаружение выбросов, обусловленных ТДП;

б) замещение отсчетов в элементах разрешения, «пораженных» ТДП, на отсчеты, статистические характеристики которых эквивалентны характеристикам при выполнении гипотезы  $H_0$  в данных элементах разрешения  $m_y^{(1)}(i, j | H_0)$  [11].

К фильтру, формирующему в блоке 1 на рис. 4 оценку  $m_y^{(1)}(i, j)$ , предъявляются следующие требования:

а) оценка при гипотезе  $H_1$  должна быть не смещенной относительно оценки при гипотезе  $H_0$ , т.е.  $M[m_y^{(1)}(i, j | H_1)] = M[m_y^{(1)}(i, j | H_0)]$ ;

б) для возможно лучшего разрешения сигналов  $S_i$  и  $S_{i+j}$  интервал памяти фильтра должен быть минимальным. Предельным случаем фильтра, удовлетворяющего этим требованиям, является полиномиальный интерполирующий фильтр первого порядка ( $\Phi_1 = 1$ ) с интервалом памяти  $n_1 = 3$  элементам разрешения. Весовая функция такого фильтра  $g^{(1)} = (1/2, 0, 1/2)'$ , а формируемая им оценка равна

$$m_y^{(1)}(i, j) = \frac{1}{2} [Y(i-1, j) + Y(i+1, j)]. \quad (3)$$

На рис. 5 представлена классификация процедур категоризации, рассмотрены общие вопросы реализации возможных вариантов процедуры категоризации, выполняемой блоком 1 на рис. 4, а, б. При построении классификации процедур категоризации использу-

зованы различные особенности их реализации.

### 1. Классификация по величине порога категоризации (рис. 5, бл. 2).

Предварительное обнаружение аномальных выбросов на обрабатываемом ГЛИ может быть выполнено:

- на основном пороге (имеет достаточно высокое значение);
- на нижнем вспомогательном пороге.

В последнем случае значение вспомогательного порога меньше, чем значение основного порога обнаружения, и соответственно вероятность ложной тревоги при реализации процедуры категоризации выше. Например, если вероятность ложной тревоги на основном пороге  $F_{\text{лт}} = 10^{-4}$ , то на пороге предварительного обнаружения она может быть  $F_{\text{кгт}} = 10^{-2}$  [11].

Увеличение вероятности ложной категоризации на 1–1,5 порядка не имеет значимых негативных последствий для процедуры оценки параметров полей среднего и размаха. Кроме того, порог, имеющий меньшую величину, чем

порог основного обнаружения, необходим для сегментации ГЛИ по уровню при формировании идентификационных признаков (ИДП) отметок [12, 15].

### 2. Классификация по виду используемых оценок (рис. 5, бл. 3).

При реализации процедуры категоризации проводится оценка двух параметров фона, из которых формируется порог предварительного обнаружения  $\Pi_{\text{кат}}$  – среднего и СКО. При этом используется вспомогательная оценка среднего, т.к. основной этап оценивания параметра положения в адаптивном обнаружителе проводится после процедуры категоризации в фильтре-оценщике (рис. 4, а, б, бл. 2). Способ формирования оценки СКО может быть как «основным», так и «вспомогательным», в зависимости от того, где эта оценка реализуется – в блоке категоризации или в обнаружителе в основном канале оценивания параметров фона. Формирование основной оценки СКО продемонстрировано в бл. 3 на рис. 4, а, б. При формировании вспомогательной оценки СКО могут использоваться дру-

гие параметры (по отношению к основному каналу оценивания СКО), например, могут применяться иные апертуры фильтров-оценщиков при реализации процедур оценивания.

Кроме того, и основная и вспомогательная оценки СКО могут быть реализованы с оцениваемым или фиксированным квантилем вероятности ложной категоризации  $C_{F_{\text{лт}}}$ . Оцениваемый квантиль используется в петле регулировки порога предварительного обнаружения как показано на рис. 4, а, б (на примере формирования основного порога). А использование фиксированного значения квантиля  $C_{F_{\text{лт}}}$  позволяет упростить алгоритм формирования порога категоризации.

### 3. Классификация по способу отбраковки выбросов (рис. 5, бл. 4).

Задача формирования процедуры категоризации для отметок любых произвольных форм и произвольных размеров оказывается достаточно сложной. Для ее решения процедура категоризации должна иметь определенные особенности, например, возможность многократного обращения к данным. Однократное сканирование (обработка) ГЛИ позволяет сформировать решения по предварительному обнаружению, а при многократном обращении к данным возможно использование рекурсивных алгоритмов, которые учитывают результаты первичного обнаружения и формируют признаки обнаружения для сложных по своей структуре отметок.

Для отметок фиксированной длительности (одиночные отметки) процедура категоризации реализуется достаточно просто. Такая задача возникает, например, в обзорно-поисковых гидролокационных станциях, для которых



Рис. 5. Классификация процедур категоризации данных при реализации алгоритмов адаптивного обнаружения

целями являются малоразмерные объекты. Для таких станций разрешающая способность по дальности сопоставима с линейными размерами цели, поэтому цель в такой ситуации является точечной. При таких условиях в алгоритм, который является помехозашщенным по отношению к точечным объектам, вводятся априорные знания о размерах целей, но чаще всего таких априорных данных нет. Поэтому возникает проблема реализации процедуры категоризации по сложным структурам выбросов.

Возможны следующие варианты алгоритмов:

- категоризация выбросов фиксированной длительности;
- категоризация выбросов априорно неизвестной длительности.

Процедура категоризации может быть как одноэтапной, так и двухэтапной.

При одноэтапной процедуре интервал категоризации может быть как с ограничением длительности, так и без ограничения. Интервал категоризации ограничивает максимальный размер объекта, при котором процедура выполняется успешно. Процедура без ограничения интервала категоризации является более «универсальной», но ее реализация достаточно сложна.

## 5.2. Классификация процедур оценивания параметров положения и разброса распределений фоновых отражений на интервалах адаптации

На рис. 6 приведена классификация вариантов оценивания полей параметров положения  $\{m(i, j)\}$  и разброса  $\{s(i, j)\}$ .

Все процедуры оценки параметров положения и разброса распре-

делений фоновых отражений можно разделить на две группы. Первая группа – это процедуры, выполняемые на скользящих – блоки 1, 3, 4 на рис. 6, а вторая – процедуры, реализуемые на фиксированных временных интервалах – блоки 2, 13 на рис. 6. При этом оценивание может проводиться не только на временных (одномерных), но и на пространственных (двумерных) интервалах.

В патенте [15] оценивание полей параметров фона реализовано в виде блокового медианного оценивания параметров на двумерных интервалах.

Процедуры оценки полей параметров рассматриваются в предположении, что процедура категоризации уже была выполнена (выход блока 1 на рис. 4) и поэто-

му поля  $\{[Y^k(i, j)]\}$  обрабатываемых данных не содержат аномальных выбросов. Такое допущение позволяет детальнее рассмотреть именно задачи оценивания модулирующих функций фона.

В качестве оценки параметра положения может быть использована как оценка скользящего среднего значения  $M_{Loc}\{[Y^k(i, j)]\}$ , так и оценка скользящего медианы  $Me_{Loc}\{[Y^k(i, j)]\}$ , а оценивание параметра разброса распределения может проводиться как по алгоритму оценки СКО, так и по алгоритму оценки разброса распределения как медианы модуля второй конечной разности  $Me_{Loc}\{|\Delta_i^2 Y^k(i, j)|\}$  категоризованного поля ГЛИ  $\{Y^k(i, j)\}$  (здесь в обозначениях  $L_{oц}$  – апертура оценивания параметра распределения).



Рис. 6. Классификация процедур оценивания параметров положения и разброса распределений фоновых отражений на интервалах адаптации

При этом оценки параметров положения и разброса для обеспечения устойчивости должны формироваться по полю  $\{Y^k(i, j)\}$ , на котором отсутствуют (цензурированы) аномальные выбросы. Свободными от таких условий являются устойчивые методы оценивания, которые относятся к нелинейным методам (бл. 9 на рис. 2). В таких методах в процессе их реализации «автоматически» исключаются аномальные наблюдения, это позволяет избежать применения процедур категоризации. Примером такого алгоритма оценивания является применение скользящей локальной медианы. Локальность медианы подразумевает использование апертуры оценивания параметра небольшого размера, а скольжение медианы подчеркивает перемещение окна оценивания по ГЛИ (зоне обзора). При этом локальная медиана может быть и не скользящей, но в этом случае оценивание медианы по всему ГЛИ реализуется как блоковое (бл. 2, 11, 12 на рис. 6). Медианное оценивание в таком случае проводится на фиксированной сетке сегментов (блоков), формируемой в результате пространственной сегментации поля данных.

Рассмотрим первую группу процедур, использующих скользящий интервал (бл. 1, 3, 4 на рис. 6). В блоках 5...10 на рис. 6 рассматриваются вопросы построения и использования полиномиальных моделей модулирующей функции фона.

Процедуры оценивания могут быть реализованы с применением фиксированных полиномиальных моделей (ПМ) модулирующей функции фона (МФФ), а также с использованием адаптивных моделей МФФ. При использовании фиксированной модели неизменяемым является порядок полинома,

описывающий степень неоднородности фона. При реализации данной модели возможна адаптация интервала оценивания, т.е. изменение апертуры оценивания (размера обучающей выборки). Нужно отметить и ограничения процедуры: алгоритмы плохо «справляются» с выбросами, размеры которых соизмеримы с интервалом оценивания.

Адаптивность модели МФФ реализуется с помощью «подгонки» одного или нескольких параметров модели одним из четырех вариантов:

- адаптация интервала оценивания + фиксированный порядок модели МФФ (уже упоминавшаяся модель);
- адаптация порядка модели МФФ + фиксированный интервал оценивания;
- адаптация и порядка модели МФФ, и интервала оценивания. Данный тип адаптации является наиболее сложным при реализации, но дает большую помехоустойчивость процедуре оценивания;
- использование нестационарных режимов фильтрации, «управляемых» зонами обнаружения ДП.

Отметим, что режим нестационарной фильтрации актуален при работе ГЛ-ОБО в прибрежной зоне, когда формируется дискретная помеха от береговой черты. За счет управления весовой функцией фильтра с учетом положения дискретной помехи удается сохранить оценки гладкого фона неискаженными отражениями от берега. Таким образом, в ситуации, когда апертура фильтра «накрывает» не только отсчеты гладкого фона, но и часть береговой черты, возможно применение бланкирования отсчетов дискретной помехи, попавших в апертуру фильтра. Это позволяет уменьшить влияние нестационарной дискретной поме-

хи на оценку гладкого фона. При стробировании (бланкировании) отсчетов дискретной помехи изменяется весовая функция фильтра, таким отсчетам при формировании отклика фильтра будет соответствовать нулевой вес.

Реализация нестационарных режимов фильтрации является алгоритмически сложной, но позволяет без ошибок оценивать параметры фона при наличии мешающих отражений от береговой черты.

Рассмотрим вторую группу процедур оценивания, реализуемых на фиксированных пространственных интервалах (блоковое оценивание). Этот способ оценивания, так же как и скользящее оценивание, может быть применен как к одномерным полям данных, так и к двумерным. В бл. 13 на рис. 6 перечислены операции, выполняемые при блоковом оценивании полей параметров.

1. На интервале блокового оценивания между узлами выполняется построение ПМ МФФ первого порядка. Такая модель достаточно точно описывает нестационарность фона на интервале оценивания небольших размеров. Оценки, формируемые в узлах блоков, при использовании ПМ первого порядка, являются несмещенными. Модели более высокого порядка формируют смещенную оценку и как следствие формируют порог обнаружения, который не точно соответствует заданной вероятности ложной тревоги.

2. На интервале межблоко-гового сглаживания используются ПМ МФФ более высокого порядка: второго, третьего и т.д. Последнее обусловлено тем, что на интервале в несколько узлов пространственной сегментации несмещенное оценивание фона не обеспечивается полиномиальной моделью первого порядка, поэтому

му возникает необходимость использования ПМ более высоких порядков.

3. На этапе «обратного» внутри- и межблокового интерполяирования используются ПМ МФФ первого–второго порядков. После оценивания отсчетов в узлах блоков проводится интерполирование значений отсчетов в каждый пространственный дискрет разрешения, находящийся между узлами (внутри блоков оценивания).

### 5.3. Классификация процедур селекции выбросов при реализации алгоритмов адаптивно-непараметрического обнаружения

Рисунок 7 комментирует логику реализации и работу БСВ, входящего в алгоритм адаптивно-непараметрического обнаружителя (АН-обнаружителя) (блок 8 на рис. 4, а, б). На рис. 7 представлена классификация различных алгоритмов и подходов, которые могут быть использованы при отбраковке (селекции) выбросов, участвующих в процедуре непараметрической оценки квантиля распределения  $C_{\text{Filt}}(i, j)$ .

#### 1. Порог селекции.

Задача БСВ состоит в исключении из обработки выбросов, которые не являются шумовыми. К таким выбросам можно отнести дискретные помехи и различные виды целей. В связи с этим возникает вопрос о величине порога селекции.

Порог селекции может быть вспомогательным и основным, при этом значение основного порога в отдельных случаях может быть слишком высоким для применения его в процедуре селекции выбросов. В качестве вспомогательного порога могут быть использованы «верхний» и «нижний» пороги. Так, в работе [12]

использован нижний порог, который является порогом сегментации (блок 1.1, б на рис. 7). Кроме того, при реализации алгоритма селекции выбросов используется структурный анализ выбросов над порогом (блок 5 на рис. 7).

#### 2. Вид алгоритма селекции.

Применяется два вида алгоритма селекции – амплитудное и структурное цензурирование. При селекции выбросов по верхнему вспомогательному порогу реализуется амплитудное цензурирование. В этом случае по значению амплитуды выброса принимается решение о том, является ли выброс ложной тревогой или мощной отметкой от цели (ДП).

Также возможна реализация алгоритма структурного цензурирования по нижнему вспомогательному и основному порогам. Если отметка занимает площадь большую, чем предполагаемая площадь шумового выброса, то она отбрасывается. Данный вид структурного цензурирования может быть выполнен

двумя способами: по анализу связности отметок (протяженности, площади) и по анализу «насыщенности» (множественности) отметок (блоки 5.1 и 5.2 на рис. 7).

Прокомментируем подробнее второй способ (в данном способе важным является этап структурного анализа выбросов). При обнаружении сигналов в ГЛ–ОБО при высоком разрешении по дальности возникают нерелеевские отражения от морских волн. Такая ситуация возникает, когда размер элемента разрешения ГЛИ меньше, чем длина морской волны. При этом на ГЛИ возникают области, где присутствует много выбросов небольшой амплитуды. Проводя «локальный» статистический анализ параметров (структур) выбросов, можно «классифицировать/разделить» множественные отражения (выбросы) от морских волн и отметки от объектов.

#### 3. Вид интервала селекции.

Интервал, на котором проводится анализ, может быть

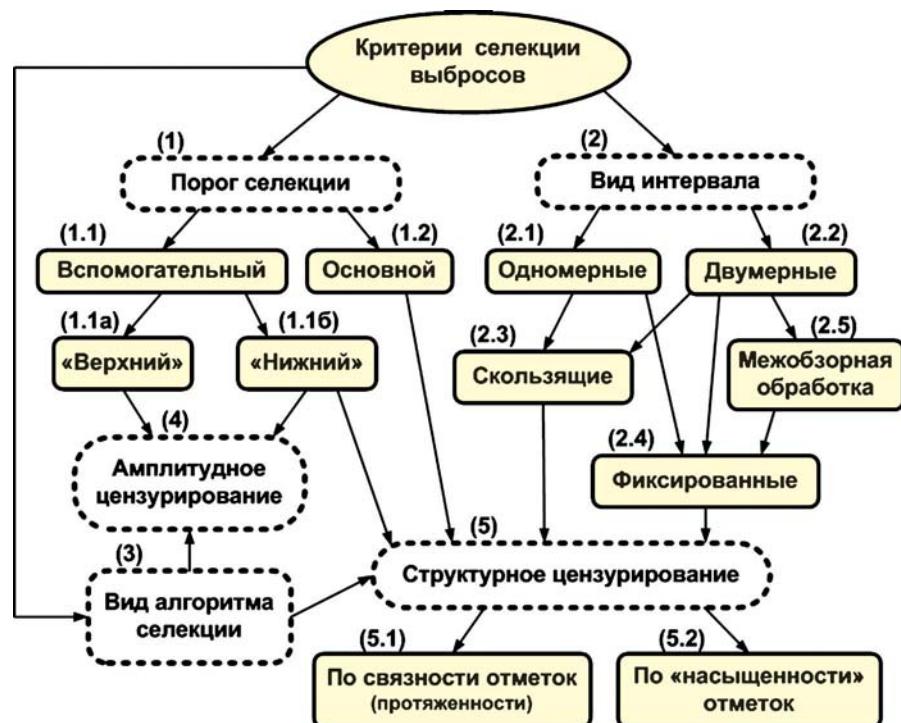


Рис. 7. Классификация алгоритмов селекции выбросов при реализации алгоритмов адаптивно-непараметрического обнаружения

одномерным или двумерным. Наиболее часто применяется двумерный интервал. Интервалы анализа также могут быть скользящими, когда апертура анализа (секции) выбросов перемещается по изображению, и фиксированными, когда осуществляется блоковое оценивание по отдельным сегментам гидролокационного изображения. При использовании двумерных интервалов возможно применение межобзорной (межциклической) обработки, которая позволяет выполнить верифицированный анализ ГЛИ, сделать его более наполненным информативно. Данный вид обработки является важным и перспективным, но требует разработки более сложных (и корректных) алгоритмов.

## 6. Анализ эффективности алгоритма защиты от дискретных помех

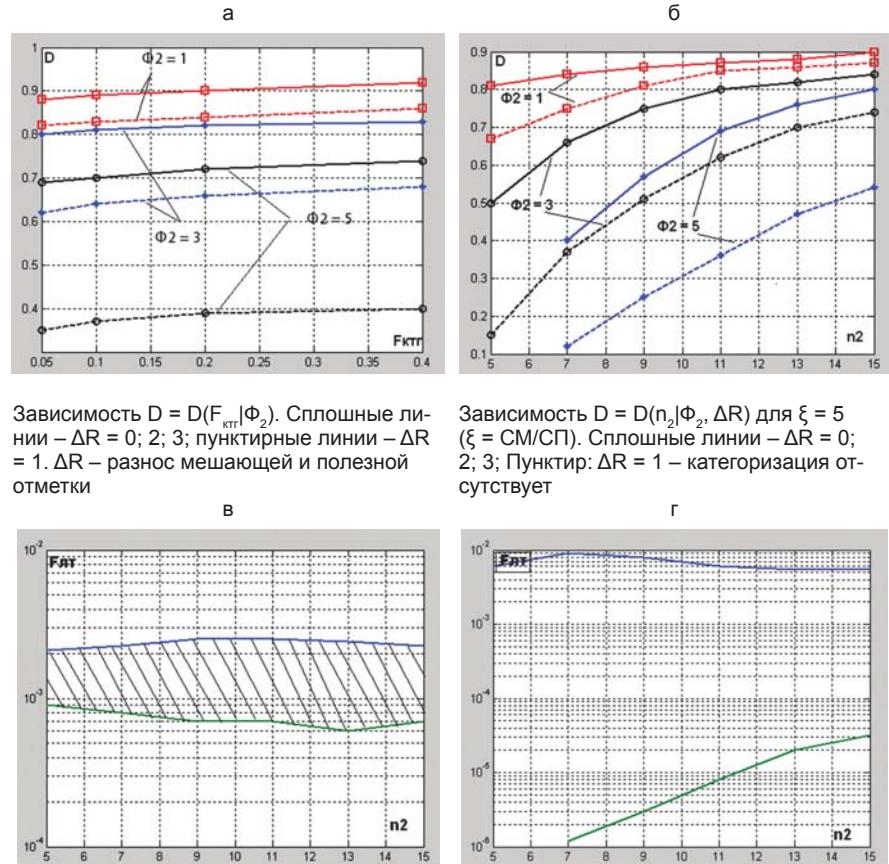
Основные характеристики АН-обнаружителя с блоком категоризации (рис. 4, а, б) были получены путем статистического моделирования на ПЭВМ.

Рассматриваемые ниже зависимости характеризуют основные свойства такого обнаружителя.

1. Зависимости  $D = D(F_{\text{крг}}|\Phi_2)$  приведены на рис. 8, а, б. Обозначения на рисунках  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – полиномиальные фильтры блока категоризации и основного обнаружителя (так же обозначается и порядок соответствующих фильтров);  $n_1$ ,  $n_2$  – интервалы памяти фильтров  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ;  $\Delta R$  – разнос (в элементах разрешения) между полезным  $S_i$  и мешающим  $S_{i+j}$  сигналами (т.е.  $\Delta R \equiv j$ ); амплитуды сигналов  $S_i = S_{i+j} = S_{D=0.9}$ .

Анализ зависимости на рис. 8, а показывает следующее:

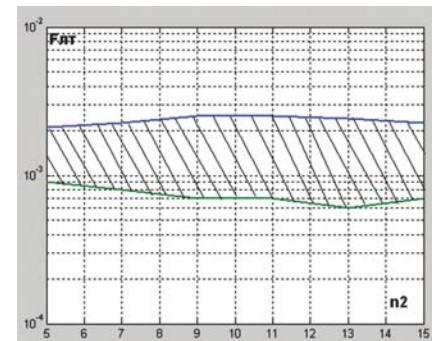
а) при увеличении порядка  $\Phi_2$  основного фильтра вероятность правильного обнаружения



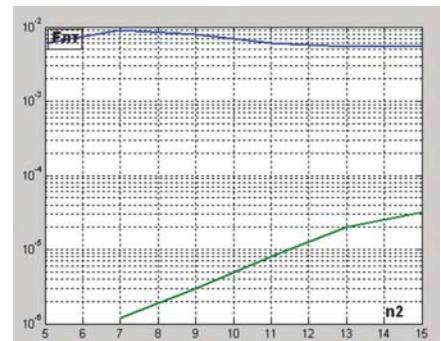
Зависимость  $D = D(F_{\text{krg}}|\Phi_2)$ . Сплошные линии –  $\Delta R = 0; 2; 3$ ; пунктирные линии –  $\Delta R = 1$ .  $\Delta R$  – разнос мешающей и полезной отметки

Зависимость  $D = D(n_2|\Phi_2, \Delta R)$  для  $\xi = 5$  ( $\xi = \text{СМ/СП}$ ). Сплошные линии –  $\Delta R = 0; 2; 3$ ; Пунктир:  $\Delta R = 1$  – категоризация отсутствует

В



Зависимости диапазонов варьирования  $F_{\text{m}} = F_{\text{m}}(n_2|\Phi_2, \xi = 5)$  для  $F_{\text{krg}} = 10^{-1}$ ,  $F_{\text{ном}} = 10^{-3}$ , при  $\Delta R = 0, 2, 3$ .  $\xi$  – соотношение амплитуд мешающей и полезной отметки



Зависимости диапазонов варьирования  $F_{\text{m}} = F_{\text{m}}(n_2|\Phi_2, \xi = 5)$  для  $F_{\text{krg}} = 10^{-1}$ ,  $F_{\text{ном}} = 10^{-3}$ , при  $\Delta R = 1$ .  $\Delta R = 1$  – категоризация отсутствует

Рис. 8. Результаты моделирования алгоритма адаптивно-непараметрического обнаружения с категоризацией данных

Д уменьшается (что обусловлено при адаптивном обнаружении увеличением флюктуационных потерь на оценивание  $m_y$ );

б) с увеличением  $F_{\text{krg}}$  при  $\Phi_2 = \text{const}$   $D$  возрастает незначительно;

в)  $D$  практически не зависит от разноса сигналов при  $\Delta R \neq 1$ ;

г)  $D(\Delta R = 1) < D(\Delta R \neq 1)$ , причем разница растет с увеличением порядка  $\Phi_2$ .

Зависимость средней вероятности ложной тревоги  $F_{\text{ср}}$  в окрестностях сигналов от  $F_{\text{krg}}$ :  $F_{\text{ср}}$  при увеличении  $F_{\text{krg}}$  от  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $0,4$  возрастает от  $1,2 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ . Совместный анализ графиков, представленных на рис. 8, а, позволяет легко объяснить рост  $D$  при увеличении  $F_{\text{krg}}$ . Последнее объясняется изменением распределения

$W_{yi}^{(k)}(\cdot)$  по сравнению с  $W_{yi}(\cdot)$ ; в частности, появляется небольшое отрицательное смещение среднего, вследствие чего  $F$  и  $D$  на выходе обнаружителя возрастают.

2. Зависимости вероятности обнаружения  $D = D(n_2|\Phi_2, \Delta R)$  для  $\xi = 5$  приведены на рис. 8, б. Увеличение  $D$  с ростом  $n_2$  при адекватной регрессионной модели объясняется уменьшением флюктуационных потерь при оценивании  $m_y^{(2)}(i, j)$ .

Характерной особенностью графиков на рис. 8, б является уменьшение  $D$  при  $\Delta R = 1$ . Последнее объясняется тем, что при  $\Delta R=1$  полезные и мешающие сигналы не разрешаются интервалом памяти фильтра  $\Phi_1$ . Это приводит

к уменьшению вероятности категоризации и как следствие к снижению эффективности процедуры категоризации.

3. На рис. 8, в приведены зависимости вероятности ложной тревоги  $F_{\text{лт}} = F_{\text{лт}}(n_2|\Phi_2, \xi = 5)$  для  $F_{\text{крг}} = 10^{-1}$ ,  $F_{\text{ном}} = 10^{-3}$ . На графиках показаны зоны, в которые укладываются значения  $F_{\text{лт}}$  в окрестных с «сигнальным» элементах разрешения. Видно, что вариации  $F_{\text{лт}}$  при  $\Delta R = 0, 2, 3, \dots$  для  $\Phi_2 = 1, 3, 5$  отличаются незначительно и изменяются относительно своего среднего уровня  $F_{\text{ср}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  всего лишь в 1.5–2 раза.

Эффективность процедуры категоризации подтверждается также сравнением вариаций  $F_{\text{лт}}$  и  $D$ , показанных на рис. 8, б, г штриховыми линиями для адаптивного обнаружителя без категоризации и сплошными линиями – при применении процедуры категоризации.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что

рациональными параметрами процедуры категоризации являются следующие: интервал памяти вспомогательного фильтра-оценщика равен трём элементам разрешения, а вероятность ложной категоризации  $F_{\text{лт}}$  нужно выбирать в диапазоне  $10^{-1} \dots 10^{-2}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены процедуры обработки, позволяющие обеспечить устойчивость адаптивно-непараметрических обнаружителей при наличии на обрабатываемом ГЛИ нестационарных гладких и дискретных помех.

В частности, рассмотрены следующие вопросы:

1) разработаны общие принципы построения устойчивых алгоритмов обнаружения объектов при наличии нестационарных помех с априорно неизвестными характеристиками;

2) разработаны принципы защиты алгоритмов оценивания параметров гладких ревербераци-

онных помех при наличии на гидролокационном изображении точечных и локально-протяженных дискретных помех;

3) защита трактов оценивания полей параметров основана либо на применении алгоритма категоризации обучающей выборки, либо на использовании алгоритмов локальной медианной фильтрации, либо на использовании блоковых оценок медиан;

4) приведены классификации вариантов реализации основных частных алгоритмов, реализующих общий алгоритм обработки нестационарного ГЛИ – алгоритма категоризации, алгоритмов оценивания полей параметров нестационарных ГЛИ, алгоритмов помехоустойчивого оценивания квантиля  $C_{\text{лт}}$ , соответствующего заданной вероятности ложной тревоги;

5) проанализированы особенности всех частных алгоритмов обработки, приведены комментарии по применению частных алгоритмов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. [и др.] Вопросы статистической теории радиолокации / под ред. Г.П. Тартаковского. Т. 1. М.: Советское радио, 1963. 425 с.; Т. 2, 1964. 1086 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
3. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации. М.: Сов. радио, 1973. 456 с.
4. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
5. Леман Э. Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1964. 500 с.
6. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия: в 2-х выпусках. Вып. 1: пер. с англ. / под ред. Ю.П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1982. 317 с.
7. Робастность в статистике: Подход на основе функций влияния / пер. с англ. Ф. Хэмпель и др. М.: Мир, 1989. 324 с.
8. Хьюбер Дж.П. Робастность в статистике: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 304 с.
9. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
10. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.
11. Козлов Н.Н., Корнеев Ю.А., Мазин Ю.В. Категоризация данных при адаптивном обнаружении сигналов // Труды ЛИАП. 1979. Вып. 24. 156 с.
12. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ: пер. с англ. М.: Мир, 1980. 456 с.
13. Смоляк С.А., Титаренко Б.П. Устойчивые методы оценивания. М.: Статистика, 1980. 208 с.
14. Устройство сегментации локационного изображения: Пат. № 2219562 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> G01 S 15/00 / Б.М. Казаков, А.А. Войтов, Ю.А. Корнеев, Р.А. Мяльк, Е.А. Антохин; ФГУП «ЦНИИ «Морфизприбор». – №2003128851; заявл. 20.12.03; опубл. 15.02.05.
15. Устройство обработки локационного изображения: Пат. № 2212042 Российской Федерации: МПК<sup>7</sup> G01 S 15/00, G06 T 5/00 / Б.М. Казаков, А.А. Войтов, Ю.А. Корнеев, Р.А. Мяльк, Е.А. Антохин; ФГУП «ЦНИИ «Морфизприбор». – №2003121232; заявл. 10.09.03; опубл. 15.12.04.