

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618

PROCEDURE OF COMPLEX PROCESSING RADAR DATA IN STROBE AND SELECTION OF RADAR MARK

B.V. Afanasjev, V.V. Afanasjev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The reliability and accuracy information about approaching ships generated by Automatic Radar Plotting Aids (ARPA) determine equipment performance. Selecting target plot in the strobe is basic problem in generating target's data. The procedure is multistage whereas every step requires different methods. The article considers different approaches to forming a strobe and tracking the target while using pulse radar. The following key stages have been distinguished: evaluation of noise level in the strobe, selection of marks for target tracking, tracking of the acquired target and tracking reset. Each stage has been structurally evaluated for the functionality purposes. The most problematic issues related to the limited sampling, sampling frequency and noise level of the radar signals have been singled out. There is the possibility the noise reduction through digital processing and signal analysis for AND condition, i.e. to confirm the signal delivery at previous antenna scanning. Direct increase of skips in passes can reduce noise effectively, however it may result in the loss of a fast-moving small size target which is especially dangerous on small-scale range, when in between the reviews an object can pass a sector equal to the width of the antenna pattern. The authors provide recommendations as per formalizing the procedure of target selection in the strobe. The efficiency of K-band radar at capturing and tracking of the targets is has been estimated. The paper highlights the specificity of the problem solution for coastal and shipborne navigational radars. The approach which consists in separating computing resources between hardware (radar processor, graphics card) and digital indicator has been highlighted. An important aspect in solving the problem is fusing the data from different sources, including automatic identification systems and prospects of artificial intelligence application. The general algorithm for solving the problem has been provided.

Keywords: Radar, strobe, target detection, target tracking, collision avoidance, radar plotting aids.

For citation:

Afanasev, Boris V., and Victor V. Afanasev. "Procedure of complex processing radar data in strobe and selection of radar mark." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

УДК 656.61.052

ПРОЦЕДУРА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В СТРОБЕ И ВЫБОРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ МЕТКИ

Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье выполнено исследование качества работы средств автоматической радиолокационной прокладки, определяемого достоверностью и точностью вырабатываемой информации о встречных судах для обеспечения безопасного плавания. Задача выбора отметки в стробе является краеугольной в обеспечении выработки данных о цели, является многоэтапной, где каждый этап требует привлечения определённых методов. Рассматриваются подходы к формированию строба и сопровождения целей при использовании импульсной радиолокационной станции. Выделены основные этапы решения задачи: оценка уровня помех в стробе, выделение отметок, селективное определение отметки для сопровождения, непосредственное сопровождение цели и сброс сопровождения. Выполнена структурная оценка необходимого функционального содержания каждого из этапов. Обозначены наиболее проблематичные моменты, обусловленные огра-

ниченностью выборки, частотой дискретизации, зашумленностью радиолокационного сигнала. Отмечается особенность использования шумоподавления за счет цифровой обработки и анализа сигнала на соблюдение условия «AND», т. е. подтверждение наличия сигнала на предыдущих обзорах антенны. Прямое увеличение пропусков позволяет эффективно бороться с помехами, но может привести к потере быстро идущей малоразмерной цели. Особенно это опасно на малых шкалах дальности, когда объект может пройти между обзорами сектор, равный ширине диаграммы направленности. Даны рекомендации по формализации процедуры выбора отметки в стробе. Отмечены особенности подхода для решения этой же задачи в береговых системах. Дана ориентировочная оценка эффективности использования радиолокационных станций миллиметрового диапазона при захвате и сопровождении целей. Показана специфика решения задачи для береговых и судовых навигационных радиолокационных станций. Отмечена особенность подхода с разделением вычислительных ресурсов между аппаратными средствами (радарным процессором, видеокарты) и цифровым индикатором. Важным аспектом при решении задачи является комплексирование информации от разнородных источников, в том числе автоматических идентификационных систем, а также перспективное использование математического аппарата искусственного интеллекта. Приведен общий алгоритм решения задачи.

Ключевые слова: радар, строб, обнаружение цели, сопровождение целей, избежание столкновений, средства радиолокационной прокладки.

Для цитирования:

Афанасьев Б. В. Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в стробе и выбора радиолокационной метки / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

Введение (Introduction)

Радиолокационная станция является одним из основных источников информации в судовой радиолокации. Совершенствуются станции сантиметрового диапазона, в течение 20 лет используются станции миллиметрового диапазона, появились и эксплуатируются когерентные радиолокационные станции (РЛС). Появление технологий цифрового представления информации открыло новые возможности в разработке методов решения навигационных задач. Стробирование береговых объектов и их сопровождение позволяет решать задачу непрерывного вычисления координат. Взятие на сопровождение встречных судов позволяет в автоматическом режиме вычислять параметры их движения и решать задачу расхождения.

Несмотря на достигнутые определенные успехи в разработке средств и методов решения задач, связанных с разливом нефтепродуктов [1], [2] и использованием новых подходов к построению моделей движения судов [3], спецификой обработки сигналов в условиях помех [4] – [6] по-прежнему остаются нерешёнными в области требуемых результатов такие задачи, как устойчивое сопровождение в условиях разнородных помех, сопровождение скоростных быстроманеврирующих целей, сопровождение малых целей, перебор траекторий (swapping), потеря траекторий, не всегда удовлетворительная точность получаемых решений.

Очевидная сложность решения задачи выбора радиолокационной отметки в стробе требует комплексного подхода при существующих ограничениях технического характера (разрешающая способность существующих навигационных РЛС). Рассматривается последовательность этапов решения задачи обработки радиолокационного строба и сложностей, которые возникают на каждом из них, а именно:

- выделение отметок целей на фоне помех;
- формирование модели отметок;
- надёжный выбор отметки в стробе, принадлежащей сопровождаемой цели;
- расчёт координат и вектора скорости цели.

Опыт эксплуатации показывает, что во многом решение всех указанных ранее задач определяется устойчивостью удержания отметки в стробе в широком диапазоне условий наблюдения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При сопровождении целей с использованием данных РЛС результатом решения является выработка данных по координатам и параметрам движения целей [7]. Последние используются для оценки степени опасности ситуации, а также для прогноза её развития. При оценке качества решаемой задачи можно определить несколько основных критериев:

- устойчивость сопровождения цели при различных условиях наблюдения;
- точностные характеристики вырабатываемых параметров движения цели;
- характеристики сопровождаемой цели;
- число одновременно сопровождаемых целей.

Некоторые из этих критериев регламентированы соответствующими требованиями Международной электротехнической комиссии (МЭК) [8] в части, касающейся тестирования средств автоматической радиолокационной прокладки и [9], где определяются требования непосредственно к РЛС. Некоторые формируются при составлении технического задания на разработку устройства. В любом случае достижение хороших показателей по указанным критериям обуславливает необходимость разработки соответствующих методов решения с привлечением надлежащих технических средств [10], [11], [20].

Процедура сопровождения целей включает следующие этапы:

- 1-й этап — выбор отметки на сопровождение;
- 2-й этап — взятие отметки на сопровождение (захват цели);
- 3-й этап — сопровождение цели;
- 4-й этап — сброс сопровождения.

На каждом из этих этапов ставятся определённые цели и определяется процедура, приводящая к их достижению, оценивается результат и принимается решение по переходу к следующему этапу.

Выбор отметки на сопровождение определяется из решения задачи контроля за движением судов в определённом районе. Необходимость контроля обстановки с использованием РЛС требует соответствующей настройки режимов работы РЛС с целью получения более информативной картинки. Для этого необходимо выполнение следующих действий:

- 1) выбор соответствующего масштаба отображения;
- 2) регулирование усиления;
- 3) применение методов подавления разнородных помех.

Предполагается, что после настройки интересные радиолокационные объекты будут лучше узнаваемы. Для выделения на общем фоне движущихся объектов (судов) часто используется *режим послесвечения*. Важность обнаружения движущихся объектов объясняется тем, что именно эти объекты оказывают влияние на динамичное изменение ситуации. При цифровом представлении радиолокационного сигнала след отметки может быть сформирован на заданное число оборотов антенны. Практически след на пять – семь обзоров позволяет заметить начало маневрирования судна. Небольшой объект, имеющий движение в условиях волнения и появляющийся на экране с большим числом пропусков, может быть обнаружен, если след формируется в течение последних 10 – 15 мин. Использование когерентных РЛС позволяют одновременно с расстоянием определять скорость цели. Кроме визуального обнаружения, возможна установка соответствующей зоны контроля, когда при появлении в ней объекта будет выработано соответствующее сообщение. Для уменьшения вероятности ложных тревог необходимо использовать модели отметок. Используя параметры отметки, можно судить о принадлежности к тому или иному объекту.

После того как выбран объект для наблюдения, осуществляется *процедура стробирования*, или *взятия объекта на сопровождение*. Этот этап включает последовательное решение ряда следующих задач:

- 1) формирование размеров строба;
- 2) оценка уровня помех в стробе;
- 3) выделение отметок в стробе;
- 4) выбор отметки в стробе для сопровождения.

Формирование размеров строба. В современных РЛС радиолокационная картинка представляет собой массив данных в виде набора строк, каждая из которых содержит информацию по одному лучу развёртки в цифровом виде (растровые индикаторы). Преобразование видеосигнала в цифровую форму осуществляется в соответствующем устройстве (радар-процессор), одним из элементов которого является аналого-цифровой преобразователь, тактовая частота и разрядность которого определяет степень приближения цифрового сигнала к аналоговому. В основном частота дискретизации лежит в пределах (10 – 100) МГц. Число уровней представления определяется разрядностью АЦП и условиями решения задачи. Так, при частоте дискретизации 60 МГц один дискрет будет соответствовать 2,5 м дальности. Если длину строки определить в 4096 дискрет, то будет отображаться дистанция в 5,5 мили. Уменьшив частоту дискретизации в шесть раз (10 МГц), получим дискрет дальности в 15 м, и отображаемая дистанция увеличится до 33 миль.

При определении размера строба учитываются следующие факторы:

- относительная скорость сближения собственного судна и цели (до 140 уз [12]);
- погрешности попадания курсора в отметку при ручном стробировании;
- период вращения антенны;
- появление отметки цели не на каждый оборот антенны;
- статистика по отметке в стробе (формирование модели отметки по двум-трем обзорам);
- возможность встречного судна менять курс и скорость;
- увеличение вычислительных затрат при больших размерах строба.

Следует иметь в виду, что размеры строба могут изменяться на различных этапах, а именно: начального стробирования (захвата), сопровождения при стандартных условиях, сопровождения при частичном пропуске отметок на части обзоров (погодные условия), сопровождения в зонах интенсивного движения [13].

Оценка уровня помех в стробе. При обработке строба выделение отметок происходит относительно некоторого уровня. При благоприятных условиях наблюдения и хорошей фильтрации уровень, от которого ведётся обработка, является нулевым, однако это не всегда выполняется. Более того, возможны временные изменения уровня, которые имеют место при настройке отображения. В этом случае при нулевом начальном уровне произойдёт сбой в выделении отметок, и сопровождение целей будет сорвано. Для обеспечения устойчивости процедуры выделения отметок в стробе необходимо на первом этапе оценить уровень сигнала, а на втором — выделить отметки относительно уровня, определённого на первом этапе.

Выделение отметок в стробе. Основой решения данной задачи является процедура окантовки и внутреннего заполнения отметок [14]. Следует иметь в виду, что под *отметкой* следует понимать область строба, которая соответствует следующим условиям:

- по уровню имеет превышение над пороговым уровнем;
- непрерывна по заполнению.

Процедура вычислений должна предусматривать последовательный просмотр всех дискретов от центра строба, а также возможность расширения границ строба, по которым не закрыты отметки (не определены границы отметок). Отметки для РЛС миллиметрового диапазона сложнее по своей форме, чем отметки для РЛС сантиметрового диапазона. Следует иметь в виду, что внутреннее содержание отметки отличается от того, которое наблюдается на индикаторе, ввиду того, что процедура формирования облика вносит соответствующие искажения. Примеры отметок для РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов приведены на рис. 1.

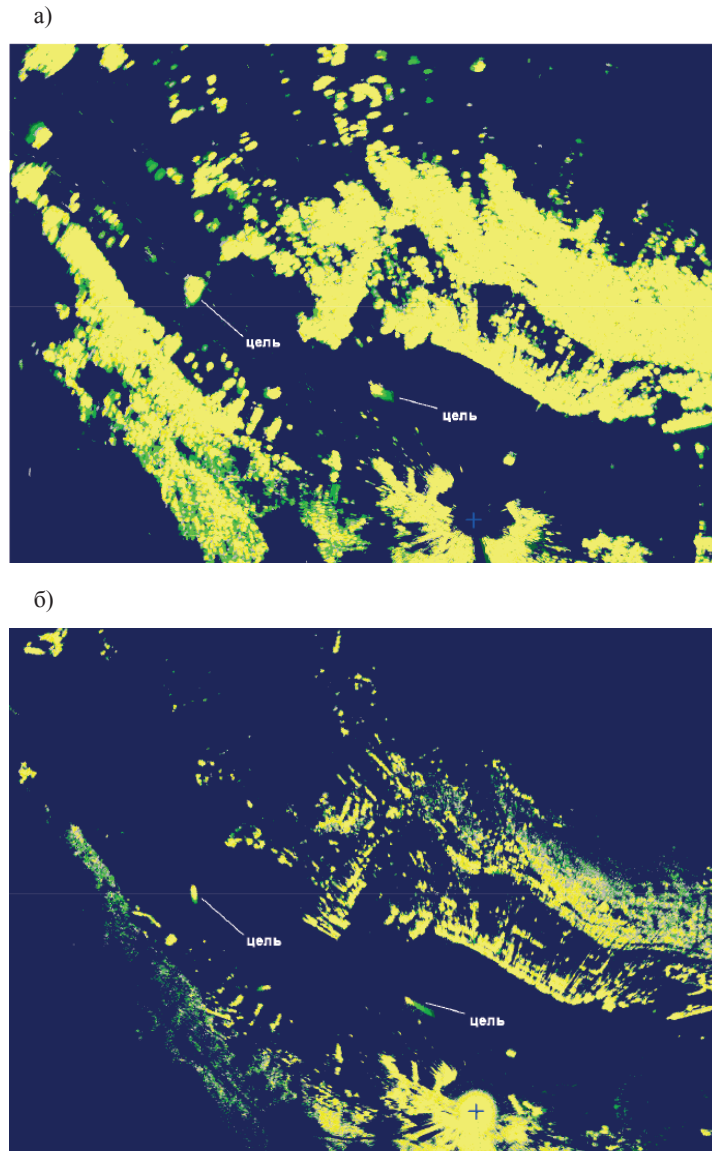


Рис. 1. Радиолокационное отображение в сантиметровом (а) и миллиметровом (б) диапазоне

Выбор отметки в строке для сопровождения. При ручном стробировании в качестве отметки для сопровождения принимается ближайшая к центру строга отметка. При сопровождении для выбора отметки используется *модель отметки* [15] (параметры модели, посредством которых эта модель представляется) и расстояние от центра строга до центра отметки, что является одним из элементов, участвующих в процедуре выбора.

Для хранения данных по сопровождаемым целям в начале работы формируется массив данных. Каждая строка в качестве одного из элементов содержит *признак активности*. Если условно признак активности равен единице, то данная цель сопровождается, если он равен нулю, — нет. Если в результате обработки строга обнаружена отметка, то из массива данных под цель выбирается первая свободная строка (признак активности «0»), и в соответствующие элементы строки записываются полученные в результате обработки данные. Записываются пеленг и дистанция до центра отметки, а также параметры модели отметки. Общее число строк массива для хранения данных будет определять максимально возможное число сопровождаемых целей. Для судовых радиолокационных систем такой массив может содержать 70 – 100 строк. Для береговых радиолокационных систем, входящих в системы управления движением судов (СУДС), такая таблица может

содержать 500 – 800 строк, так как дополнительно предусматриваются возможности контроля положения судов на якорных стоянках, а также плавучих СНО. В общем, при определении размеров таблицы руководствуются требованиями резолюций МЭК, предъявляемых к САРП, техническими условиями задания на разработку соответствующего оборудования, а также вычислительными ресурсами, отводимыми для решения данной задачи.

При использовании варианта автозахвата цели в установленной зоне просмотра зоны и вычисление параметров отметок осуществляется на каждом обзоре. Затем каждая из обнаруженных целей на основе рассчитанных данных сравнивается со всеми активными целями таблицы. Если не обнаружено подобия отметки (по применяемым критериям) с отметками сопровождаемых целей (определёнными допусками по критериям), то открывается первая свободная строка массива данных, куда записывается информация по отметке и ставится признак сопровождаемой цели («1»). Если в массиве данных найдена строка с подобными данными, то считается, что отметка принадлежит сопровождаемой цели, и данные этой строки обновляются по полученным значениям.

Значения критериев, по которым отметка может быть отнесена к отметкам уже сопровождаемых целей, не являются универсальными для всех условий плавания, поэтому могут возникать ошибки в решении. Так, для береговых радиолокационных систем одним из критериев принадлежности отметки к сопровождаемой цели является расстояние между центром сопровождаемой цели (центр строки сопровождаемой цели) и центром отметки на данном обзоре. Если расстояние между центрами на данном обзоре меньше определённой заданной величины, то считается, что отметка принадлежит сопровождаемой цели. В этом случае обновляются данные соответствующей строки таблицы целей. Если расстояние больше заданной величины, то считается, что отметка принадлежит новой цели и формируется новая строка. Если иметь в виду, что расстояние между сопровождаемыми целями принципиально может быть небольшим, то и значение критерия принимается также небольшим. Такое решение приводит к тому, что при нарушении критерия (превышение установленных значений) данная отметка будет рассматриваться как отметка от новой цели и активизируется новая строка в таблице целей. Таким образом, два формуляра будут принадлежать одной и той же цели. Улучшение ситуации здесь возможно по двум направлениям:

1. Увеличение числового значения критерия принадлежности (в этом случае будет блокироваться процедура стробирования целей, находящиеся близко друг к другу).
2. Использование параметров модели отметки в дополнение к ранее описанному, однако здесь следует иметь в виду, что при малой статистике (начало обработки) в расчётах принимаются крайне приближённые оценки, что тоже может привести к повторному стробированию одной и той же цели.

Сопровождение цели. Результатами решения задачи являются следующие:

- 1) расчёт координат цели;
- 2) расчёт курса и скорости цели;
- 3) оценка ситуации маневрирования сопровождаемой цели;
- 4) оценка параметров отметки;
- 5) оценка времени и дистанции кратчайшего сближения с другим сопровождаемым или другими сопровождаемыми объектами (в этом случае принимается гипотеза равномерного прямолинейного движения целей).

Изменения пеленгов и расстояний на сопровождаемые цели являются нестационарными случайными функциями, поэтому основными методами решения служит динамический метод наименьших квадратов, метод фильтрации Калмана [16], [17], а также иные методы [18]. Результатом решения являются: расчёт координат в локальной прямоугольной системе *центр – собственное судно*, составляющие вектора скорости в этой же системе координат, а также траектория движения [19]. С учетом того, что при четырёх искомым величинах необходимо иметь как минимум столько же измеренных параметров, можно сделать вывод о том, что процедура расчёта начинается со второго обзора или более (в случае пропуска). Учитывая, что время оборота антенны,

а следовательно, период обновления информации составляют порядка трех секунд, каждая строка цифровых данных на выходе радар-процессора или, по крайней мере, сразу при передаче данных в оперативную память должна иметь метку времени. Это имеет значение в следующих случаях:

- при пропуске отметок на каком-либо обзоре;
- при сопровождении цели на малых дистанциях, когда пеленг на цель быстро меняется;
- в случае возможных ошибок синхронизации процессов.

Использование вышеуказанных методов оценки искомых величин предусматривает одновременную оценку погрешностей. Эти же методы могут использоваться при оценке параметров отметки. Следует иметь в виду, что при стабильной радиолокационной отметке цели погрешности оцениваемых параметров радиолокационных отметок стремятся к нулю, что нарушает условия применения методов нестационарной фильтрации и требует модификации в применении.

Данные по сопровождаемым целям могут ретранслироваться на другие устройства с использованием протокола NMEA-0183.

Сброс сопровождения. Укажем основные причины сброса сопровождения.

1. *Преднамеренный сброс, когда информация о сопровождаемом объекте не представляет интереса для оценки ситуации* (суда уже разошлись). Процедура существуют несколько вариантов ручного сброса сопровождения, но все они фактически сводятся к выбору соответствующей строки в таблице целей и установки признака «0», после чего строка не будет обрабатываться, и данные не будут отображаться в формуляре.

2. *Большое число пропусков в представлении отметки от цели при сопровождении.* Это может иметь место при слабом сигнале, отражённом от цели при больших расстояниях до наблюдаемого объекта, а также при значительной качке. При нерегулярном поступлении информации вычисляемые данные по цели будут иметь большие погрешности, что может привести к ошибочному прогнозу развития ситуации. Обычно автоматический сброс осуществляется при наличии 50 % пропусков в представлении отметки от цели или при шести последовательных пропусках. Все этапы описанной процедуры сопровождения цели представлены на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность решаемых задач при сопровождении целей

Результаты (Results)

Задача выбора отметки в стробе решается на каждом из этапов работы средств автоматической радиолокационной прокладки: формировании размеров строба, выделении отметок на фоне помех, взятии цели на сопровождение, сопровождение, сбросе сопровождения. При решении необходимо учитывать следующие особенности:

1. Широкий диапазон условий наблюдения.

2. Особенности радиолокационной аппаратуры и, как следствие, разнотипная радиолокационная картинка.

3. Динамические характеристики встречных судов, изменяющиеся в широком диапазоне.

Алгоритм решения является адаптивным, когда по условиям наблюдения осуществляется подстройка коэффициентов или подключение соответствующих методов.

При формировании размеров строба учитываются:

- установленный масштаб отображения;
- скорость собственного судна;
- ожидаемая скорость встречного судна;
- ошибки ручного наведения маркера на отметку цели;
- задержки времени в цифровой обработке радиолокационной информации;
- задержки времени в отображении радиолокационной информации;
- возможные пропуски в представлении радиолокационной картинки (по условиям наблюдения);
- время формирования короткой выборки (три – пять обзоров) для устойчивого обнаружения отметки в стробе;

– динамические характеристики собственного судна;

– динамические характеристики встречных судов (приближённо);

– возможные навигационные ограничения.

Математическая модель отметки имеет несколько параметров, которые характеризуют отметку и используются в процедуре выбора:

- длина отметки (полярная координата по направлению);
- ширина отметки (полярная координата по дистанции);
- суммарный уровень сигнала заполнения отметки;
- второй центральный момент инерции отметки по одной полярной координате;
- второй центральный момент инерции отметки по второй полярной координате;
- линейное отстояние центра отметки от центра строба.

Центральные моменты инерции дают хороший результат в выявлении ситуации слияния отметок. Это имеет место при сопровождении целей в узкостях, когда суда расходятся на малых расстояниях ввиду имеющихся навигационных ограничений. Выявление такой ситуации позволяет перейти на другую ветвь решения. Последний из приведённых параметров имеет большое значение в процедуре выбора при приемлемых условиях наблюдения и отсутствии сильных маневров судов (собственное и сопровождаемое). «Вес» этого критерия должен быть значительно уменьшен, вплоть до полного исключения из процедуры, когда одно из судов или оба совершают интенсивный маневр. Принимая во внимание, что процессы измерения параметров отметки являются случайными и нестационарными, для вычисления использовался одномерный фильтр Калмана, на выходе которого получали оценку соответствующего параметра и его погрешность. Эти данные использовались в ходе процедуры выработки обобщённого критерия принадлежности отметки сопровождаемой цели. При формировании критерия использовался аппарат нечёткой логики. Встречались ситуации, когда при хороших условиях наблюдения погрешности параметров отметки становились малыми (очень малыми), что приводило к чрезмерному увеличению «веса» параметра и нарушению процедуры фильтрации. Для исключения такой ситуации использовалась регуляризация путём искусственного введения дополнительных случайных ошибок наблюдения.

Формирование критерия решения каждой из подзадач приводит к поиску лучшего единственного решения. Реализация каждого из этапов (см. рис. 2) требует определённых вычислительных ресурсов и реализуется на плате радар-процессора, основном процессоре (процессорах) компьютера и графической плате компьютера. Некоторые вырабатываемые данные являются внутренними и используются исключительно в рамках решаемых задач. Некоторые данные передаются другим устройствам. При этом используется протокол NMEA 2000 для передачи по последовательным каналам связи (например, курса, скорости цели), а также используется свободный формат для передачи цифрового радиолокационного облика.

Выводы (Summary)

1. В статье на основе комплексного подхода структурирована задача выбора отметки цели в стробе.

2. Описаны проблемы, возникающие при решении каждого из этапов и показана их взаимосвязь. Решение задачи расхождения судов обусловлено качественным решением каждого из этапов на основе формализованных критериев качества.

3. Устойчивый выбор отметки в стробе при сопровождении в условиях помех позволяет формировать значительные по длине выборки измеренных значений пеленгов и расстояний по сопровождаемой цели, а следовательно, получить более точные значения координат цели и вектора скорости.

4. Корректный выбор отметки позволяет уменьшить число случаев переброса отметок (swapping), а эффективное решение задачи стробирования и сопровождения цели является основой комплексного подхода с использованием разнородной информации и различных методов её обработки, в том числе распознавания сцен, искусственного интеллекта и нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков И. Е. Варианты расширения функциональных возможностей навигационных радиолокационных станций / И. Е. Ушаков // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: сб. ст. Международной науч.-практ. конф.: в 5 ч. — Уфа: ООО «Аэтерна», 2016. — С. 89–91.
2. Ничипоренко Н. Т. Обнаружение разливов нефтепродуктов с использованием навигационной РЛС / Н. Т. Ничипоренко, И. Е. Маренич, А. В. Петров [и др.] // Судостроение. — 2010. — № 2. — С. 39–41.
3. Васильев К. К. Связанные стохастические модели движения радиолокационных целей / К. К. Васильев, А. В. Матгис // Автоматизация процессов управления. — 2017. — № 4 (50). — С. 14–18.
4. Berry P. Adaptive detection of low-observable targets in correlated sea clutter using Bayesian track-before-detect / P. Berry, K. Venkataraman, L. Rosenberg // Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE. — IEEE, 2017. — Pp. 0398–0403. DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944235.
5. Greco M. S. Introduction to the Issue on Advanced Signal Processing Techniques for Radar Applications / M. S. Greco, Yu. Abramovich, J.-F. Ovarlez, H. Li, X. Yang // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. — 2015. — Vol. 9. — Is. 8. — Pp. 1363–1365. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2497458.
6. Duk V. Target Detection in Sea-Clutter Using Stationary Wavelet Transforms / V. Duk, L. Rosenberg, B. W. H. Ng // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 1136–1146. DOI: 10.1109/TAES.2017.2667558.
7. Жерлаков А. В. Радиолокационные системы предупреждения столкновений судов / А. В. Жерлаков, Н. С. Зимин, О. В. Кононов. — Л.: Судостроение, 1984. — 200 с.
8. Резолюция МЭК 60872. — 1999.
9. Резолюция МЭК 60936-1. — 2002.
10. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. — Изд-во КВИЦ, 2000. — 428 с.
11. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
12. Резолюция IMO NAV 49/9. — 2003.

13. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
14. Kouemou G. Radar Technology / G. Kouemou. — Croatia: INTECH, 2009.
15. Tong L. Radar target detection based on methods of image pattern matching / L. Tong, F. Heymann, T. Noack // *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*. — 2013. — № 36 (108). — З. 1. — Рр. 162–167.
16. Хомяков А. В. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе / А. В. Хомяков, В. И. Филипченко, Ю. И. Мамон // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2016. — № 2. — С. 305–314.
17. Бутырский Е. Ю. Математические модели движения целей в виде уравнений состояния / Е. Ю. Бутырский // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире*. — 2017. — № 17-1. — С. 61–73.
18. Барабанов А. Е. Нелинейная фильтрация методом подбора сценариев для радарного слежения и динамического позиционирования судов / А. Е. Барабанов, Д. В. Ромаев, А. Н. Мирошников // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 3624–3633.
19. Vovk V. Sequential target tracking based on local trajectory parameters estimation in Rayleigh clutter / V. Vovk, I. Prokopenko, K. Prokopenko // *Radar Symposium (IRS), 2014 15th International*. — IEEE, 2014. — Рр. 1–5. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869249.
20. Афанасьев В. В. Судовые радиолокационные системы / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов. — СПб.: Велиниара, 2009. — 365 с.

REFERENCES

1. Ushakov, I.E. “Varianty rasshireniya funktsional’nykh vozmozhnostei navigatsionnykh ra-diolo-katsionnykh stantsii.” *Innovatsionnaya nauka: proshloe, nastoyashchee, budushchee: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 5 chastyakh*. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu “Aeterna”, 2016. 89–91.
2. Nichiporenko, N.T., I.E. Marenich, A.V. Petrov, I. Misyuchenko, B.S. Trofimov, and I.E. Ushakov. “Oil spill detection using navigational radar station.” *Sudostroenie* 2 (2010): 39–41.
3. Vasil’ev, K.K., and A.V. Mattis. “Svyazannye stokhasticheskie modeli dvizheniya radiolokatsionnykh tselei.” *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* 4(50) (2017): 14–18.
4. Berry, Paul, Krishna Venkataraman, and Luke Rosenberg. “Adaptive detection of low-observable targets in correlated sea clutter using Bayesian track-before-detect.” *Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE*. IEEE, 2017. 0398–0403. DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944235.
5. Greco, Maria S., Yuri Abramovich, Jean-Filippe Ovarlez, Hongbin Li, and Xiaopeng Yang. “Introduction to the issue on advanced signal processing techniques for radar applications.” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 9.8 (2015): 1363–1365. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2497458.
6. Duk, Vichet, Luke Rosenberg, and Brian Wai-Him Ng. “Target Detection in Sea-Clutter Using Stationary Wavelet Transforms.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 53.3 (2017): 1136–1146. DOI: 10.1109/TAES.2017.2667558.
7. Zherlakov, A.V., N.S. Zimin, and O.V. Kononov. *Radiolokatsionnye sistemy preduprezhdeniya stolknovenii sudov*. L.: «Sudostroenie», 1984.
8. Rezolyutsiya MEK 60872. 1999.
9. Rezolyutsiya MEK 60936-1. 2002.
10. Kuz’min, S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu*. Izdatel’stvo KViTs, 2000.
11. Farina, A., and F. Studer. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoi informatsii. Sorovozhdenie tselei*. M.: Radio i svyaz’, 1993.
12. Rezolyutsiya IMO NAV 49/9. 2003.
13. Vagushchenko, L.L., and A.L. Vagushchenko. *Podderzhka reshenii po raskhozhdeniyu s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
14. Kouemou, G. *Radar Technology*. Croatia: INTECH, 2009.
15. Tong, Ling, Frank Heymann, and Thoralf Noack. “Radar target detection based on methods of image pattern matching.” *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 36(108).1 (2013): 162–167.

16. Khomyakov, Alexandr Viktorovich, Viktor Ivanovich Filipchenkov, and Uriy Ivanovich Mamon. "Algorithms joint trajectory processing in multiposition radar complex." *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* 2 (2016): 305–314.

17. Butyrskiy, E.Yu. "Mathematical model of motion of targets in the form of equation of state." *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennoy mire* 17-1 (2017): 61–73.

18. Barabanov, A.E., D.V. Romaev, and A.N. Miroshnikov. "Nelineinaya fil'tratsiya metodom podbora stsenarijev dlya radarnogo slezheniya i dinamicheskogo pozitsionirovaniya sudov." *XII vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014. 3624–3633.

19. Vovk, Vitalii, Igor Prokopenko, and Kostiantyn Prokopenko. "Sequential target tracking based on local trajectory parameters estimation in Rayleigh clutter." *Radar Symposium (IRS), 2014 15th International*. IEEE, 2014. 1–5. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869249.

20. Afanas'ev, V.V., A.N. Marinich, A.V. Pripotnyuk, and Yu.M. Ustinov. *Sudovye radilokatsionnye sistemy*. SPb.: Veliniara, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Афанасьев Борис Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Boris.Afanasiev@rambler.ru,
kaf_nav@gumrf.ru

Афанасьев Виктор Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»,
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7.
e-mail: afaviktor@yandex.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Afanasev, Boris V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: Boris.Afanasiev@rambler.ru,
kaf_nav@gumrf.ru

Afanasev, Victor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: afaviktor@yandex.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2018 г.
Received: April 26, 2018.