

УДК 621.396.96

Данг Куанг Хиеу, Нгуен Суан Чьонг  
Технический университет им. Ле Куй Дона  
236 Хоанг Куок Вьет, Кы Нхуэ, Бак Тю Лиэм, Ханой, Вьетнам

## Метод обработки данных в комплексе прибрежных РЛС средней дальности

**Аннотация.** Представлены основные принципы проектирования и построения интегрированной системы прибрежных РЛС средней дальности для наблюдения за надводной обстановкой в акваториях с интенсивным движением малых судов. Система предоставляет решения для таких целей, как командование и контроль над морскими силами, пограничный мониторинг и контроль, предотвращение незаконной деятельности (пиратства, контрабанды, незаконной иммиграции, незаконного промысла), поддержки операций по поиску и спасению и т. д. Комплекс прибрежного наблюдения должен интегрировать данные нескольких радаров SCORE 3000 и сообщения от автоматической идентификационной системы (АИС) и обеспечивать корреляцию данных этих систем. Разработана структурная схема системы, обеспечивающая распределение вычислительной нагрузки при обработке большого объема данных, поступающих от РЛС. Предложен алгоритм на основе структуры Joint Probabilistic Data Association (JPDA) для объединения радиолокационных данных от одной или нескольких РЛС и данных АИС, поступающих в центр обработки информации. Сбор, хранение, анализ и распределение данных осуществляются на компьютерном сервере, функции управления, идентификации и отображения целей на цифровой карте реализуются на автоматизированном рабочем месте.

**Ключевые слова:** РЛС средней дальности, объединение данных, надводная обстановка, АИС

**Для цитирования:** Данг Куанг Хиеу, Нгуен Суан Чьонг. Метод обработки данных в комплексе прибрежных РЛС средней дальности // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 35–41.

Dang Quang Hieu, Nguyen Xuan Truong  
Le Quy Don Technical University  
Hoang Quoc Viet, Co Nhue, Bak Tu Liem, Hanoi, Vietnam

### Data Processing Method in Medium Range Coastal Radar Complex

**Abstract.** The article presents the basic principles of design and development of integrated middle range Coastal Surveillance System (CSS) used for water surface lookout. It provides solutions for such missions as command and control of maritime forces, border monitoring and control, prevention of illegal activities such as piracy, smuggling, illegal immigration, illegal fishing, supporting search and rescue (SAR) operations, and creates a common situation awareness picture of the Naval Theatre. The system structure diagram is designed to solve computational overload problem when processing large volume of data received from radar stations. The measurement-level fusion algorithm is developed based on the JPDA framework, in which radar data received from a single or group of radars and AIS data is aggregated in a processing center. The servers and workstations make use of local area network (LAN), using standard Gigabit Ethernet technologies for local network communications. Acquisition, analysis, storage and distribution of target data is executed in servers, then the data is sent to automated operator stations (console), where functional operations for managing, identifying and displaying of target on digital situational map are performed.

**Key words:** radar system, association data, marine situation, AIS

**For citation:** Dang Quang Hieu, Nguyen Xuan Truong. Data Processing Method in Medium Range Coastal Radar Complex. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 3, pp. 35–41. (In Russian)

**Введение.** Морское наблюдение, осуществляемое в целях защиты территориального суверенитета, управления природными ресурсами, обеспечения соблюдения законов, содействия поиску и спасению и т. д., является важной задачей для прибрежных государств. Для его реализации чрезвычайно важное значение приобретает сбор результатов наблюдений для создания картины морской обстановки в реальном времени. Данные

от различных источников наблюдения, таких, как радиолокационные системы (РЛС), автоматическая идентификационная система (АИС), разведка, морская служба (Vessel Traffic Services – VTS), информация о погоде и т. д., должны быть отправлены в центр обработки информации (ЦОИ). После обработки и объединения эта информация используется для мониторинга и распределения данных среди пользователей.

РЛС нового поколения способны обнаруживать и автоматически сопровождать большое количество целей. С развитием информационных и коммуникационных технологий, обеспечивающих высокоскоростную передачу, обработку поступающих данных и управление ими, возникает возможность интеграции таких РЛС в единую систему [1]–[3]. В связи с этим необходимо разработать метод объединения данных, минимизирующий объем вычислений и обеспечивающий обработку поступающих данных в режиме реального времени, удобный способ их отображения и принятия решений.

Прибрежная радиолокационная система средней дальности включает в себя несколько РЛС Score-3000, развернутых вдоль побережья Вьетнама. РЛС обнаруживает, автоматически сопровождает и передает в ЦОИ данные более 700 траекторий надводных целей и более 30 траекторий воздушных целей, находящихся на дальности до 100 морских миль. Каждая РЛС оснащена приемником АИС для приема сообщений от находящихся в районе судов.

Структурная схема интегрированной системы прибрежных РЛС средней дальности показана на рис. 1. Данные с РЛС поступают по сети на автоматизированный командный пункт (АКП) и в региональный штаб. После обработки в шлюзе и сервере информация выводится на автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов системы в виде картины морской обстановки.

**Алгоритм обработки данных в системе.**

РЛС передает в систему обработки 2 типа данных: радиолокационные и данные АИС. Радиолокационные данные включают в себя траектории и отметки от целей, информацию о состоянии и команды управления. Эти данные структурированы в соответствии с собственным стандартом. Сообщения АИС структурированы в соответствии со стандартом NMEA (National Marine Electronics Association) и содержат как динамическую информацию (например, широту, долготу, курс истинный (COG), скорость истинная (SOG) и время), так и статическую информацию (номер MMSI, IMO, имя, тип, габариты судна), а также рейсовую информацию, которая является вспомогательной при автоматической идентификации вида плавучего средства и контроля маршрута. Дальность приема АИС, как правило, намного больше, чем дальность обнаружения РЛС. Некоторые суда, в особенности малые (например, рыболовные), не оснащены передатчиком АИС. Такие суда обнаруживаются только по сигналам РЛС.

Схема обработки данных в системе показана на рис. 2. Данные от РЛС поступают в АКП по высокоскоростной сети передачи. В АКП каждый шлюз обрабатывает данные, поступающие от группы из 3–5 РЛС обслуживаемого района. Этот этап обработки предназначен для преобразования вектора

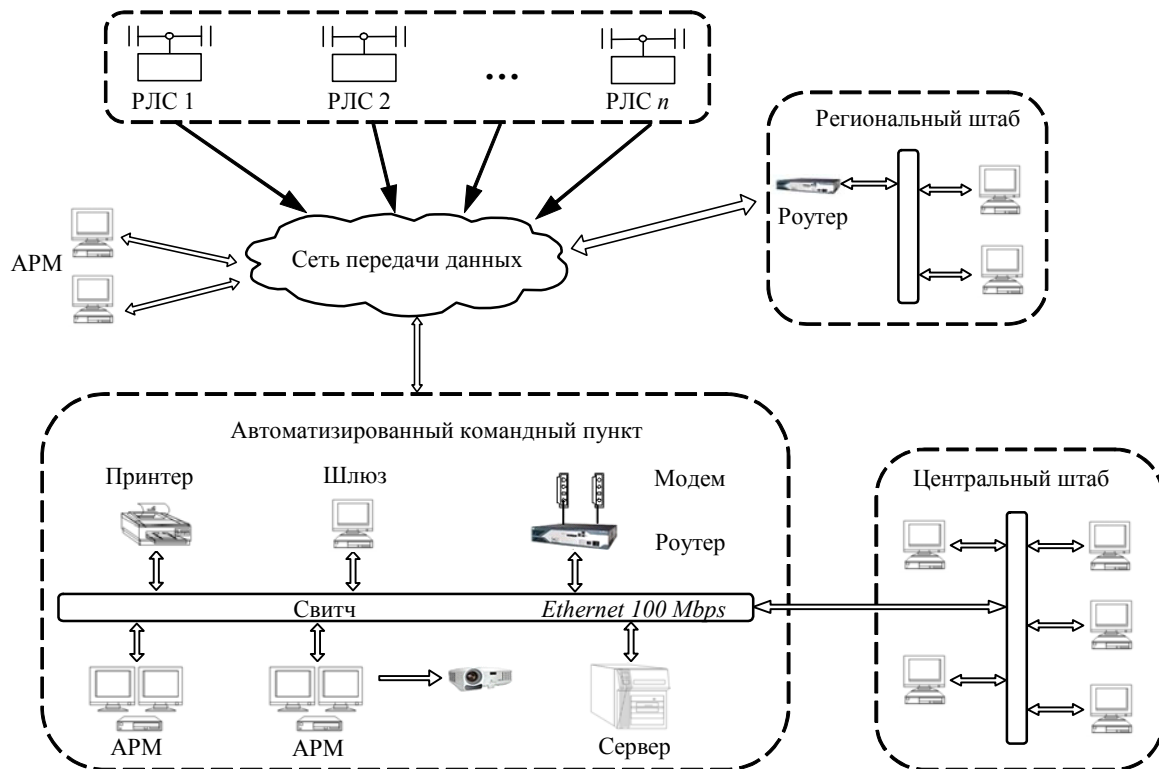


Рис. 1

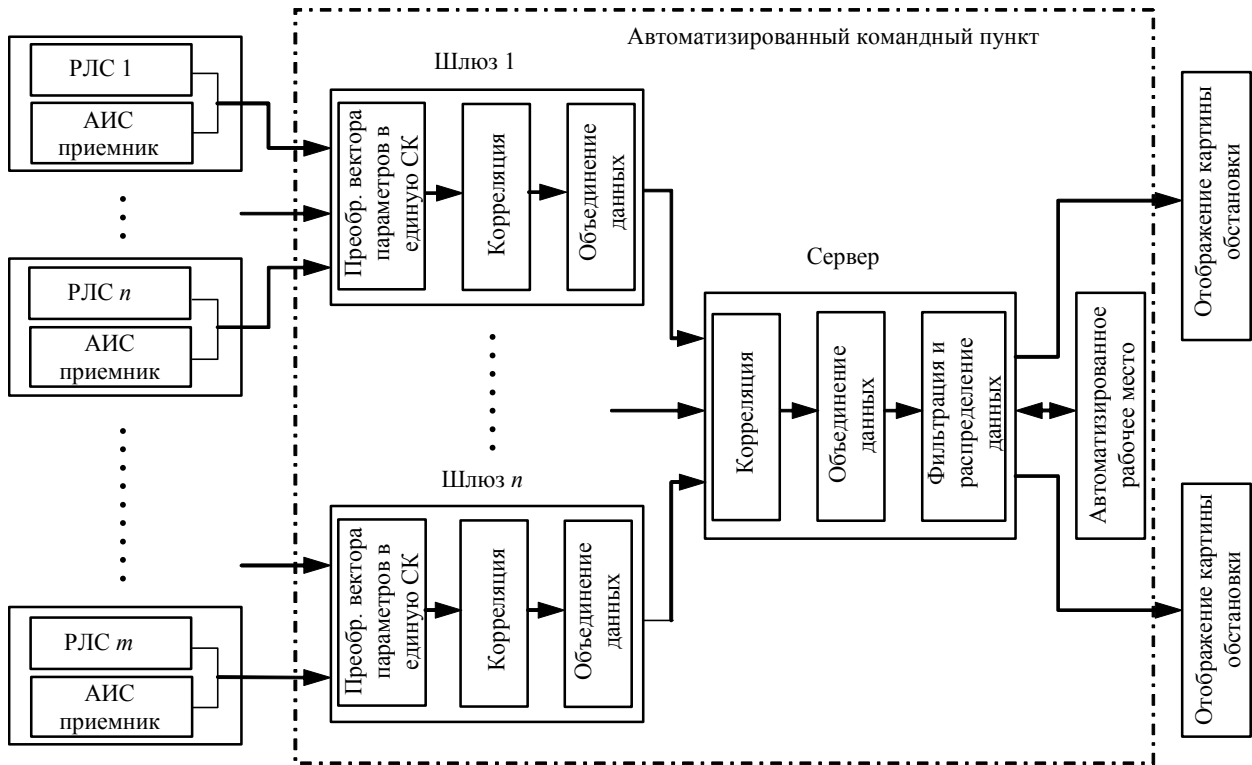


Рис. 2

параметров в единую систему координат (СК), отождествления траекторий, объединения данных и их структуризации в единый формат [4]–[8]. Далее информация передается на сервер, в котором выполняется отождествление траекторий, объединение данных, их фильтрация, хранение и распределение. На АРМ информация от целей преобразуется в картину морской обстановки на цифровой карте.

**Математическое описание алгоритма.** Для реализации интегрированной системы основа модели алгоритма объединения была взята из [9]. Модель радиолокационного наблюдения задается уравнением наблюдения в момент времени  $k$ :

$$\mathbf{z}_r(k) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(k)] + \boldsymbol{\omega}(k),$$

где  $\mathbf{z}_r \in R^{n_z}$  – результат измерения параметров цели РЛС ( $n_z$  – размер пространства измерения);  $\mathbf{h}(\cdot)$  – векторная функция измерения, в общем случае нелинейная;  $\mathbf{x}$  – вектор состояния;  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор шумов.

Сообщение АИС с судов  $\mathbf{z}_a$  включает его координаты  $x, y$ , скорость, курс и индивидуальный идентификатор (ID) цели. Информация о скорости цели в сообщениях АИС вычисляется на основе координат цели, поэтому для дальнейшей оценки из сообщений АИС учитывается только информация о местоположении:

$$\mathbf{x}(k) = [x(k) \ y(k)]^T$$

с известной ковариационной матрицей

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix},$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  – стандартные отклонения координат цели в декартовой системе координат; "Т" – символ транспонирования.

Интервал между сообщениями АИС больше, чем период обзора РЛС. Определим коэффициент кратности сообщений АИС  $n_a$  – отношение периодов сообщений АИС и РЛС (поскольку период поступлений сообщений АИС кратен периоду сообщений РЛС,  $n_a \in \Gamma$  – целое число). Тогда окончательно сообщение АИС может быть представлено в виде

$$\mathbf{z}_a(k) = \begin{cases} \mathbf{g}[\mathbf{x}(k)] + \boldsymbol{\omega}(k); & k/n_a \in \Gamma; \\ \mathbf{0}; & k/n_a \notin \Gamma, \end{cases}$$

где  $\mathbf{g}(\cdot)$  – векторная функция формирования сообщения АИС, в общем случае нелинейная;  $\mathbf{0}$  – нулевой вектор.

В  $k$ -й момент времени в РЛС и АИС формируются матрицы данных измерений:

$$Z_r(k) = \{\mathbf{z}_{r_i}(k)\}_{i=1}^{m_r(k)}; \quad Z_a(k) = \{\mathbf{z}_{a_j}(k)\}_{j=1}^{m_a(k)},$$

где  $m_r(k)$  и  $m_a(k)$  – количество измерений РЛС и АИС соответственно.

В этот момент в распоряжении ЦОИ имеется набор параметров, описываемый как

$$Z(k) = \begin{cases} Z_r(k), & k/n_a \notin \Gamma; \\ \{Z_r(k), Z_a(k)\}, & k/n_a \in \Gamma. \end{cases}$$

Радиолокационное наблюдение включает в себя параметры, полученные от цели, смешанные с помехами и без информации об идентификаторе. Для сопровождения групповых целей в условиях помех можно применять алгоритм МНТ (Multi-Hypothesis Tracking) или алгоритм совместного вероятностного отождествления данных JPDA (Joint Probabilistic Data Association) [10]–[13]. Алгоритмы МНТ требуют большого объема вычислений (особенно при высоком уровне ложной тревоги из-за океанских волн и морских помех). Поэтому в настоящей статье выбран алгоритм JPDA. Алгоритм объединения траекторий также разрабатывается на основе структуры JPDA.

Завязка траектории происходит по двухточечной процедуре. В алгоритме вероятностного объединения данных результирующая оценка представляет собой взвешенную сумму оценок по всем событиям возможных отождествлений измерений [14], [15]. Используя теорему об общей вероятности по текущим событиям отождествленных измерений, оценку состояния в момент времени  $k$  можно записать как

$$\hat{\mathbf{x}}_r(k|k) = \sum_{i=1}^{m_r(k)} E[x(k)|\theta_i(k), Z_r(k)] \times \\ \times P\{\theta_i(k)|Z_r(k)\} = \sum_{i=1}^{m_r(k)} \hat{\mathbf{x}}_i(k|k)\beta_i(k),$$

где  $E$  – условная вероятность текущего измерения при накопленной матрице измерений  $Z_r(k)$ ;  $\theta_i(k)$  – текущее измерение;  $P$  – априорная вероятность формирования текущего измерения;  $\hat{\mathbf{x}}_i(k|k)$  – обновленное состояние при истинности  $i$ -й траектории объединения:

$$\beta_i(k) \triangleq P\{\theta_i(k)|Z_r(k)\}$$

– вероятность истинности  $i$ -й траектории.

Кроме того, следует учесть объединение траекторных параметров от групповых целей, находящихся в области пересечения зон обзора двух или нескольких радаров. Следующим шагом является объединение обновлений от каждого измерения-

кандидата, чтобы получить результирующую оценку вектора состояния и ее ковариационное обновление:

$$\hat{\mathbf{x}}_r(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + W_k \mathbf{v}(k),$$

где  $W_k$  – матричный коэффициент усиления фильтра Калмана;

$$\mathbf{v}(k) = \sum_{i=1}^{m_r(k)} \beta_i(k) \mathbf{v}_i(k)$$

– вектор объединенных обновлений;  $\mathbf{v}_i$  – вектор невязки при  $i$ -м измерении.

Ковариационная матрица обновленного состояния определяется как

$$P_r(k|k) = P_c(k|k) + \tilde{P}(k),$$

где  $P_c(k|k)$  – ковариационная матрица оценки вектора состояния;

$$\tilde{P}(k) \triangleq W_k \left[ \sum_{i=1}^{m_r(k)} \beta_i(k) \mathbf{v}_i(k) \mathbf{v}_i^T(k) - \mathbf{v}(k) \mathbf{v}^T(k) \right] W_k^T$$

– элемент, соответствующий ошибке за счет наличия в строке нескольких отметок.

Сообщения АИС включают в себя параметры местоположения в декартовой СК. Ввиду линейности модели при совпадении ID траектории с ID в сообщении АИС применяется фильтр Калмана [16].

Далее рассмотрены 2 случая: наличие наряду с локационной информацией сообщений АИС и обзор без данных АИС.

*Случай 1.* Обзор с учетом сообщения АИС (в моменты времени  $k/n_a \in \mathbb{N}$ ):

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + W_k \{z_a(k) - g[\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)]\};$$

$$P_a(k|k) = P(k|k-1) - W_k S(k) W_k^T,$$

где

$$W_k = P(k|k-1) G(k) S(k)^{-1};$$

$$S(k) = G(k) P(k|k-1) G^T(k) + R_a(k);$$

$$G(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

– модель линейного наблюдения АИС с размерами  $2 \times 4$ ;  $R_a(k)$  – ковариационная матрица измерения АИС. Вид матриц  $S$ ,  $W$  определяется моделями движения и наблюдения.

Случай 2. Обзор без учета информации АИС ( $k/n_a \in \mathbb{N}$ ):

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1); P_a(k|k) = P(k|k-1).$$

Отметим, что слежение только по информации АИС имеет существенный недостаток: неправильное объединение измерений АИС с траекторией в моменты переключения идентификатора траекторий АИС. Кроме того, отсутствие идентификаторов АИС позволяет прогнозировать только оценки параметров целей.

**Совместная обработка данных.** В настоящей статье используется объединение траекторий для АИС и радиолокационной оценки по алгоритму T2TF (track-to-track fusion), разработанному на основе структуры JPDA.

По алгоритму T2TF первоначально проверяется гипотеза о том, могут ли независимые оценки радиолокационных измерений  $\{\hat{\mathbf{x}}_r(k|k), P_r(k|k)\}$  и данных АИС  $\{\hat{\mathbf{x}}_a(k|k), P_a(k|k)\}$  принадлежать одной и той же цели. Для этого вычисляется расстояние между данными оценками:

$$\hat{\Delta}_{ra}(k) = \hat{\mathbf{x}}_r(k|k) - \hat{\mathbf{x}}_a(k|k).$$

Гипотеза о том, что оценки относятся к одной и той же цели, принимается, если статистическое расстояние между двумя измерениями

$$D = \hat{\Delta}_{ra}^T(k) [P_r(k|k) + P_a(k|k)]^{-1} \hat{\Delta}_{ra}(k) \leq D_\alpha,$$

где  $D_\alpha$  – пороговое расстояние.

Затем связанные оценки объединяются в соответствии с байесовским критерием минимальной средней квадратичной ошибки (МСКО) [17] с получением итоговой оценки:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_c(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}_r(k|k) + [P_r(k|k) - P_{ra}(k|k)] \times \\ &\times [P_r(k|k) + P_a(k|k) - P_{ra}(k|k) - P_{ar}(k|k)]^{-1} \times \\ &\times [\hat{\mathbf{x}}_a(k|k) - \hat{\mathbf{x}}_r(k|k)], \end{aligned}$$

обладающей ковариационной матрицей

$$\begin{aligned} P_c(k|k) &= P_r(k|k) - [P_r(k|k) - P_{ra}(k|k)] \times \\ &\times [P_r(k|k) + P_a(k|k) - P_{ra}(k|k) - P_{ar}(k|k)]^{-1} \times \\ &\times [P_r(k|k) - P_{ar}(k|k)], \end{aligned}$$

где  $P_{ra}(k|k)$ ,  $P_{ar}(k|k)$  – взаимные ковариационные матрицы между  $\hat{\mathbf{x}}_r(k|k)$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_a(k|k)$  и между  $\hat{\mathbf{x}}_a(k|k)$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_r(k|k)$  соответственно.

**Применение описанного алгоритма обработки данных.** Система была развернута для приема и обработки данных с имеющихся 11 РЛС с целью формирования картины морской обста-

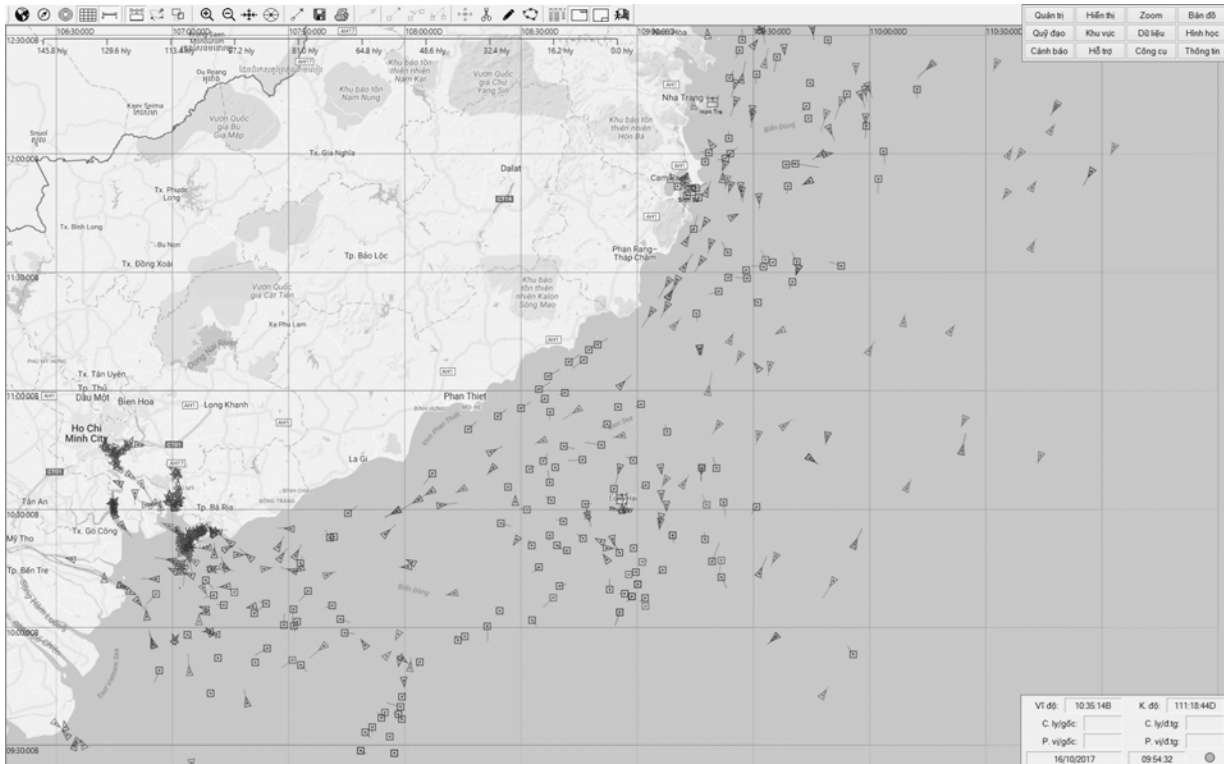


Рис. 3

новки в реальном времени. Она способна принимать, обрабатывать и распределять до 10 000 траекторий одновременно. Постоянно обновляется информация о координатах, направлении, скорости, состоянии судов в море. С помощью функций программного обеспечения можно дополнять данные морской карты, информацию об объектах и морских зонах и т. д. для обеспечения полной картины морской обстановки. Хранение информации в базе данных позволяет воспроизвести историю маршрута судна в любой момент времени.

Спроектированная система имеет открытую структуру, в нее можно интегрировать дополнительные РЛС. Программное обеспечение системы построено на основе операционной системы Windows /Windows Server, используя набор инструментов Visual Studio 2013, языки программирования C/C++. На рис. 3 изображена морская обстановка побережья, полученная при помощи данной системы.

**Заключение.** В статье представлены основные решения, которые были получены и внедрены в процессе создания интегрированной системы прибрежных РЛС средней дальности, развернутой в АКП Военно-морского флота, с целью улучшения контроля за надводной обстановкой. Распределение обработанных данных, поступающих от группы РЛС, и объединение их на центральном сервере производятся в соответствии с тактическим подходом исходя из необходимости обработки большого объема данных. Алгоритм объединения радиолокационных данных в перекрывающихся областях и интеграции с АИС предназначен для минимизации количества вычислений и обеспечения наблюдения в режиме реального времени. На АРМ информация от целей отображается на цифровой карте (рис. 3) с помощью удобных инструментов для мониторинга и управления морской обстановкой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bin Lin, Chih-Hao Huang. Comparison Between Arpa Radar and AIS Characteristics for Vessel Traffic Services // *J. of Marine Science and Technology*. 2006. Vol. 14, № 3. P. 182–189.
2. Integration between X-Band Radar and Buoy Sea State Monitoring / G. Ludeno, F. Reale, F. Raffa, F. Dentale, F. Soldovieri, E. P. Carratelli, F. Serafino // *Ocean Sci. Discuss*. 2016. P. 110–126. doi: 10.5194/os-2016-53
3. Thurber R. E. Advanced Signal Processing for Detecting Surface Targets // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1983. Vol. 4. P. 285–295.
4. Bar-Shalom Y., Fortmann T. E. Tracking and data association. Boston: Academic Press, 2010. 322 p.
5. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
6. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Киев: КВЦ, 2000. 428 с.
7. Объединение радиолокационной информации в многопозиционных активно-пассивных комплексах в условиях неопределенности наблюдения объектов / В. М. Грачев, А. В. Довбня, С. Н. Анастасенко, Р. В. Сафронов // *Системы обработки информации*. 2001. Вып. 5(15). С. 64–68.
8. Грачев В. М., Довбня А. В. Метод и алгоритм мультитардарной траекторной обработки радиолокационной информации в системе независимых радиолокационных станций // *Радиотехника: всеукраинский межведомственный науч.-техн. сб.* 2006. Вып. 147. С. 9–16.
9. Habtemariam B. K. Effective Data Association Algorithms for Multitarget Tracking. URL: <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/16272> (дата обращения: 21.03.2018).
10. Reid D. B. An Algorithm for Tracking Multiple Targets // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1979. Vol. 24. P. 843–854.
11. Svensson L., Svensson D., Willett P. Set JPDA Algorithm for Tracking Unordered Sets of Targets // *Proc. of 12th Intern. Conf. on Information Fusion Seattle, WA, USA, 6–9 July, 2009*. URL: <http://fusion.isif.org/proceedings/fusion09CD/data/papers/0460.pdf> (дата обращения: 21.03.2018).
12. Daronkolaei A. G., Shiry S., Menhaj M. B. Multiple Target Tracking for Mobile Robots Using the JPDAF Algorithm // *Proc. of the 19th IEEE Intern. Conf. on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, Patras, Greece, 29–31 Oct. 2007. P. 137–145.
13. Formann T. E., Bar-Shalom Y., Scheffe M. Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association // *IEEE J. Oceanic Engineering*. 1983. Vol. OE-8. № 3. P. 173–183.
14. Веремьев В. И., Коновалов А. А., Бархатов А. В. Радиолокационный мониторинг нижних слоев атмосферы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 186 с.
15. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.
16. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // *Trans. of the ASME – J. of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82. Ser. D. P. 35–45.
17. Segal A. V., Reid I. Latent Data Association: Bayesian Model Selection for Multi-Target Tracking // *IEEE Intern. Conf. on Computer Vision, Australia, 1–8 Dec. 2013*. P. 2904–2911.

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2018 г.

**Данг Куанг Хиеу** – магистр техники и технологий по направлению "Телекоммуникации" (2002, Технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам); старший научный сотрудник названного университета. Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация; телекоммуникации.  
E-mail: hieudq@aic.com.vn

**Нгуен Суан Чыонг** – инженер по направлению "Радиотехника" (2013, Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерации им. Маршала Советского Союза А. М. Василевского); научный сотрудник Института интеграции систем Технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация; телекоммуникации.  
E-mail: truongnx@mta.edu.vn

## REFERENCES

1. Bin Lin, Chih-Hao Huang. Comparison Between Arpa Radar and AIS Characteristics for Vessel Traffic Services. *Journal of Marine Science and Technology*. 2006, vol. 14, no. 3, pp. 182–189.
2. Ludeno G., Reale F., Raffa F., Dentale F., Soldovieri F., Carratelli E. P., Serafino F. Integration between X-Band Radar and Buoy Sea State Monitoring. *Ocean Sci. Discuss*. 2016, pp. 110–126. doi: 10.5194/os-2016-53
3. Thurber R. E. Advanced Signal Processing for Detecting Surface Targets. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1983, vol. 4, pp. 285–295.
4. Bar-Shalom Y., Fortmann T. E. Tracking and data association. Boston, Academic Press, 2010, 322 p.
5. Kuz'min S. Z. *Osnovy proektirovaniya sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii* [Basics for Design of Radar Information Digital Processing Systems]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 352 p. (In Russian)
6. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya* [Digital Radar]. Kiev, KBIL, 2000, 428 p. (In Russian)
7. Grachev V. M., Dovbnya A. V., Anastasenko S. N., Safronov R. V. Aggregation of Radar Information in Multi-Position Active-Passive Complexes under Conditions of Subject Surveillance Uncertainty. *Sistemy obrabotki informatsii* [Information Processing Systems]. 2001, vol. 5(15), pp. 64–68. (In Russian)
8. Grachev V. M., Dovbnya A. V. Method and Algorithm for Multi-Radar Trajectory Processing of Radar Information in Independent Radar System. *Radiotekhnika: vseukrainskii mezhvedomstvennyi nauchn.-tekhn. sb.* [Radio engineering: all-Ukrainian interdepartmental research and development collected works]. 2006, vol. 147, pp. 9–16. (In Russian)
9. Habtemariam B.K. Effective data association algorithms for multitarget tracking. Available at: Received February, 20, 2018
10. Reid D. B. An Algorithm for Tracking Multiple Targets. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1979, vol. 24, pp. 843–854.
11. Svensson L., Svensson D., Willett P. Set JPDA Algorithm for Tracking Unordered Sets of Targets // Proc. of 12th Intern. Conf. on Information Fusion Seattle, WA, USA, 6–9 July, 2009. URL: <http://fusion.isif.org/proceedings/fusion09CD/data/papers/0460.pdf> (дата обращения: 21.03.2018).
12. Daronkolaei A. G., Shiry S., Menhaj M. B. Multiple Target Tracking for Mobile Robots Using the JPDAF Algorithm. Proc. of the 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). Patras, Greece, 29–31 Oct., 2007, pp. 137–145.
13. Formann T. E., Bar-Shalom Y., Scheffe M. Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association. *IEEE Journ. Oceanic Engineering*. OE-8, 1983, no. 3, pp. 173–183.
14. Verem'ev V. I., Konovalov A. A., Barkhatov A. V. *Radiolokatsionnyi monitoring nizhnikh sloev atmosfery* [Radar Monitoring of Lower Atmosphere]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 186 p. (In Russian)
15. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii. Chast' 1.* [Fundamentals of Trajectory Processing of Radar Information. Pt. 1]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2013, 164 p. (In Russian)
16. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Trans. of the ASME–Journal of Basic Engineering*. 1960, vol. 82, Ser. D, pp. 35–45.
17. Segal A. V., Reid I. Latent Data Association: Bayesian Model Selection for Multi-Target Tracking. *IEEE International Conference on Computer Vision, Australia*, 1–8 Dec., 2013, pp. 2904–2911.

**Dang Quang Hieu** – Master of Science in Radio Engineering (2002, Le Quy Don University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam), Chief Researcher of named University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: radiolocation and radio navigation; telecommunications.  
E-mail: hieudq@aic.com.vn

**Nguyen Xuan Truong** – engineer in Radio Engineering (2013, Marshal Aleksander Vasilevsky Military Academy of the Armed Forces Air Defense Branch); researcher of Le Quy Don University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam. Area of expertise: radiolocation and radio navigation; telecommunications.  
E-mail: truongnx@mta.edu.vn