

Принципы синтеза алгоритмов обнаружения целей пассивными оптико-локационными станциями расположенными на подвижных носителях

О.А. Ивлев⁽¹⁾, В.Я. Колючкин⁽²⁾, А.В. Макаренко⁽¹⁾,
А.Г. Мошнин⁽¹⁾, А.В. Правдивцев^(1,2)

⁽¹⁾ – ФГУП «НИИ ПП» (E-mail: avm.science@mail.ru), ⁽²⁾ – МГТУ им. Н.Э.Баумана

Описана методология разработки алгоритма обнаружения целей пассивными оптико-локационными станциями с матричными приёмниками информации расположенными на подвижных носителях. Особенностью подхода является сквозной цикл синтеза мультипризнакового самосогласованного алгоритма обнаружения с адаптацией весов признаков и порогов принятия решений.

Обобщённый процесс создания обнаружителя объектов для случая пассивных оптико-локационных станций (ОЛС) с матричными приёмниками информации (МПИ) расположенными на подвижных носителях состоит из четырёх основных, жёстко взаимосвязанных этапов:

I. Анализ и декомпозиция поставленной задачи обнаружения с учётом реальной наблюдаемости объектов.

II. Синтез качественной и устойчивой алгоритмической системы обнаружителя, являющейся его аналитическим ядром.

III. Разработка высокопроизводительного масштабируемого аппаратно-программного комплекса исполняющего алгоритмы системы обнаружения.

IV. Разработка методов и схем эффективного встраивания созданной системы обнаружения в информационно-управляющие контуры носителя и ОЛС при реальных условиях их эксплуатации.

Согласованная и взаимосвязанная реализация этих этапов – представляет собой сквозной синтез системы обнаружения. В настоящей работе рассмотрена методология реализации первых двух этапов, с учётом требований и ограничений налагаемых на них последующими этапами. Причём синтез алгоритмической системы обнаружителя должен быть подчинён четырём базовым положениям:

- 1) решение порождаемое системой обнаружения должно быть адекватно целям и задачам стоящим перед системой;
- 2) система обнаружения должна принимать решение на основе доступной для наблюдения информации об объекте;
- 3) процесс обнаружения дополнительно должен быть поддержан априорным и оперативным информационным обеспечением с приемлемым уровнем доступности, информативности и достоверности;
- 4) должно быть строгое и однозначное соответствие между реальными свойствами наблюдаемого объекта и апостериорными представлениями о нём формируемыми системой обнаружения.

Анализ и декомпозиция поставленной задачи обнаружения и синтез собственно алгоритмической системы обнаружителя, причём системы корректной и адекватной, отвечающей поставленной перед ней целям, подразумевает выполнение целого ряда шагов, основными из которых являются следующие:

A. Определение и формализация свойств обнаруживаемых объектов и условий их наблюдения. Операция подразумевает оконтуривание заданного множества объектов, отделение их от иных объектов и внешней среды, а также формирование перечня условий и ограничений присущих процессу их наблюдения и обнаружения.

Производится раскрытие внутренней структуры целевых объектов и их связей как с внешней средой, так и с иными внешними объектами. Также определяются существующие функциональные зависимости и протекающие процессы как внутри целевых объектов, так и по их границе (по связям с внешней средой и внешними объектами). Дополнительно, проводится формализация целей и задач стоящих перед системой обнаружения. Эти данные вкуче позволяют сформировать требования к назначению, составу, и условиям получения и применения оценок формируемых обнаружителем.

В. Формирование системы критериев и правил обнаружения объектов, селекции ложных целей, принятия окончательного решения. На данном шаге формируется набор комплексных (интегральных) критериев. Они собираются из массива критериальных составляющих – являющихся элементарными (одноцелевыми) критериями, которые в свою очередь вырабатываются из критериальных показателей – индикаторных характеристик объекта обнаружения. Дополнительно создаётся система решающих логических правил, для которой система критериев является операндом.

С. Выделение релевантных переменных состояния обнаруживаемых объектов и изучение условий наблюдаемости этих переменных. Операция подразумевает формирование массива индикаторов – релевантных переменных состояния обнаруживаемого объекта по которым работает система критериев и правил (см. пункт В). При этом определяются шкалы измерения, номинальные и аномальные диапазоны изменения выделенных переменных. Кроме того, детально изучается возможность измерения корректных значений выбранных релевантных переменных доступными инструментальными средствами при штатном и аварийных режимах функционирования системы обнаружения в реальных условиях.

Д. Формирование функционалов. На данном шаге для каждой критериальной составляющей, каждого интегрального критерия и правила синтезируются формальные математические конструкции позволяющие получить строгое и однозначное соответствие между получаемыми апостериорными оценками и реальным состоянием наблюдаемого объекта. При синтезе функционалов обнаружения, селекции ложных целей, принятия окончательного решения необходимо учитывать ограничения и особенности накладываемые архитектурными и алгоритмическими решениями по которым строится аппаратно-программный комплекс системы обнаружения.

Е. Формализация требований к информационному обеспечению процесса обнаружения. Операция подразумевает формирование перечня информационных потоков обеспечивающих (в дополнение к релевантным переменным состояния обнаруживаемых объектов) полноту задания области определения функционалов обнаружения, селекции ложных целей, принятия окончательного решения. При этом производится проверка принципиальной возможности получения приемлемого уровня доступности, информативности и достоверности поступающей в обнаружитель информации.

Ф. Синтез структурно-функциональной схемы алгоритмической системы обнаружителя. Операция подразумевает увязку функционалов и информационных потоков в единую систему обработки данных.

Г. Изучение аналитических свойств алгоритмической системы обнаружителя. На данном шаге детально изучаются устойчивость, состоятельность и несмещённость численных и логических оценок формируемых обнаружителем. Проверяется также чувствительность, полнота, непротиворечивость и избыточность системы критериев и правил обнаружения объектов, селекции ложных целей, принятия окончательного решения, а также их адекватность целям и задачам стоящим перед системой

обнаружения в целом. Внимание также уделяется расчётам рисков и потерь при получении по тем или иным причинам ошибочных оценок, рассчитываются вероятности получения неверных оценок и цена потерь от них.

Необходимо отметить, что на каждом шаге синтеза системы должно проводиться логическое обоснование принятых решений, их математическая проверка. Причём каждый шаг должен быть системно увязан со всеми остальными. Этот фактор приводит к нарушению принципов «конвейерности» и «линейности» при синтезе алгоритмической системы обнаружителя, и переводит алгоритм её синтеза в класс циклических условно ветвящихся.

Таким образом, выполнение вышеозначенных шагов с целью получения алгоритмической системы обнаружителя требует согласованного и последовательного применения методов, положений и принципов целого ряда областей научного и практического знания, что представляет собой особую цельную методологию базирующуюся на системном подходе.

Применение вышеописанной методологии к задаче синтеза алгоритмической системы обнаружителя объектов для случая пассивных ОЛС с МПИ расположенными на подвижных носителях привело к получению следующих результатов.

Необходимым условием устойчивого и качественного обнаружения объектов, является реализация следующих положений:

1. Мультипризнаковый самосогласованный алгоритм обнаружения с адаптацией весов и набора критериев, порогов и функционалов принятия решений. Под самосогласованным алгоритмом понимается процесс принятия решения на локальном уровне не по иерархическому, а по коллегиальному типу.
2. Априорное и оперативное информационное обеспечение процесса обнаружения. От БИУС (боевая информационно-управляющая система) носителя и ОЛС в обнаружитель поступает следующая информация (см. рисунок 1а): координатная – формирующая фазовый вектор носителя, границу поля зрения, линию горизонта; объектная – формирующая карты ложных и вероятных целей, карту подстилающей поверхности, области гарантированного обнаружения, уровни достоверности и информативности исходных данных. Дополнительно задаётся стратегия обнаружения определяющая режимы функционирования и целевую функцию устройства.
3. Конвейерная обработка информации. На вход обнаружителя подаётся дискретная последовательность прошедших первичную обработку скорректированных яркостных полей формируемых МПИ – скалярных полей $s(x, y, t)$. Предполагается, что сигнал $s(x, y, t)$ является носителем информативных признаков наблюдаемого объекта по которым возможно решить задачи обнаружения и классификации. В ядро обнаружителя загружаются критерии и правила обнаружения соответствующие текущей фоно-целевой, оперативно-тактической обстановкам и принятой стратегии обнаружения. На первом шаге обнаружения, после выделения из поля $s(x, y, t)$ подмножества $\tilde{s}(x, y, t)$ – геометрического образа наблюдаемого объекта, образ запоминается, ему ставится в соответствие вектор параметров и условий обнаружения, а также вектор признаков, который после каждой процедуры доопределяется. На заключительном этапе происходит принятие окончательного решения о действительном соответствии наблюдаемого объекта априорным представлениям о нём. Таким образом, на выходе обнаружителя формируется вектор \mathbf{q}_i – информационная карта обнаруженного объекта (см. рисунок 1б), доступная далее в информационно-управляющих контурах носителя и ОЛС.

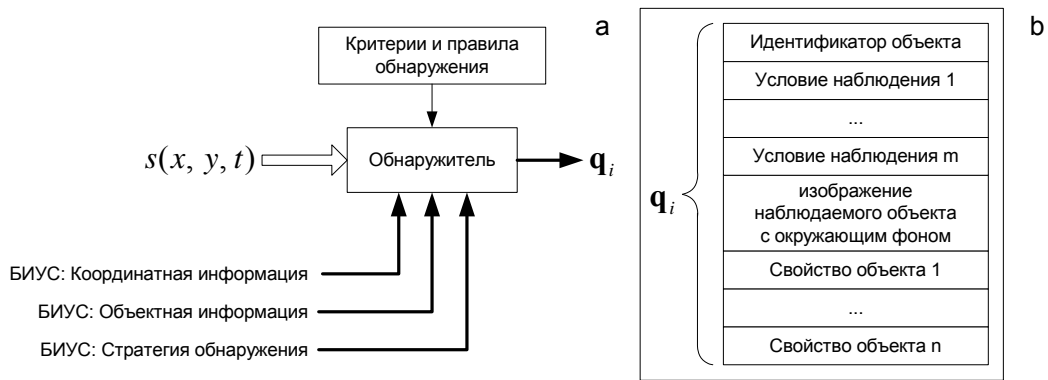


Рис. 1. Структурно-функциональная блок-схема включения обнаружителя в информационно-управляющие контура носителя и ОЛС (а); информационная карта наблюдаемого объекта (b).

Структурно-функциональная схема собственно аналитического ядра обнаружителя в укрупнённом виде приведена на рисунке 2.

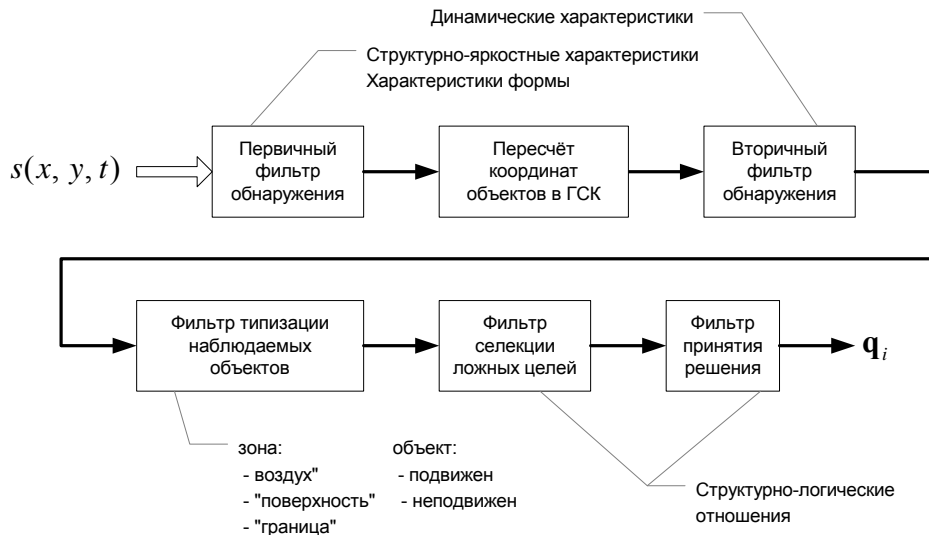


Рис. 2. Структурно-функциональная блок-схема ядра обнаружителя

Первичный фильтр обнаружения работает по структурно-яркостным и геометрическим характеристикам наблюдаемых объектов и фона. При этом геометрические образы наблюдаемых объектов сформированные на МПИ в зависимости от их линейных размеров делятся на три класса (см. рисунок 3):

- «полноценное изображение» – (геометрия объекта искажена, но в целом сохранена), линейные размеры образа свыше 11x11 пикселей;
- «псевдоизображение» – (геометрия объекта ослаблена), линейные размеры образа от 5x5 до 11x11 пикселей;
- «точечное изображение» – (геометрия объекта вырождена), линейные размеры образа от 1x1 до 5x5 пикселей.

Обнаружитель позволяет одновременно выделять на поле $s(x, y, t)$ различные классы геометрических образов наблюдаемых объектов и адаптировать под каждый из классов отдельный алгоритм первичного обнаружения.

Класс формируемого на МПИ геометрического образа зависит от характеристического размера наблюдаемого объекта и дальности до него (см. рисунок 4b): полноценное изображение – область A_{IT} ; псевдоизображение – область A_{ST} ;

точечное изображение – область A_{PT} . Необходимо отметить, что область A_{PT} простирается либо до гиперповерхности дальней границы обнаружения S_{LVD} , либо до линии базового горизонта L_{HB} . В общем случае границы областей A_{IT} , A_{ST} , A_{PT} имеют ненулевую толщину и их положение существенно определяется условиями наблюдения объектов. Линия наблюдения объекта L_{VT} является прямой проходящей через две точки Z_S и Z_T . Причём Z_S – связана с носителем, а Z_T – с наблюдаемым объектом. Высота носителя определяется отрезком h_S , а высота объекта – отрезком h_T .

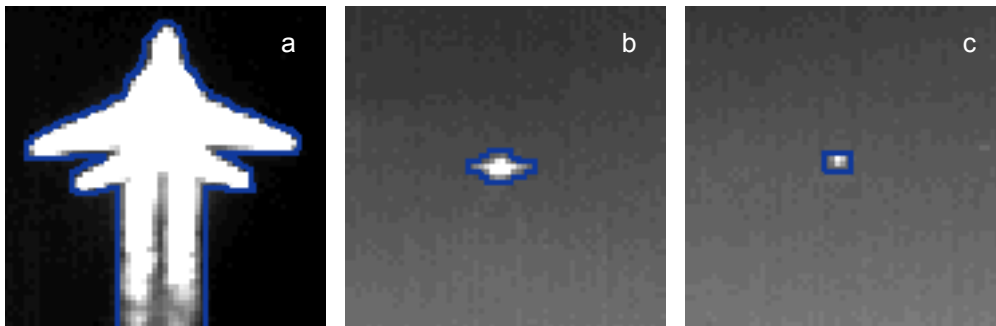


Рис. 3. Примеры геометрических образов наблюдаемых объектов формируемых МПИ: полноценное изображение (а); псевдоизображение (b); точечное изображение (с).

Пересчёт координат объектов ведётся из СКМПИ (система координат МПИ) в ГСК (глобальная система координат связанная с пространством предметов). В качестве глобальной системы координат используется параметрическая система координат определённая на сфере – на так называемой базовой гиперповерхности S_B (см. рисунок 4а). За базовую гиперповерхность S_B принимается невозмущённая поверхность океанов, что автоматически позволяет использовать для навигации и координатных вычислений спутниковые топографические карты (доступные из БИУС).

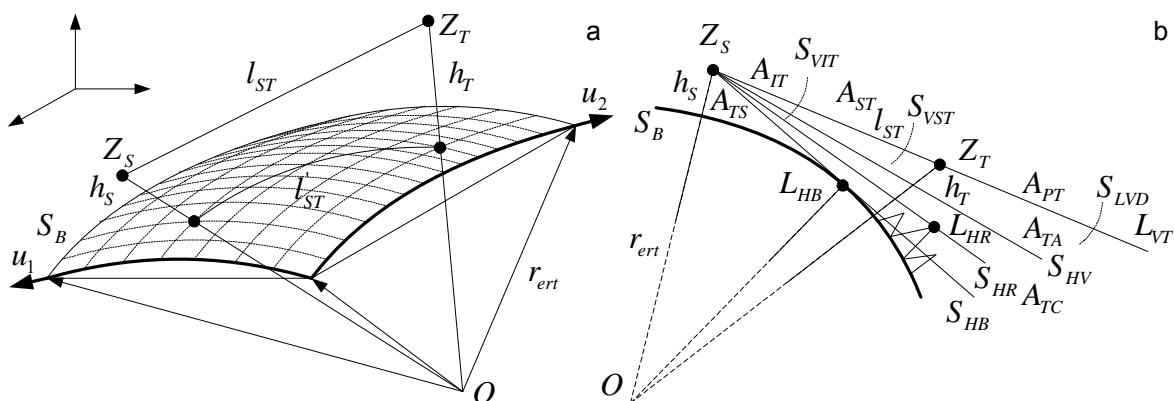


Рис. 4. Проекция ГСК: изометрическая (а); боковая (b).

Вторичный фильтр обнаружения работает по признакам динамики носителя, объекта, фона. На основе вычисляемых областей вероятного местоположения наблюдаемого объекта в пространстве предметов происходит завязка траекторий перемещения объекта и фона, и оцениваются динамические характеристики этих траекторий. Область вероятного местоположения наблюдаемого объекта существенно отличается от точечной за счёт недоступности для прямого измерения такого параметра, как l_{ST} – дальность до наблюдаемого объекта. Кроме того, неопределённости содержащиеся в измерениях, генерируемых инерциальной

навигационной системой и системой спутниковой глобальной навигации, ошибки в датчиках положения антенны ОЛС также приводят к уширению областей вероятного местоположения наблюдаемого объекта.

Фильтр типизации наблюдаемых объектов раскладывает объекты по двум критериям: «зона местонахождения» (воздух, поверхность, граница) и «подвижность» (подвижен, неподвижен). Конфигурация зон местонахождения приведена на рисунке 4б. Область A_{TA} (зона «воздух») снизу ограничена гиперповерхностью S_{HV} , область A_{TS} (зона «поверхность») лежит между гиперповерхностями S_B и S_{HB} , а область A_{TC} (зона «граница») – между гиперповерхностями S_{HB} и S_{HV} . Для зоны «воздух», в общем случае, априорная вероятность наличия воздушного объекта в области $p_{TA}^{apr} \geq 0$, а поверхностного $p_{TS}^{apr} = 0$. В зоне «поверхность» – $p_{TA}^{apr} \geq 0$, $p_{TS}^{apr} \geq 0$. В зоне «граница» – ($p_{TA}^{apr} \geq 0$, $p_{TS}^{apr} \geq 0$). В идеальном случае зона A_{TC} имеет нулевую толщину. Вычисление линии реального горизонта L_{HR} (см. рисунок 4б) в случае сильно пересечённого рельефа местности является вычислительно затратной процедурой, поэтому опорным горизонтом должен являться так называемый базовый горизонт L_{HB} .

Фильтр селекции ложных целей анализирует (в соответствии с критериями и правилами селекции) вектор параметров и условий обнаружения во взаимосвязи с вектором признаков наблюдаемого объекта на предмет соответствия последнего принятой стратегии обнаружения. Объекты не соответствующие стратегии помечаются как вероятно ложные цели.

Фильтр принятия решения принимает окончательное решение о действительном соответствии наблюдаемого объекта априорным представлениям о нём. Учитывая ограниченную информативность и достоверность измерений фильтр формирует окончательное решение в трёхзначном логическом базисе: «обнаружен»; «необнаружен»; «решение непринято». В качестве фильтра принятия решения целесообразно использовать фильтр аналогичный по конструкции предложенному в работе [1] в силу его высокой адаптивности и возможности получения несмещённых, состоятельных и устойчивых решений.

На основе системного синтеза приведённых положений возможно создать прототип перспективной системы обнаружения наблюдаемых объектов пассивными оптико-локационными станциями с матричными приёмниками информации расположенными на подвижных носителях. Дальнейшее развитие этой темы с целью доведения математико-алгоритмического обеспечения предложенного обнаружителя до инженерного уровня готовности требует решения ряда задач, в их числе: изучение связи между структурой поля $s(x, y, t)$ и кодированием в сигнале информативного признака наблюдаемого объекта; возможность оценивания параметров траекторий цели с точностью достаточной для решения задач траекторного синтеза; анализ уровня достоверности и информативности данных получаемых от БИУС носителя и ОЛС; получение условий обеспечения максимального качества и устойчивости обнаружения.

Литература

1. Макаренко А.В. Гистограммно-интегральный пороговый фильтр-классификатор. // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и устройства передачи и обработки информации» – Выпуск IX. / Под ред.: В.В. Ромашова, В.В. Булкина. – М.: «Радиотехника», 2007. С.259-270.