

## Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных по отраженным сигналам от сложных целей

Сунг Ха Во<sup>1</sup>, Трунг Киен Нгуен<sup>1</sup>, Фунг Бао Нгуен<sup>2✉</sup>, Куанг Хиеу Данг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный институт науки и технологий, Ханой, Вьетнам

<sup>2</sup>Технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

✉ [nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn](mailto:nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn)

### Аннотация

**Введение.** Повышение качества входной информации для системы траекторной обработки (ТО) на основе повышения точности измерений радиолокационных (РЛ) сенсоров является одним из очевидных подходов. Однако при этом РЛ-цели могут стать "сложными целями", имеющими несколько отметок на выходе обнаружителя. Это затрудняет точную оценку кинетических параметров целей в системе ТО. В статье представлены результаты синтеза обобщенного алгоритма обработки и формирования данных из отраженных сигналов сложных целей, позволяющего точно оценить кинетические параметры для решения задачи ТО.

**Цель работы.** Краткое изучение причин формирования "сложных целей". Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных по отраженным сигналам от сложных целей на основе теории обработки РЛ-изображений.

**Материалы и методы.** Теория цифровой обработки сигналов; прикладная теория обработки РЛ-изображений; MATLAB Simulink Toolboxes для моделирования обработки РЛ-изображений; методы нечеткой кластеризации.

**Результаты.** На основе анализа некоторых характеристик сложных целей и теории обработки РЛ-изображений синтезирован обобщенный алгоритм обработки и формирования данных отраженных сигналов от этого класса целей, являющийся предпосылкой для точной оценки их "представительной отметки" при решении задачи ТО.

**Заключение.** В статье проведен анализ особенностей формирования сложных целей в РЛ-технике и их особенностей при точной оценке истинной отметки; синтезирован обобщенный алгоритм обработки и формирования РЛ-сигналов, отраженных от сложных целей, являющийся основой при решении задач ТО.

**Ключевые слова:** сложные цели, траекторная обработка, матрица интенсивностей составляющих отраженного сигнала, матрица пикселей радиолокационного изображения, радиолокационная информация

**Для цитирования:** Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных по отраженным сигналам от сложных целей / Сунг Ха Во, Трунг Киен Нгуен, Фунг Бао Нгуен, Куанг Хиеу Данг // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 44–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; принята к публикации после рецензирования 16.01.2023; опубликована онлайн 28.02.2023

---



## Synthesis of a Generalized Algorithm for Processing and Generating Data on Reflected Signals from Complex Targets

Xung Ha Vo<sup>1</sup>, Trung Kien Nguyen<sup>1</sup>, Phung Bao Nguyen<sup>2✉</sup>, Quang Hieu Dang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Science and Technology, Ha Noi, Viet Nam

<sup>2</sup>Le Quy Don University of Science and Technology, Ha Noi, Viet Nam

✉ [nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn](mailto:nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn)

### Abstract

**Introduction.** The quality of input information for trajectory processing (TP) systems can be improved by increasing the measurement accuracy of radar sensors (RS). However, in such a case, radar targets acquire the characteristics of complex targets having several marks at the output of the detector. This makes it difficult to accurately assess the kinetic parameters of targets in a TP system. In this respect, the development of a generalized algorithm for processing and generating data from the reflected signals of complex targets seems a relevant research task.

**Aim.** To investigate reasons for the formation of complex targets and, using the theory of radar image processing, to synthesize an algorithm for processing and generating data on reflected signals from a complex target.

**Materials and methods.** The following methodological approaches were used: the theory of digital signal processing; applied theory of radar image processing; MATLAB Simulink Toolboxes for simulating radar image processing; some prerequisites for fuzzy clustering methods.

**Results.** Following an analysis of some characteristics of complex targets and the theory of radar image processing, an generalized algorithm was synthesized for processing and generating data of reflected signals from this class of targets. The results can be used to improve the measurement accuracy of their representative point when solving the TP problem.

**Conclusion.** Reasons for the formation of complex targets in radar technology were analyzed. Their specific features consist in the need to accurately assess a true mark. A generalized algorithm for processing and generating these signals reflected from complex targets was proposed. The results can serve as a basis for solving the TP problem.

**Keywords:** complex target, trajectory processing, intensity matrices of reflected signal components, pixel matrices of radar images, radar information

**For citation:** Vo Xung Ha, Nguyen Trung Kien, Nguyen Phung Bao, Dang Quang Hieu. Synthesis of a Generalized Algorithm for Processing and Generating Data on Reflected Signals from Complex Targets. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 44–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 16.11.2022; accepted 16.01.2023; published online 28.02.2023

**Введение.** Как известно, в радиолокационной (РЛ) технике и технологии качество всего процесса обработки РЛ-информации оценивается качеством траекторной обработки (ТО) целей [1–4]. Одним из направлений улучшения качества ТО является повышение точности измерений и разрешающей способности радарных сенсоров (РЛ-сенсоров). С этой точки зрения в качестве зондирующего сигнала современные сверхширокополосные (СШП) и сверхкороткоимпульсные (СКИ) сигналы обладают высокими потенциальными возможностями для точного обнаружения и идентификации

различных типов целей [5–13]. Однако это может привести к тому, что почти все цели будут находиться в классе сложноструктурных целей (сложных целей (СЦ) – complex target) и затруднять точную оценку кинетических параметров для решения различных вопросов ТО. Особенно важными являются задачи их своевременной фильтрации и точного сопровождения траектории. Согласно [3, 5, 9–11] одной из особенностей СКИ-сигналов является то, что длительность зондирующего импульса ( $\tau_{\text{зонд}} = \tau_{\text{им}}$ ) намного меньше длительности отраженного ( $\tau_{\text{отр}}$ ). К настоящему времени

опубликовано немало работ, связанных с обнаружением сложных целей и их применением в различных задачах. Особенно подробно рассмотрены задачи, связанные с обработкой и анализом данных для формирования РЛ-портретов целей при классификации и распознавании [5–7], а то, что связано с формированием данных для точной оценки отметок, являющихся входным источником информации для ТО этого класса целей, исследовано в меньшей степени.

Материал этой статьи представляет некоторые результаты исследований по точному определению отметок, полученных от СЦ, идея которой была обсуждена в [12]. Во втором разделе статьи кратко представлена проблема формирования сложных целей и их особенности при обнаружении и обработке отраженных сигналов. В третьем разделе представлены результаты синтеза блок-схемы обработки и формирования данных сигналов, отраженных от СЦ. Некоторые результаты исследования и комментарии представлены в четвертом разделе.

**Проблема формирования сложных целей и их особенности.** *Общее уравнение радиолокации.* Предположим, что однопозиционный РЛ-сенсор, имеющий рабочую частоту  $f$ , направленно излучает энергию  $E_{\text{изл}}(f)$  в объемный угол  $\Omega_{\text{изл}}$  для обнаружения цели со средним значением эффективной площади рассеивания (ЭПР)  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}(f)$ , который находится от сенсора на расстоянии  $r(f)$ . При этом, если приемная антенна имеет эффективную площадь (ЭП) вида  $A_{\text{при}}(f)$ , то отраженная к ней энергия от цели определяется выражением

$$E_{\text{при}}(f) = \frac{E_{\text{изл}}(f) \bar{\sigma}_{\text{ц}}(f) 1}{\Omega_{\text{изл}} r^2(f) 4\pi} \frac{A_{\text{при}}(f)}{r^2(f)},$$

где  $E_{\text{изл}}(f)/\Omega_{\text{изл}}$  – плотность энергии излучения в единице объемного угла;  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}(f)/r^2(f)$  – объемный угол, экранированный целью с ЭПР  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}(f)$ , которая находится на расстоянии  $r(f)$  от сенсора;  $1/(4\pi)$  – коэффициент, определяющий равномерное вторичное излучение в сферическом пространстве с объемным углом  $4\pi$ ;

$A_{\text{при}}(f)/r^2(f)$  – объемный угол, экранированный ЭП приемной антенны  $A_{\text{при}}(f)$ .

Тогда максимальная дальность обнаружения цели в свободном пространстве будет определяться выражением

$$r(f) = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{изл}}(f) A_{\text{при}}(f) \bar{\sigma}_{\text{ц}}(f)}{4\pi \Omega_{\text{изл}} E_{\text{при}}(f)}}. \quad (1)$$

В (1) информация об обнаруживаемой цели представлена величиной  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}(f)$ , значение которой зависит от частоты зондирующего сигнала.

*Свойства сложных целей в задаче обнаружения.*

1. При фиксированной частоте излучения  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}(*)$  зависит от угла наблюдения  $\theta$ , определяемого линией между целью и сенсором и линией, совпадающей с направлением движения цели  $\theta \triangleq (-\mathbf{r}_{\text{ц}}, \mathbf{v}_{\text{ц}})$ . На основе некоторых предложений, описанных в [14–17], и инструмента симуляции [18, 19] на рис. 1 представлен результат моделирования вторичной диаграммы направленности (ВДН) модели корабля морской полиции РЛ-сенсором, работающим в диапазоне  $X$  с шириной импульса  $\tau_{\text{им}} \sim 1$  мкс, полученный с помощью инструмента симуляции "Radar target backscattering simulation soft-ware" при наблюдении за кораблем морской полиции.

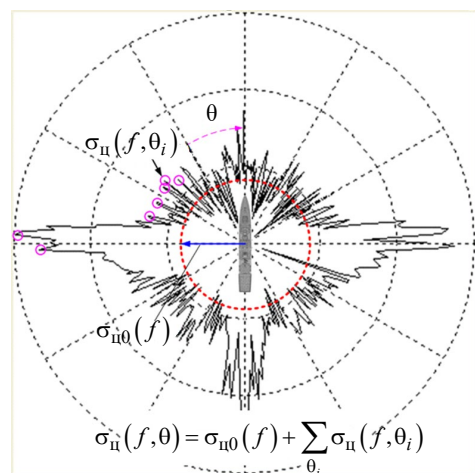


Рис. 1. Результат моделирования ВДН модели корабля морской полиции РЛ-сенсором, работающим в диапазоне  $X$  с  $\tau_{\text{им}} \sim 1$  мкс

Fig. 1. Results of simulating the SDR of a navy police ship by a radar system operating in the  $X$  band with  $\tau_{\text{им}} \sim 1$   $\mu\text{s}$

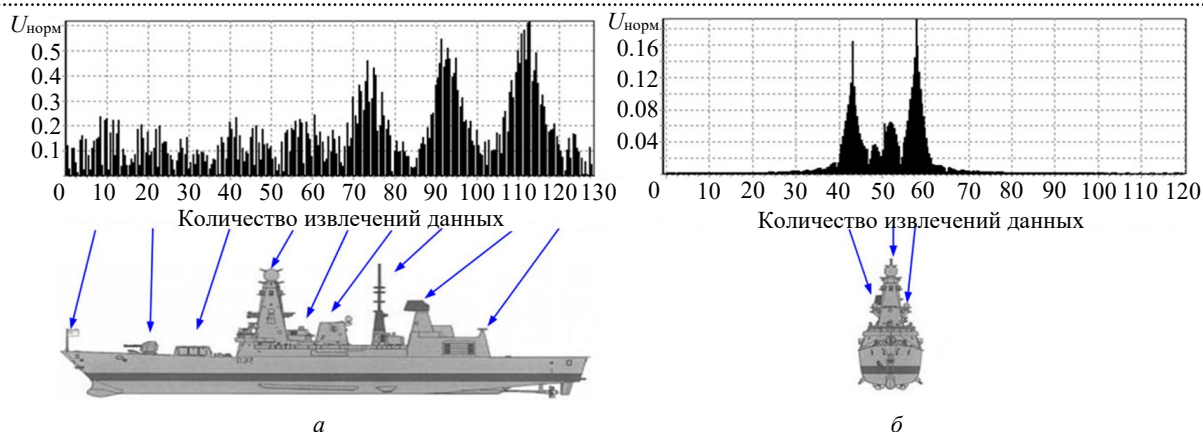


Рис. 2. Результаты моделирования портретов интенсивности принимаемого сигнала от модели корабля морской полиции, косвенно выраженных через величины  $\sigma_{\text{ц}}(\theta)|_{X\text{-band}}$  при двух углах наблюдения:  $a - \theta = 90^\circ$ ;  $b - \theta = 0^\circ$

Fig. 2. Results of simulating the portraits of the received signal from the model of a naval police ship, expressed indirectly in terms of the quantities  $\sigma_{\text{ц}}(\theta)|_{X\text{-band}}$  at two viewing angles:  $a - \theta = 90^\circ$ ;  $b - \theta = 0^\circ$

Нетрудно заметить, что при изометрических условиях наблюдения дальность обнаружения будет зависеть от угла наблюдения:

$$r = f(\theta).$$

2. Классификация цели ("простой – точечной" или "сложной – многоточечной" формы) основана на соотношении между объемом разрешения, который определяется параметрами РЛ-сенсора:  $f$  – рабочая частота;  $\tau_{\text{им}}$  – длительность импульса зондирующего сигнала; ширина главного луча  $\beta_{0.5}, \varepsilon_{0.5}$  антенной системы, и линейными размерами  $l_{\text{ц}}$  самой цели.

При  $\lambda > l_{\text{ц}}$  цель будет отнесена к классу "простых – точечных" целей, информация о которых будет выражаться через "фоновую" блестящую точку (БТ)  $\sigma_{\text{ц}0}$ , а при  $\lambda < l_{\text{ц}}$  и  $\lambda \ll l_{\text{ц}}$  цель будет принадлежать к классу "сложных", информация о которых выражается через  $\sigma_{\text{ц}}(f, \theta)$ :

$$\sigma_{\text{ц}}(f, \theta) = \sigma_{\text{ц}0}(f) + \sum_{\theta_i}^n \sigma_{\text{ц}}(f, \theta_i),$$

где  $\sigma_{\text{ц}0}(f)$  – "фоновая" БТ, величина которой зависит от  $f$ ;  $\sigma_{\text{ц}}(f, \theta_i)$  – значение ЭПР для каждой удельной БТ, величина которой зависит от  $f$  и угла  $\theta_i$ .

Это значит, что сложные цели можно рассматривать как многоблестящие (многоточечные) цели, величина  $\sigma_{\text{ц}}(f, \theta_i)$  которых зависит от угла наблюдения и суперпозиционирована на фоне величины "фоновой" БТ  $\sigma_{\text{ц}0}$ . На рис. 2,  $a$  и  $b$  представлены результаты моделирования портретов интенсивности принимаемого нормированного сигнала ( $U_{\text{норм}} = U(\theta)/U_{\text{max}}$ ) от модели корабля морской полиции, косвенно выраженных через величины  $\sigma_{\text{ц}}(\theta)|_{X\text{-band}}$  при двух углах наблюдения  $\theta = 90^\circ$  и  $\theta = 0^\circ$  с помощью инструмента симуляции [18, 19].

3. Из приведенного анализа в сочетании с результатами моделирования можно сделать следующие выводы:

- свойства целей (точечных или сложных) в основном зависят от соотношения между объемом разрешения радара и размерами самой цели. Повышение качества обработки информации на основе повышения точности измерений РЛ-сенсоров может привести к тому, что обнаруживаемые цели будут принадлежать к классу СЦ с множеством БТ;

- количество БТ для СЦ, определяющих формирование множества "точечных отражателей", зависит от угла наблюдения и суперпозиции на фоне  $\sigma_{\text{ц}0}$ . Это происходит из-за того, что в отраженном сигнале будет много составляющих, значение амплитуды которых превышает порог обнаружения;



– пространственное корреляционное соотношение этих "точечных отражателей" для СЦ очень мало и полностью зависит от соотношения между координатами РЛ-сенсора и направлением движения цели.

Поэтому проблема формирования и оценки единой "представительной" отметки и назначения ее "отметкой обнаружения" в каждом периоде обзора РЛ-сенсора для этого класса целей является актуальной задачей. И до этого необходимо реализовать предварительную обработку. Она заключается в том, что на основе формирования матрицы данных, полученных из отраженных сигналов, выполняют точную оценку возможных признаков (параметров) "промежуточных" отметок, каждая из которых является "представителем" подмножества составляющих точечных отражателей, имеющих похожие характеристики.

В качестве примера на рис. 3 приведены изображения на экране анализатора РЛ-сенсора целей в двух разных режимах масштабирования. В режиме масштабирования  $\Delta\beta = \delta\beta \times n = 88^\circ$  и  $\Delta r = \delta_r \times m = 18$  км наблюдаются разные цели (рис. 3, а), а в режиме более детального масштабирования  $\Delta\beta = 22^\circ$ ;  $\Delta r = 2$  км наблюдается одна цель (рис. 3, б). Здесь  $(\delta\beta \times \delta_r)$  – размеры одного пикселя по азимуту и дальности;  $n$  и  $m$  – число пикселей по азимуту и дальности при масштабировании соответственно. И по методике, описанной в [6, 9, 10], отраженный от цели сигнал после предобработки будет иметь вид матриц РЛ-данных изображения (матриц интенсивностей составляющих отраженного сигнала (МИС) или матриц пикселей РЛ-изображения (МПИ)), представленных на рис. 4 в портретном

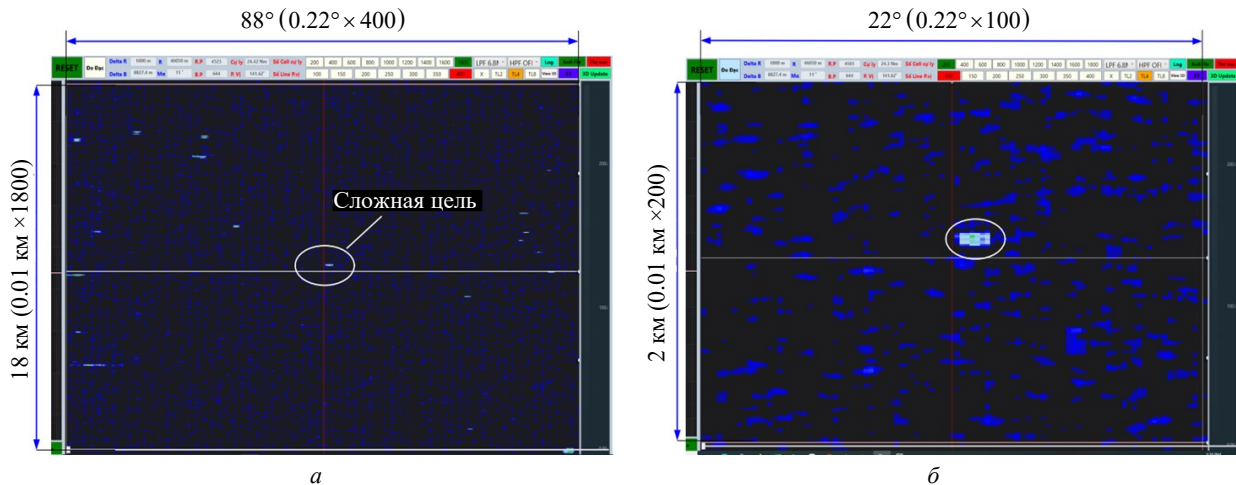


Рис. 3. Экран анализатора РЛ-сенсора в двух режимах масштабирования: а –  $\Delta\beta = 88^\circ$ ;  $\Delta r = 18$  км; б –  $\Delta\beta = 22^\circ$ ;  $\Delta r = 2$  км

Fig. 3. Radar sensor analyzer screen in two zoom modes: а –  $\Delta\beta = 88^\circ$ ;  $\Delta r = 18$  km; б –  $\Delta\beta = 22^\circ$ ;  $\Delta r = 2$  km

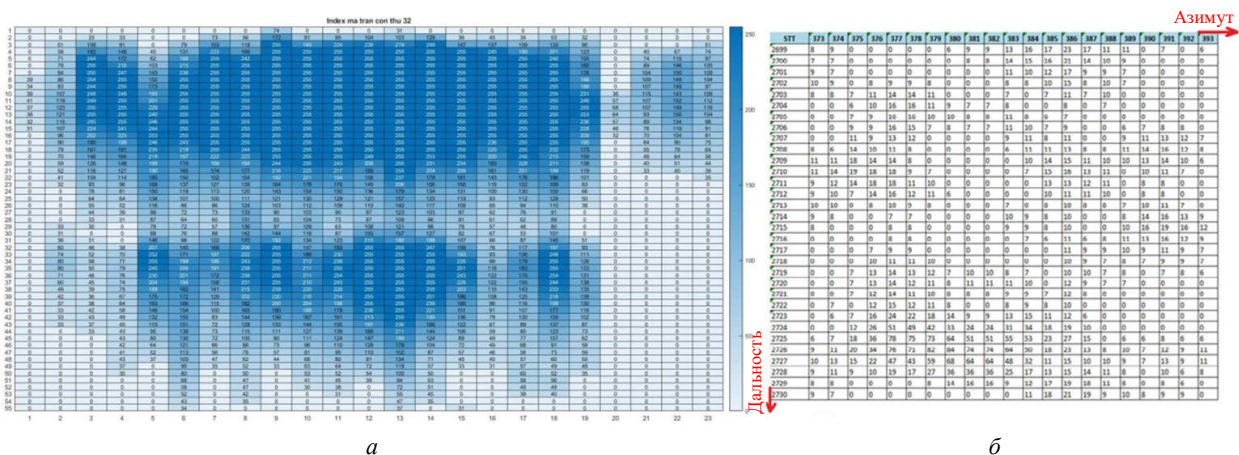


Рис. 4. МИС портретного (а) и табличного (б) вида

Fig. 4. IMS components of portrait (а) and tabular type (б)

(а) и табличном (б) виде. Задача следующего раздела заключается в том, чтобы из этих данных МПИ выполнить оценку репрезентативных "промежуточных" отметок, концепция получения которых была представлена ранее.

**Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных сигналов, отраженных от сложных целей.** Некоторые предпосылки:

1. МПИ имеет вид

$$A = [a_{m,n}]; m = 1 \dots M; n = 1 \dots N,$$

где  $a_{m,n}$  – значение, соответствующее интенсивности пикселя в позиции  $m \times n$ ;  $M \times N$  – размер изображения, соответствующий размеру области анализа  $\Delta\beta \times \Delta r$ .

2. БТ  $\{e_{p,q}\}$ ;  $p \in P \subset M$ ,  $q \in Q \subset N$  – может быть определена как пиксель, который имеет наибольшее значение интенсивности, но может быть не максимальным.

3. В  $A = [a_{m,n}]; m = 1 \dots M; n = 1 \dots N$  возможно наличие большого количества БТ или наборов "сходных" пикселей (domain пикселей) по всем признакам.

4. Обычно величина интенсивности БТ лежит в пределах заданного диапазона в зависимости от динамического диапазона приемного устройства РЛ-сенсора. Поэтому для удобства и простоты расчетов можно количественно оце-

нить их по уровням, т. е.

$$A \rightarrow E = [e_{m,n}], e_{m,n} = \lfloor a_{m,n} \rfloor; \\ m = 1 \dots M; n = 1 \dots N,$$

где  $\lfloor x \rfloor = \max \{n \in Z | n \leq x\} = \text{Floor}(x)$ .

Это будет обеспечено при согласовании динамического диапазона приемного устройства сенсора с разрешающей способностью АЦП.

*Математическая основа синтеза алгоритма.* Приведем некоторые математические предпосылки:

1. Пусть криволинейная поверхность  $A = f(r, \beta)$  имеет проекцию  $D$  на плоскости  $Or\beta$  (рис. 5, а). Тогда объем тела  $V$ , ограниченного  $A = f(r, \beta)$  и областью  $D$ , будет определяться выражением

$$V = \iint_D f(r, \beta) dr d\beta \approx \sum_m \sum_n f(r_m, \beta_n) \delta_r \delta_\beta.$$

2. Если  $f(r, \beta) \rightarrow 1$ , то  $V$  – тело будет асимптотой к площади области  $D$ , т. е.  $V \rightarrow S_D$  (рис. 5, б), которая определяется выражением

$$S_D \approx \sum_m \sum_n \delta_r \delta_\beta.$$

3. Использование двойного интегрирования позволяет оценить центр области, например, для некоторой области  $D$ , являющейся проек-

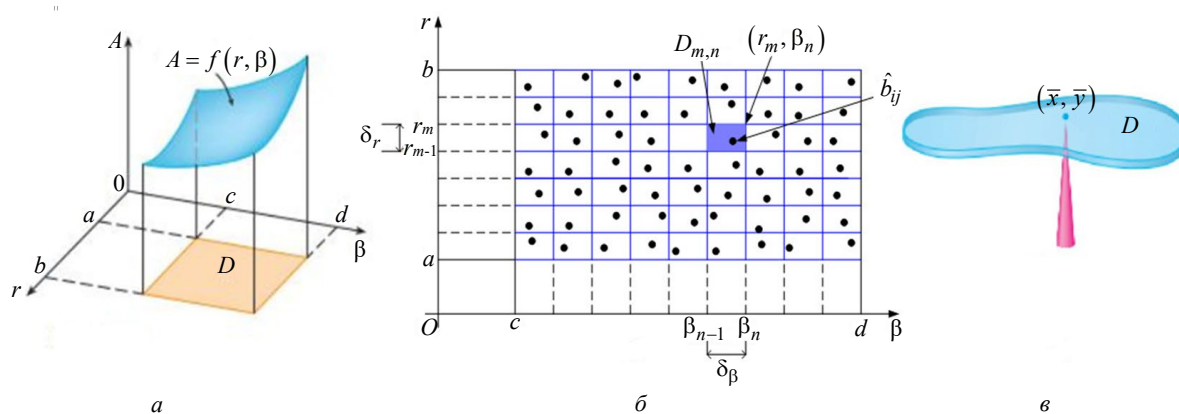


Рис. 5. Некоторые математические предпосылки для синтеза блок-схемы: а – поверхность  $A = f(r, \beta)$ , имеющая проекцию  $D$  в плоскости  $Or\beta$ ; б – рисунок для пояснения процедуры определения  $S_D$ ; в – рисунок для пояснения оценки координат  $\beta_{\text{центр}D}$  и  $r_{\text{центр}D}$  области  $D$

Fig. 5. Mathematical prerequisites for the synthesis of a block diagram: а – surfaces  $A = f(r, \beta)$  which has the projection  $D$  on the plane  $Or\beta$ ; б – determination procedure of  $S_D$ ; в – determination procedure of coordinates  $\beta_{\text{центр}D}$ ,  $r_{\text{центр}D}$  of the area  $D$

цией функции вида  $f(r, \beta)$ . При этом центр для этой области  $D$  будет иметь следующие координаты:

$$\beta_{\text{центр}D} \approx (1/\nu) \iint_D \beta \delta r \delta \beta;$$

$$r_{\text{центр}D} = (1/\nu) \iint_D r dr d\beta,$$

где  $\nu = \iint_D f(r, \beta) dr d\beta$ .

Если  $f(r, \beta) \rightarrow 1$  и область  $D$  дискретизирована по  $\delta_r, \delta_\beta$ , то:

$$\nu = S_D \approx \sum_m \sum_n \delta_r \delta_\beta;$$

$$\beta_{\text{центр}D} \approx (1/\nu) \sum_i \sum_j \beta_i \delta_r \delta_\beta;$$

$$r_{\text{центр}D} \approx (1/\nu) \sum_i \sum_j r_j \delta_r \delta_\beta.$$

Исходя из этих предпосылок, возможно использовать для оценки координат области  $D$  по индексам  $n, m$  следующие соображения. Если область  $D$  разбита на ячейки (см. рис. 5, б) с  $\delta_r = 1; \delta_\beta = 1$  (в рамках этой статьи это синоним размера пикселей), то  $S_D$  рассчитывается суммой ее ячеек (пикселей).

Благодаря тому, что в каждой ячейке значение интенсивности не изменяется:

$$f(r, \beta) \approx 1;$$

$$m_{\text{центр}} \approx (1/S_D) \sum_{(m,n) \in D} m;$$

$$n_{\text{центр}} \approx (1/S_D) \sum_{(m,n) \in D} n;$$

при

$$S_D = \sum_{(m,n) \in D} 1.$$

4. Для сложных целей количество областей  $D_{\text{СЦ}}$  будет больше 1, т. е.

$$D_{\text{СЦ}} = \{D_1, \dots, D_i\},$$

где  $i$  – индекс областей  $D_i$ , входящих в сложную цель.

Таким образом, суть решаемой задачи состоит в определении контурных линий (КЛ),

окружающих области одинакового уровня интенсивности сигнала, отраженного от сложной цели. Полученная картина представляет собой портрет из КЛ, описывающих характер распределения интенсивности отраженного сигнала, определяемый в реальном времени, соответствующем периоду обзора РЛ-сенсора. Данными КЛ являются данные, используемые для точного определения параметров (координат, интенсивности и т. д.) каждого составляющих БТ сложных целей.

*Синтез обобщенного алгоритма.* На рис. 6 представлен обобщенный алгоритм обработки и формирования данных сигналов, отраженных от сложных целей. При этом имеются некоторые замечания:

1.  $K \triangleq$  определяется как количество возможных контурных линий;  $k = 1 \dots K$  – является индексом КЛ. В рамках рассматриваемой задачи  $K$  также можно рассматривать как число интенсивных (амплитудных) квантовых уровней отраженного сигнала.

2.  $E_{\text{max}}, E_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значения интенсивности отраженного сигнала. Размер одного шага, соответствующего одной контурной линии, имеет вид

$$dE_k := (k-1) * \Delta, k * \Delta;$$

$$\Delta = \frac{|E_{\text{max}} - E_{\text{min}}|}{K}.$$

3.  $m = 1 \dots M; n = 1 \dots N$  – индекс одного пикселя в позиции  $m \times n$ . При этом значения шагов по индексам  $m$  и  $n$  соответствуют  $\delta_r$  и  $\delta_\beta$ . Поэтому можно считать, что некоторая фиксированная позиция  $m \times n$  является "отметкой частиц (ОЧ) – particles-point" и полностью аналогична позиции пикселя.

Для проверки функционирования МПИ представлена в виде таблицы данных (табл. 1), значения каждого элемента в которой получены в процессе исследования.

На рис. 7 представлены портрет из контурных линий (а) и 3-координатная голограмма сложной цели (б) (в некоторый момент наблюдения), построенные из МИП (табл. 1) по процедуре приведенной на рис. 6 блок-схемы.

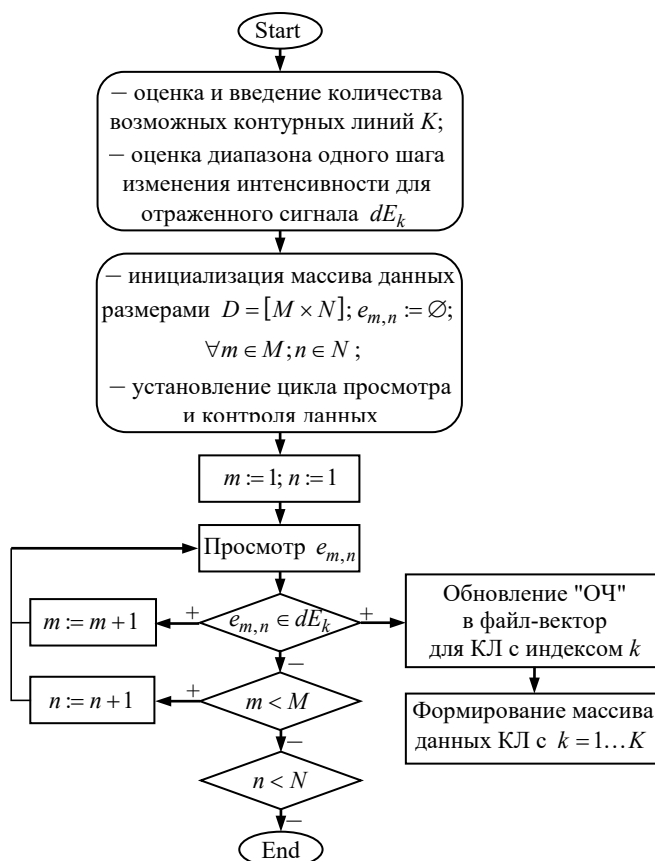


Рис. 6. Обобщенный алгоритм обработки и формирования данных сигналов, отраженных от сложных целей  
 Fig. 6. Generalized algorithm for processing and generating data of signals reflected from complex targets

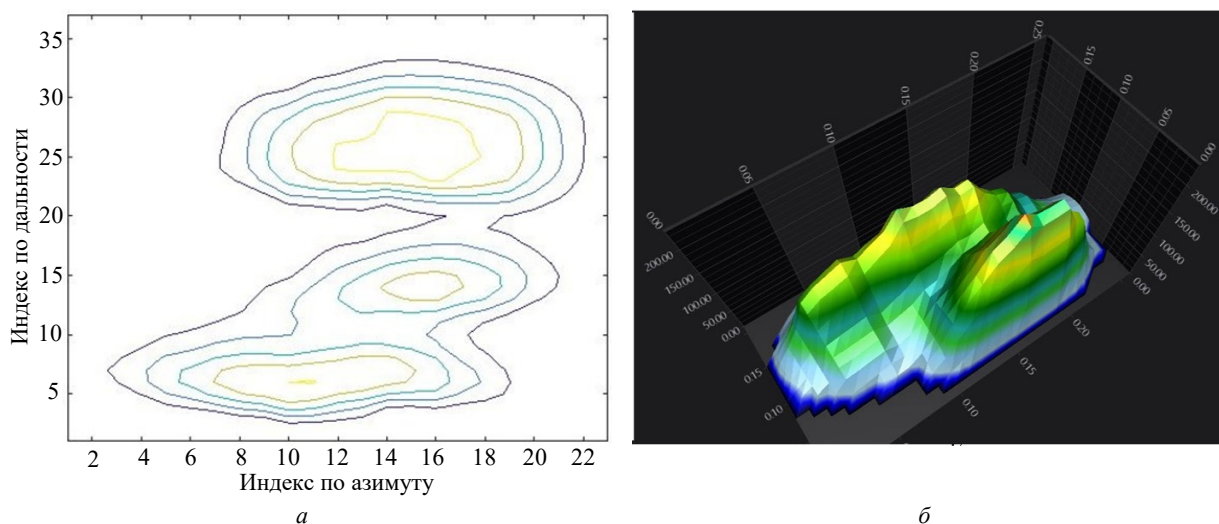


Рис. 7. Портрет из контурных линий (а) и 3-координатная голограмма СЦ (б), построенные из МИП (табл. 1) по синтезированному алгоритму

Fig. 7. A portrait of contour lines (a) and a 3-coordinate SC hologram (b) constructed from MIP (Tab. 1) according to the synthesized algorithm

**Некоторые результаты исследования и комментарии.** Экспериментальные исследования проводились при слежении за маневриру-

ющим кораблем среднего размера на дальность 32 мили РЛ-сенсором X-диапазона, работающим в масштабной шкале по дальности 55 мм.



Табл. 1. МПИ, представленная в виде таблицы данных  
 Tab. 1. PMI presented as a data table

		Пиксельная нумерация по азимуту															
		3006	3007	3008	3009	3010	3011	3012	3013	3014	3015	3016	3017	3018	3019	3020	3021
Пиксельная нумерация по дальности	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	382	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	383	0	0	0	0	0	0	0	34	46	90	83	63	46	0	0	
	384	0	0	0	0	42	62	90	121	140	184	170	131	109	56	52	
	385	0	0	22	52	96	125	162	196	215	241	232	200	186	150	140	
	386	0	28	49	85	135	163	202	230	236	250	252	238	238	214	196	
	387	0	39	57	90	136	158	193	220	228	225	232	231	231	226	205	
	388	0	31	46	71	108	125	152	166	168	161	179	194	210	211	186	
	389	0	0	29	47	74	88	109	121	123	119	131	145	157	156	140	
	390	0	0	0	26	47	60	78	91	95	99	107	119	129	122	114	
	391	0	0	0	0	22	34	51	66	78	96	107	121	130	119	117	
	392	0	0	0	0	0	0	30	47	70	98	116	139	154	150	155	
	393	0	0	0	0	0	0	20	34	63	91	117	150	176	191	203	
	394	0	0	0	0	0	0	0	0	49	73	104	144	177	208	225	
	395	0	0	0	0	0	0	0	0	27	44	76	118	150	187	206	
	396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	55	88	112	144	163	
	397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	40	62	76	99	117	
	398	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	38	45	65	78	
	399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	27	37	50	
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	22	26	30	22	36	
	401	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	55	66	70	51	70	
	402	0	0	0	0	0	0	0	21	53	114	130	140	145	126	151	
	403	0	0	0	0	0	0	27	55	108	165	192	213	223	223	240	
	404	0	0	0	0	0	0	43	77	138	189	224	254	255	255	255	
	405	0	0	0	0	0	0	42	81	143	194	229	255	255	255	255	
	406	0	0	0	0	0	0	36	78	140	194	230	252	254	255	255	
	407	0	0	0	0	0	0	32	76	132	180	218	237	245	255	255	
	408	0	0	0	0	0	0	26	69	117	158	198	219	235	255	255	
	409	0	0	0	0	0	0	0	53	91	121	167	189	215	248	248	
	410	0	0	0	0	0	0	0	33	58	76	119	140	170	202	202	
	411	0	0	0	0	0	0	0	0	28	37	73	91	117	143	144	
412	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	49	69	92	93		
413	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	37	53	55		
414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	24		
415	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
416	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

На рис. 8 представлены портрет РЛ-изображения (а), его портрет из контурных линий (б) и портрет 3-координатной голограммы (в) для некоторых близких периодов обзора.

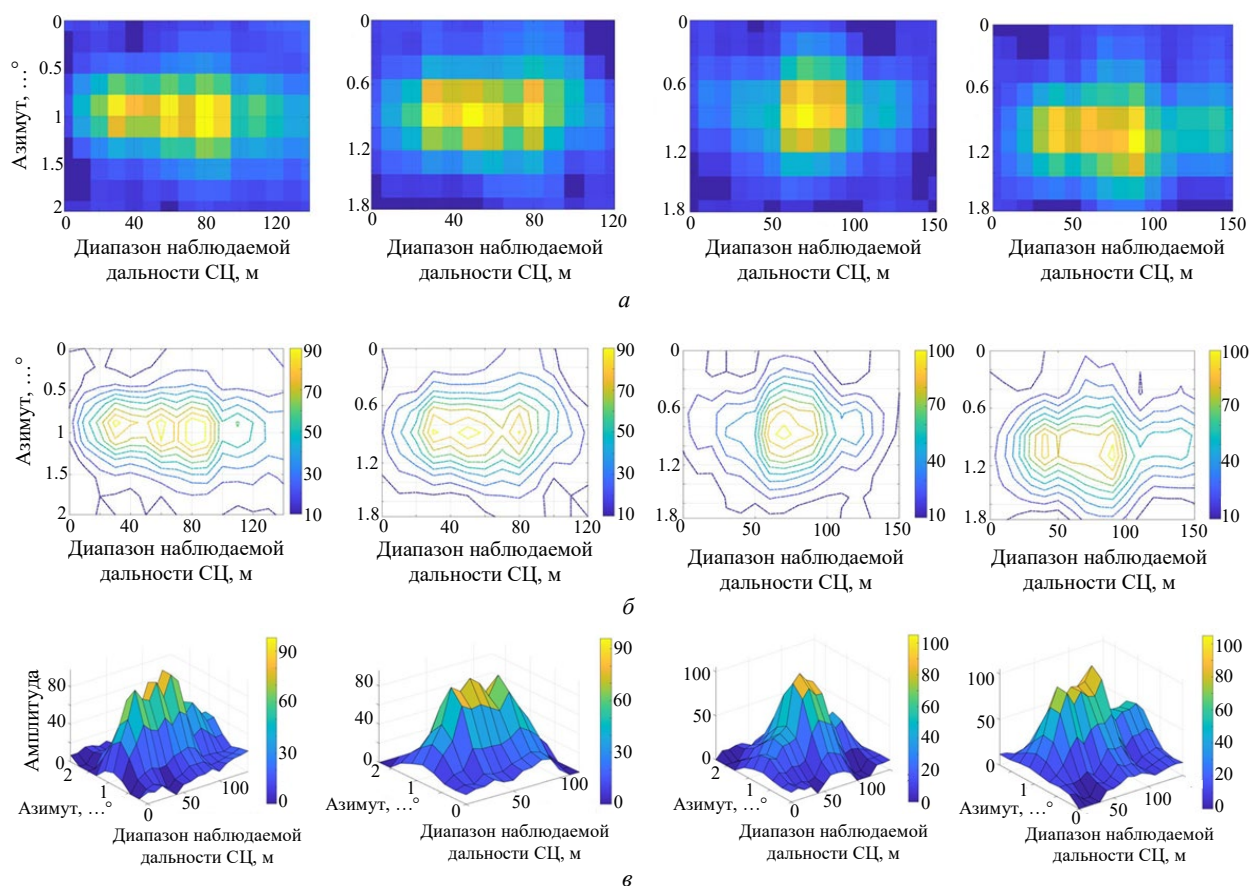


Рис. 8. Портрет РЛ-изображения (а), портрет из контурных линий (б) и портрет 3-координатной голограммы (в) для некоторых близких периодов обзора сенсором X-диапазона при слежении за маневрирующим кораблем среднего размера

Fig. 8. Portrait of radar image (a), portrait of contour lines (b) and portrait of 3 coordinate hologram (c) for some closely different survey periods by the X band sensor when tracking a medium-sized maneuvering ship

Для оценивания работоспособности алгоритма были проведены исследования возможности наблюдения и обработки данных с различным количеством целей в зоне обнаружения РЛ-сенсора. При проведении исследования использован PC Dell Optiplex 3050, процессор Core I5-7500 (3.4 ГГц); оперативная память 8 Гбайт, жесткий диск SSD 240 Гбайт, 64-битная ОС Win10Pro. В табл. 2 представлены результаты исследований.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

Табл. 2. Результаты исследований работоспособности алгоритма

Tab. 2. Verification of the synthesized algorithm

№	Число целей в зоне обнаружения	Время обработки и формирования данных, с
1	5	~0.064
2	9	~0.17
3	15	~0.2
4	26	~0.39
5	36	~0.58

1. Точная оценка координатных параметров цели для предоставления данных на вход устройства ТО является совершенно правильным подходом. Однако решение этой проблемы на основе повышения точности измерения РЛ-сенсора может привести к тому, что наблюдаемые цели автоматически сами станут сложными целями и будут иметь множество отметок, позиции которых находятся в разных координатах (хотя бы близко находящихся) за один период обзора. И это противоречило бы одному из условий ассоциации отметок к траектории цели при помощи фильтров сопровождения.

2. Оценка (в реальном времени, соответствующем каждому периоду обзора) каждой составляющих отраженных отметок для сложных целей на основе вышепредставленного подхода обработки РЛ-изображений позволяет не только определить характеристики локационной позиции, но и их интенсивность. Это дает возможность точного определения "квазиистинной" отметки (от-

метки-представителя), являющейся входными данными системы ТО.

3. Хотя процесс исследований еще не завершен, по данным из табл. 2 можно сделать вывод, что с помощью обычной компьютерной системы предоставление необходимых данных РЛ-сенсорами может обеспечиваться в реальном времени.

**Вывод.** Материал данной статьи описывает результаты решения следующих задач:

1. Краткое обобщение и анализ особенностей формирования сложных целей в радиолокационной технике и обоснование необходимости точной оценки истинной отметки этого класса целей для обеспечения входных данных системы ТО.

2. На основе подхода для обработки РЛ-изображений был синтезирован обобщенный

алгоритм обработки и формирования данных сигналов, отраженных от сложных целей, из которых можно формировать условия для точной оценки репрезентативной отметки (отметки-представителя) при решении вопроса ТО в РЛ-сенсорах в реальном времени.

3. Представлены результаты симуляции и экспериментальных исследований для проверки реальных возможностей синтезированного алгоритма.

Однако нужно сказать о том, что в статье не были представлены материалы, связанные с алгоритмом оценки репрезентативной отметки сложных целей для решения задачи ТО. Этот вопрос будет рассмотрен в другой статье.

### Авторский вклад

**Сунг Ха Во** – проведены исследования сложных моделей целей с использованием профессиональной программы симуляции для получения портрета сигнала, отраженного от сложной цели под разными углами наблюдения; проведены экспериментальные исследования сенсором X-диапазона; проведен анализ полученных данных по синтезированному алгоритму.

**Трунг Киен Нгуен** – научная поддержка, в том числе: при помощи MATLAB были синтезированы входные данные для имитационного моделирования; были указаны результаты, которые должны быть получены в процессе исследования.

**Фунг Бао Нгуен** – научное руководство, научное консультирование по математическим моделям в области РЛ-технологии, РЛ-обработки данных и изображений; руководство при проведении экспериментальных исследований сложных целей сенсором X-диапазона.

**Куанг Хиеу Данг** – научная поддержка в части синтеза и корректирования процедуры алгоритма; помощь в обработке полученных данных.

### Author's contribution

**Vo Xung Ha**, studies of complex target models were carried out using a professional simulation program to obtain a portrait of a signal reflected from a complex target at different viewing angles; experimental studies were carried out with an X-band sensor; the analysis of the obtained data according to the synthesized algorithm was carried out.

**Nguyen Trung Kien**, scientific support, including: using MATLAB, input data for simulation modeling were synthesized; the results that should be obtained during the research process were indicated.

**Nguyen Phung Bao**, scientific guidance, scientific consulting on mathematical models in the field of radar technology, radar data and image processing; guidance in conducting experimental studies of complex targets with an X-band sensor.

**Dang Quang Hieu**, scientific support in terms of synthesizing and correcting the algorithm procedure; assistance in processing the received data.

### Список литературы

1. Чухломин И. Е., Файзулин Н. А. Анализ обнаружителя LOG-CFAR с цифровым адаптивным порогом обнаружения на фоне морских помех // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 1–20.

2. Dejan Ivković, Milenko Andrić, Bojan Zrnić. Detection of Very Close Targets by Fusion CFAR Detectors // Scientific Technical Review. 2016. Vol. 66, № 3. P. 50–57.

3. Мохамед Б. Эль Машад. Преимущества новой стратегии для процессоров CFAR по сравнению с

моделью Неймана–Пирсона при обнаружении флуктуирующих целей, описываемых распределением хи-квадрат с четырьмя степенями свободы // Вісті вищих учбових закладів. Радиоелектроніка. 2018. Т. 61, № 9. С. 487–507. doi: 10.20535/S0021347018090017

4. Thomas A. Detection and estimation theory and its applications. NJ: Pearson/Prentice Hall, 2006. 653 p.

5. Горбунова А. А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплекс-

ному радиолокационному изображению // Электронный журн. "Труды МАИ". 2011. № 45. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/1aa/rus.pdf?referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F> (дата обращения 03.02.2023)

6. Доросинский Л. Г., Трухин М. П. Оптимальная обработка радиолокационных изображений, формируемых в РСА. М.: Издательский дом Академии естествознания, 2017. 212 с.

7. Доросинский Л. Г., Трухин М. П. Прием и обработка сигналов от сложных целей. М.: Издательский дом Академии естествознания, 2018. 264 с.

8. Миронов О. С., Сазонов Д. Д. Особенности корреляционного приема пачек СКИ. Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 31–36. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-31-36

9. Коновалок М. А., Кузнецов Ю. В., Баев А. Б. Идентификация объектов сложной формы в сверхкороткоимпульсной радиолокации // Материалы III Всерос. конф. "Радиолокация и радиосвязь" – ИРЭ РАН. Москва, 26–30 окт. 2009. М.: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2009. С. 932–936.

10. The ISAR Image Post-Processing for Multi-Point Target Identification / M. Konovalyuk, A. Gorbunova, Y. Kuznetsov, A. Baev // Intl J. of Electronics and Telecommunications. 2011. Vol. 57, № 4. P. 433–436. doi: 10.2478/v10177-011-0059-y

11. Konovalyuk M., Kuznetsov Y., Baev A. Moving Multy-Scatterer Target Parametric Identification Using Radar Image // 18th Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Vilnius, Lithuania, 14–16 June 2010. IEEE, 2010. P. 524–528.

12. Старосотников Н. О., Федорцев Р. В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86. doi: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86

13. An Improved Bilateral CFAR Ship Detection Algorithm for SAR Image in Complex Environment / Ai Jiaqiu, Cao Zhenxiang, Ma Yuxiang, Wang Zhanghuai, W. Feifan, Jin Jing // J. of Radars. 2021. № 10(4). P. 499–515. doi: 10.12000/JR20127

14. Моделирование алгоритмов обработки данных радара с синтензированной апертурой космического аппарата для их передачи и формирования радиолокационного изображения / Р. П. Богущ, И. Ю. Захарова, В. М. Чертков, Н. М. Наумович // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. 2018. С. 2–8.

15. Филимонов А. Б., Кыонг Ф. Ф. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 4. С. 273–281. doi: 10.17587/mau.17.273-281

16. Mathematical Model of Complex Radio-Location Portrait of Aim with a Final Number of Bright Points / O. M. Shynkaruk, V. A. Kyrylenko, Y. A. Babii, V. V. Polishchuk, A. O. Babaryka, A. I. Chukanov // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. 2020. Iss. 80. P. 23–30. doi: 10.20535/RADAP.2020.80.23-30

17. Rongchun Hu, Zhenming Peng, Juan Ma. A Vehicle Target Recognition Algorithm for Wide-Angle SAR Based on Joint Feature Set Matching // Electronics. 2019. Vol. 8, iss. 11. P. 1252. doi: 10.3390/electronics8111252

18. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / ed. by Y. D. Shirman. Boston: Artech House, 2002. 294 p.

19. Gorshkow S.A. Radar target backscattering simulation: software and user's manual. Boston: Artech House, 2002. 40 p.

## Информация об авторах

**Сунг Ха Во** – магистр по направлению "Радиолокационная системотехника" (Технический университет Ле Куи Дон (LQDTU), Вьетнам, 2007), аспирант в области "Радиолокационная системотехника". Начальник отдела проектирования систем и антенн в Национальном институте науки и технологий. Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – системотехника; радиолокационная обработка данных; контроль и автоматизация.

Адрес: Национальный институт науки и технологий, 17 Hoang Sam Str., Cau Giay, Ханой, Вьетнам  
E-mail: voxungha@amst.edu.vn

**Трунг Киен Нгуен** – кандидат технических наук (2015). Директор Национального института науки и технологий. Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – автоматизация управления и обработка сигналов.

Адрес: Национальный институт науки и технологий, 17 Hoang Sam Str., Cau Giay, Ханой, Вьетнам  
E-mail: nguyentrungkien@amst.edu.vn

**Бао Нгуен Фунг** – кандидат технических наук (1996), приглашенный лектор Института системной интеграции (ИСИ)/ Технический университет им. Ле Куи Дона. Специалист по системотехнике, радиоэлектронной и радиолокационной технологии. Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокационная обработка информации; радиоэлектронная и радиолокационная технология; системотехника.

Адрес: Технический университет им. Ле Куи Дона, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ханой, Вьетнам  
E-mail: baonp@imc.org.vn, nguyenphungbao@lqdtu.edu.vn

**Куанг Хиеу Данг** – кандидат технических наук (2022), старший исследователь Института системной интеграции (ИСИ)/ Технический университет им. Ле Куи Дона. Автор шести научных публикаций. Сфера

научных интересов – радиолокация и радионавигация; телекоммуникации.

Адрес: Технический университет им. Ле Куи Дона, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ханой, Вьетнам

E-mail: hieudq.isi@lqdtu.edu.vn

## References

1. Chukhlomin I. E., Faizulin N. A. Analysis of A Detector With A Digital Adaptive Detection Threshold Against The Background Of Sea Noise. *J. of Radioelectronics*. 2015, no. 2, pp. 1–20. (In Russ.)
2. Dejan Ivković, Milenko Andrić, Bojan Zrnić. Detection of Very Close Targets by Fusion CFAR Detectors. *Scientific Technical Review*. 2016, vol. 66, no. 3, pp. 50–57.
3. Mohamed B. El Mashad. Benefits of a New Strategy for CFAR Processors Compared to the Neyman-Pearson Model in Detecting Fluctuating Targets Described by a Chi-Square Distribution with Four Degrees of Freedom. *Radioelectronics*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 487–507. doi: 10.20535/S0021347018090017
4. Thomas A. *Detection and Estimation Theory and Its Applications*. NJ, Pearson/Prentice Hall, 2006, 653 p.
5. Gorbunova A. A. Development of an Algorithm for Obtaining a Point Portrait of a Complex Target from a Complex Radar Image. *Electronic J. "Proc. of MAI"*. 2011, no. 45. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/1aa/rus.pdf?referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F> (accessed 03.02.2023)
6. Dorosinsky L. G., Trukhin M. P. *Optimal'naya obrabotka radiolokatsionnykh izobrazhenii, formiruemyykh v RSA* [Optimal Processing of Radar Images Generated in SAR]. Moscow, Publ. House of the Academy of Natural Sciences. 2017, 212 p. (In Russ)
7. Dorosinsky L. G., Trukhin, M. P. *Priem i obrabotka signalov ot slozhnykh tselei* [Reception and Processing Of Signals From Complex Targets]. Moscow, Publ. House of the Academy of Natural Sciences. 2018, 264 p. (In Russ.)
8. Mironov O. S., Sazonov D. D. Specific Features of Correlation Reception of Ultrashort Pulses. *Radiopromyshlennost*. 2017, no. 1, pp. 31–36. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-31-36 (In Russ.)
9. Konovalyuk M. A., Kuznetsov Yu. V., Baev A. B. *Identifikatsiya ob'ektov slozhnoi formy v cverkhkorotkoimpul'snoi radiolokatsii* [Identification of Complex Shape Objects in Ultrashort Pulse Radar]. Proc of. III All-Russ. Conf. "Radiolocation and Radio Communication" – IRE RAS. Moscow, Russia, 26–30 October 2009. Moscow, *IRE im. V. A. Kotel'nikova RAN*, 2009, pp. 932–936. (In Russ.)
10. Konovalyuk M., Gorbunova A., Kuznetsov Y., Baev A. The ISAR Image Post-Processing for Multi-Point Target Identification. *Intl J. of Electronics and Telecommunications*. 2011, vol. 57, no. 4, pp. 433–436. doi: 10.2478/v10177-011-0059-y
11. Konovalyuk M., Kuznetsov Y., Baev A. Moving Multy-Scatterer Target Parametric Identification Using Radar Image. 18th Intern. Conf. On Microwaves, Radar and Wireless Communications. Vilnius, Lithuania, 14–16 June 2010. IEEE, 2010, pp. 524–528.
12. Starosotnikov N. O., Fedortsev R. V. Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices. 2018, vol. 17, no. 1, pp. 79–86. doi: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86 (In Russ.)
13. Ai Jiaqiu, Cao Zhenxiang, Ma Yuxiang, Wang Zhanghuai, W. Feifan, Jin Jing. An Improved Bilateral CFAR Ship Detection Algorithm for SAR Image in Complex Environment. *J. of Radars*. 2021, no. 10(4), pp. 499–515. doi: 10.12000/JR20127
14. Bohush R., Zaharova I., Chertkov V., Naumovich N. Spacecraft SAR Data Processing Algorithms Modeling for Transmitting and Radar Image Formation. *Bulletin of Polotsk State University. Series C*. 2018, pp. 2–8.
15. Filimonov A. B., Pham Phuong Cuong. Methods for Formation of the Information Signatures of the Radar Range Profiles of the Aerial Targets. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2016, vol. 17, no. 4, pp. 273–281. doi: 10.17587/mau.17.273-281 (In Russ.)
16. Shynkaruk O. M., Kyrylenko V. A., Babii Y. A., Polishchuk V. V., Babaryka A. O., Chukanov A. I. Mathematical Model of Complex Radio-Location Portrait of Aim with a Final Number of Bright Points. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*. 2020, iss. 80, pp. 23–30. doi: 10.20535/RADAP.2020.80.23-30
17. Rongchun Hu, Zhenming Peng, Juan Ma. A Vehicle Target Recognition Algorithm for Wide-Angle SAR Based on Joint Feature Set Matching. *Electronics*. 2019, vol. 8, iss. 11, pp. 1252. doi: 10.3390/electronics8111252
18. *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking*. Ed. by Y. D. Shirman. Boston, Artech House, 2002, 294 p.
19. Gorshkow S. A. *Radar Target Backscattering Simulation: Software and User's Manual*. Boston, Artech House, 2002, 40 p.

## Information about the authors

**Vo Xung Ha**, Master's degree in "Radar System Engineering" (Le Quy Don Technical University (LQDTU), Vietnam, 2007), PhD student in "Radar Systems Engineering". Head of System and Antenna Design/National Institute of Science and Technology. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: system engineering; radar data processing; control and automation.



Address: National Institute of Science and Technology, 17 Hoang Sam Str., Cau Giay, Hanoi, Vietnam

E-mail: voxungha@amst.edu.vn

**Nguyen Trung Kien**, PhD (1996). Director of the National Institute of Science and Technology. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: control automation and signal processing.

Address: National Institute of Science and Technology, 17 Hoang Sam Str., Cau Giay, Hanoi, Vietnam

E-mail: nguyentruangkien@amst.edu.vn

**Nguyen Phung Bao**, PhD (1996). Visiting Lecturer of the Institute of System Integration/TU Le Quy Don; Specialist in system engineering; radio-electronic and radar technology. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: radar processing of information; radioelectronic and radar technology; system engineering.

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: baonp@imc.org.vn, nguyephungbao@lqdtu.edu.vn

**Dang Quang Hieu**, PhD (2022), senior researcher of the Institute of System Integration/TU Le Quy Don. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: radar and radio navigation; telecommunications.

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

E-mail: hieudq.isi@lqdtu.edu.vn

---