

2. Zubov I. E., Mikrin E. A., Oleinik A. S., Ryabchenko V. N. *Algoritmy sinteza lineinykh nabljudatelei dlja nelineinykh dinamicheskikh system* (Algorithms for the Synthesis of Observers for Nonlinear Dynamical Systems), *Journal of Computer and System Sciences International*, 2014, Vol. 53, No. 5, pp. 623–635.

3. Akulenko L. D., Krylov S. S., Markov Yu. G., Win T. T., Filippova A. S. *Dinamika kosmicheskogo apparata s uprugimi i dissipativnymi elementami v regime orientacii* (Dynamics of Spacecraft with Elastic and Dissipative Elements in the Attitude Control Mode), *Journal of Computer and System Sciences International*, 2014, Vol. 53, No. 5, pp. 723–732.

4. available at: [http://www.tsenki.com/production\\_technologies/hiroscopic/control\\_systems/gyroscopic/angular\\_velocity\\_meters/](http://www.tsenki.com/production_technologies/hiroscopic/control_systems/gyroscopic/angular_velocity_meters/)

5. available at: <http://geofizika-cosmos.ru/napravleniya-deyatelnosti/optiko-elektronnye-pribory-orientacii-i-navigacii-kosmicheskikh-apparatov/test-3.html>

6. Kozlov R. I. *Primenenie vektor-funkcii Ljapunova dlja issledovaniya tochnosti giroskopicheskoi stabilizacii kosmicheskogo apparata* (Application of vector Lyapunov functions to investigation of accuracy of gyroscopic stabilization of a spacecraft), *Direct method in the theory of stability and its application*, V. M. Matrosov, L. Yu. Anapol'sky Ed., Novosibirsk, Nauka, 1981, pp. 179–195 (in Russian).

7. Kozlov R. I., Banskchikov A. V., Ul'yanov S. A., Khmel'nov A. E. *Programmyj modu V dlja kachestvennogo issledovaniya nepreryvno-dis-*

*kretnykh dinamicheskikh sistem VFL-REDUKTOR-ND* (Software for qualitative analysis of discrete-continuous dynamical systems VLF-Reductor-DC), *Certificate of Official Registration of Computer Program* no. 2007613833, 07.09.2007 (in Russian).

8. Abdullin R. Z., Anapolsky L. Yu., Voronov A. A., Zemljakov A. S., Kozlov R. I., Malikov A. I., Matrosov V. M. *Metod vektornykh funkciij Ljapunova v teorii ustojchivosti* (Vector Lyapunov functions method in stability theory), Moscow, Nauka, 1987, 312 p. (in Russian).

9. Matrosov V. M., Kozlov R. I., Matrosova N. I. *Teorija ustojchivosti mnogokomponentnykh nelinejnykh system* (Theory of stability of multicomponent nonlinear systems), Moscow, Fizmatlit, 2007, 184 p. (in Russian).

10. available at: [http://www.iki.rssi.ru/oyo/page\\_navig.html](http://www.iki.rssi.ru/oyo/page_navig.html) (in Russian).

11. Avanesov G. A., Krasikov V. A., Nikitin A. V., Sazonov V. V. *Ocenka tochnosti opredeleniya parametrov orientacii osej sistemy koordinat astroizmeritel'nogo pribora BOKZ-M po jeksperimental'nykh dannym* (Accuracy estimation of determining attitude of coordinate systems of the star sensor BOKZ-M by experimental data), available at <http://library.keldysh.ru/prepnnt.asp?id=2010-74> (in Russian).

12. Zubov V. I. *Problema ustojchivosti processov upravleniya* (Stability problem for control processes), Leningrad, Sudostroenie, 1980, 256 p. (in Russian).

УДК 004.9:621.396.96

DOI: 10.17587/mau.17.273-281

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., [filimon\\_ab@mail.ru](mailto:filimon_ab@mail.ru),  
Фам Фыонг Кыонг, стажер, [cuongbkedu@yahoo.com](mailto:cuongbkedu@yahoo.com),  
МГТУ МИРЭА

## Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей

Обсуждается проблема автоматического распознавания воздушных целей на основе анализа их радиолокационных дальностных портретов. Рассматриваются и решаются вопросы конструирования информативных признаков в системах распознавания, представляющих морфологические, геометрические и вейвлетные характеристики дальностных портретов.

**Ключевые слова:** распознавание воздушных целей, радиолокационные дальностные портреты, формирование информативных признаков, морфологические, геометрические и вейвлетные признаки

Радиолокация решает задачи радиолокационного наблюдения — обнаружение объектов (целей) и определение их местоположения и параметров движения в пространстве с помощью радиотехнических средств и методов [1, 2]. Устройствами такого назначения являются радиолокационные станции (РЛС). В области активной радиолокации с пассивным ответом объект облучается радиоволнами, посылаемыми РЛС, в результате чего возникают отраженные от него сигналы. Завершающим этапом радиолокационного наблюдения является распознавание целей. Оно осуществляется на основе анализа характеристик эхо-сигналов при их обработке в РЛС.

Одно из актуальных направлений в теории и практике автоматического распознавания протяженных воздушных целей связано с анализом их радиолокационных дальностных портретов (ДП), называемых в англоязычной литературе "range profile". Современное состояние данной области исследований представляют работы [3–15].

Процедура радиолокационного распознавания включает последовательное решение двух задач. Первая задача состоит в формировании классификационных признаков по данным радиолокационного наблюдения, позволяющих отличать радиолокационные объекты друг от друга. Вторая задача — идентификация объектов наблюдения по совокупности полученных признаков.

Надежность распознавания в значительной мере зависит от выбора системы классификационных признаков объектов наблюдения. В настоящей статье исследуются вопросы конструирования морфологических, геометрических и вейвлетных характеристик ДП воздушных целей для решения задач радиолокационного распознавания.

В выполненных исследованиях использовалась программа моделирования ДП воздушных целей "Backscattering simulation", разработанная Я. Д. Ширманом и его сотрудниками [16].

## Радиолокационные дальностные портреты воздушных целей

Воздушные цели (ВЦ) могут иметь различную физическую природу, к примеру это могут быть самолеты, ракеты, метеозонды, облака, дождь, турбулентности атмосферы и т.п.

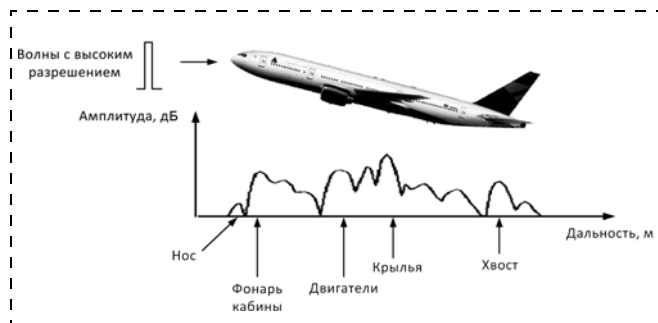


Рис. 1. Дальностный портрет ЛА

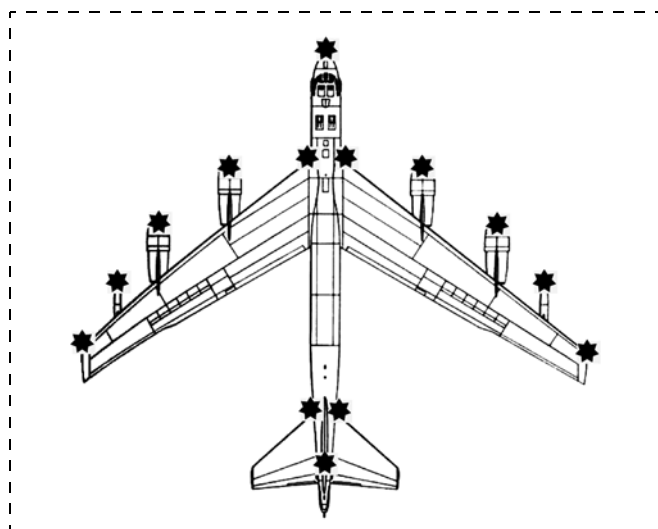


Рис. 2. Основные точки рассеивания самолета В-52

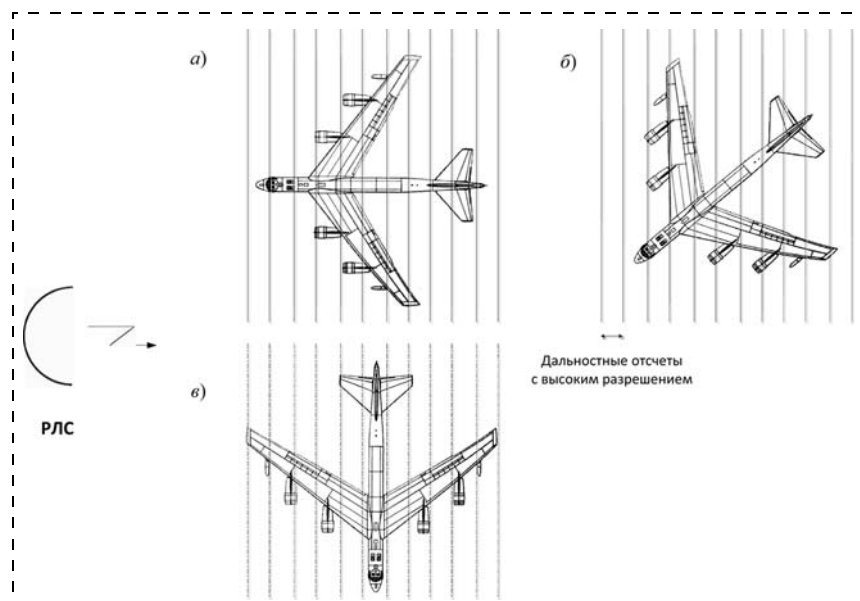


Рис. 3. Влияние частей самолета на дальностные отсчеты при изменении курсового угла

При распознавании ВЦ в активной РЛС используются характеристики создаваемого целями поля вторичного излучения в дальней зоне РЛС. Эти характеристики, как правило, зависят от ориентации цели, параметров ее движения, размеров, типов установленных на ней двигателей и режимов их работы, параметров вибраций корпуса, а также от характеристик зондирующих сигналов, способа обработки принимаемых сигналов и т. д. [17, 4].

РЛС с высокой разрешающей способностью и точностью по дальности позволяет воспроизвести *профиль цели по дальности*.

*Дальностный портрет* (дальностный профиль) является одномерной характеристикой радиолокационных целей. Это отклик объекта наблюдения при облучении широкополосным импульсом во временной области. Рис. 1 иллюстрирует принцип формирования радиолокационного дальностного портрета летательного аппарата (ЛА) [15].

На каждом дальностном отсчете амплитуда полученного сигнала представляет мощность отраженного сигнала. На рис. 1 показаны основные части самолета, которые создают ДП.

Отметим, что видимая длина объектов на ДП может отличаться от его физической длины из-за двух эффектов. Сигнал, отражающийся в сторону РЛС, может далее подвергаться отражению от других рассеивателей цели, вследствие чего повышается временная задержка, которая и появляется в структуре ДП. Второй эффект обусловлен сокрытием одних частей самолета другими: некоторая часть самолета может быть скрыта его большей частью, которая находится между первой и РЛС. В итоге уменьшается энергия радиоволн, которые дойдут до цели и будут отражены обратно к РЛС. Например, фюзеляж или крылья самолета могут скрывать его хвост.

## Особенности рассеяния радиоволн воздушными целями

Радиолокационные цели могут рассматриваться как множество точечных *отражателей* (рассеивателей) радиоволн [18], таких как поверхности, края, углы (двугранные углы), трехгранники, впадины и пр. Характеристика каждого отдельного рассеивателя может быть представлена в виде полярной диаграммы, представляющей зависимость отраженной амплитуды от азимута и угла возвышения. Соответственно этому ДП цели может быть разложен на *элементарные рассеяния*, т. е. приближенно составлен как суперпозиция отражений радиоволн от элементарных рассеивателей, каждый из которых соответствует некоторой одной детали цели. Согласно [15] самолеты могут насчитывать до 30 таких рас-

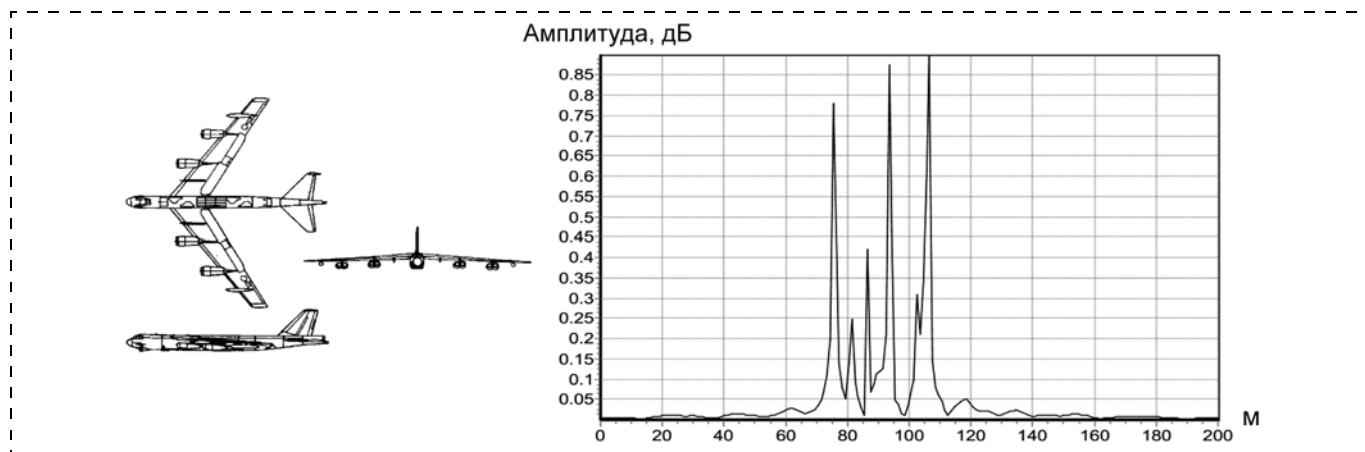


Рис. 4. Дальностный портрет самолета В-52

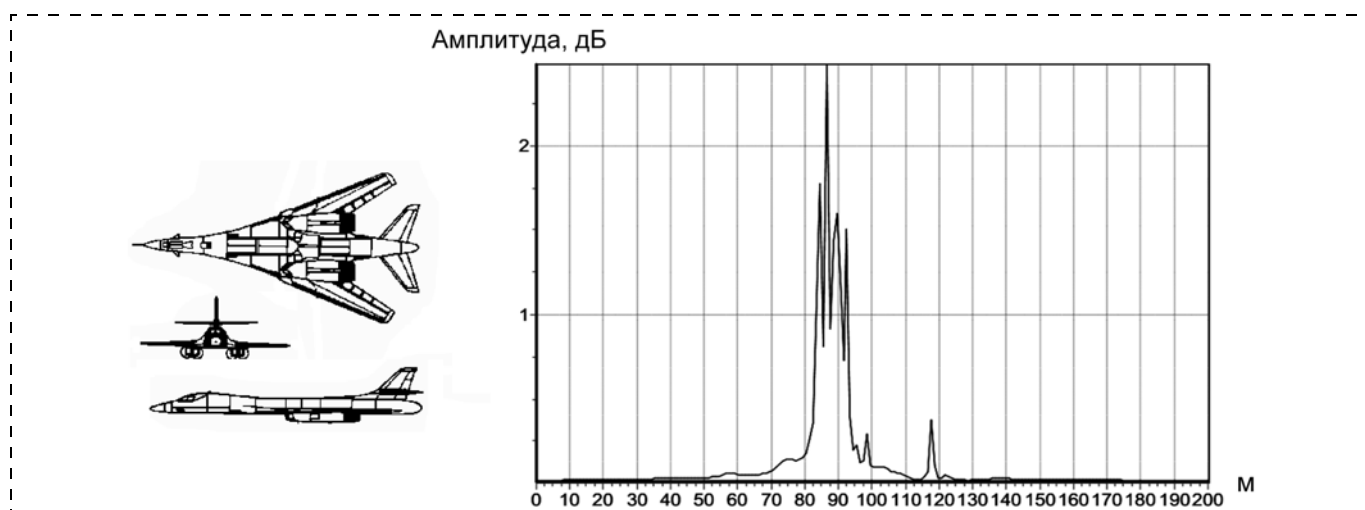


Рис. 5. Дальностный портрет самолета В-1В

сеивателей. К примеру, для бомбардировщика В-52, представленного на рис. 2, в качестве основных рассеивателей выделены нос, двигатели, несущая, корневая и рулевая части крыла, а также пилоны на крыльях.

Таким образом, эффект отражения радиоволн от ВЦ в сторону РЛС зависит от *курсового угла* (КУ) — угла в плоскости истинного горизонта наблюдателя между продольной осью ЛА и направлением на наблюдателя. Этот эффект демонстрирует рис. 3. На рис. 3, а дальностные отсчеты при данном КУ распределены вдоль оси симметрии фюзеляжа. Вследствие этого можно предусмотреть, какие части самолета соответствуют каждому дальностному отсчету. Напротив, при КУ, отвечающем рис. 3, б, в дальностные отсчеты, обусловленные отдельными частями фюзеляжа, также вносят свой вклад соответствующие части крыльев.

Итак, ДП определяется уникальным набором вкладов в него разных частей ВЦ, зависящих от курсового угла. При изменении КУ получаются разные ДП и изменяется степень сходства (корреляции) между дальностными профилями различных ВЦ.

На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены ДП бомбардировщиков В-52 и В-1В Lancer для КУ = 20°.

### Схема распознавания воздушных целей

Процедура распознавания ВЦ на основе анализа их дальностных портретов предполагает решение двух подзадач:

- 1) формирование комплекса информативных признаков ВЦ по ее ДП;
- 2) классификацию ВЦ на основе полученных информативных признаков.

Введем обозначения:

- $\Omega$  — множество наблюдаемых ВЦ;
- $\omega \in \Omega$  — объекты наблюдения;
- $AC$  — алфавит классов ВЦ:

$$AC = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m\};$$

- $\Theta$  — алфавит меток (имен) классов ВЦ:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\};$$

- $\theta_i \in \Theta$  ( $i = 1: m$ ) — метки классов;
- $\Pi$  — множество дальностных портретов ВЦ;
- $\pi \in \Pi$  — дальностные портреты;
- $X$  — признаковое пространство ВЦ.

Пространство  $X$  определяется выбором *информативных признаков*  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . При этом объекты наблюдения представляются кортежем

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Каждая ВЦ относится к некоторому классу и, следовательно, ей априори соответствует определенная метка класса  $\theta \in \Theta$ :

$$\omega \rightarrow \theta.$$

Этапы распознавания ВЦ иллюстрирует схема на рис. 6.



Рис. 6. Схема распознавания воздушных целей

Алгоритм классификации осуществляет функциональное преобразование

$$\mathbf{x} \rightarrow \hat{\theta},$$

т. е. для каждого входного образа  $\mathbf{x} \in X$  вычисляет соответствующую метку класса  $\hat{\theta} \in \Theta$ , которая и присваивается наблюдаемой ВЦ.

В случае правильной классификации

$$\hat{\theta} = \theta.$$

Надежность процедуры распознавания в значительной мере зависит от выбора системы информативных признаков. В настоящей работе для идентификации ДП ВЦ предлагается применять следующие группы признаков:

- морфологические;
- геометрические;
- вейвлетные.

Далее ДП будем обозначать через  $\pi$  и рассматривать как одномерные функции пространственной координаты

$$A = \pi(\xi),$$

где  $\xi$  — дальности отсчетов ВЦ (м);  $A$  — амплитуда отклика (дБ).

### Морфологические информативные признаки

Под морфологическими признаками понимаются признаки, которые описывают структуру ДП.

Отметим важную особенность ДП ЛА — они имеют импульсные составляющие различной амплитуды, обусловленные действием элементарных рассеивателей, что наглядно иллюстрируется сигналами, представленными на рис. 4 и 5. Под *пиком* импульсного сигнала понимается вершина импульса. Амплитуда пика — это его максимальное значение.

Посредством морфологических признаков описывается структура пиков в составе ДП.

Самым простым морфологическим признаком ДП является число пиков  $m$  в его структуре. Следует учитывать лишь *доминирующие пики*, которые значительно превышают по амплитуде шум и помехи. Наибольший из пиков — главный.

Дальнейшая характеристика ДП основана на ранжировании составляющих его пиков по амплитуде. Для анализа ДП неприемлемо прямое применение амплитудных значений пиков в силу их зависимости от ряда не учитываемых возмущающих и искажающих факторов в принимаемом эхосигнале. Набор применяемых информативных признаков должен быть инвариантным по отношению к действию данных факторов. Поэтому предлагается вместо амплитудных значений пиков применять их *ранги*. Таким образом, речь идет о структурной идентификации ДП посредством использования ранговых шкал.

Ранговые шкалы [19] относят к классу так называемых качественных шкал. В их основе лежат понятия вариационного ряда и ранжирования данных.

Поясним способ формирования классификационных признаков рангового типа. Положим, в ДП выделены  $m$  пиков с амплитудами  $A_i$  ( $i \in 1:m$ ). Считаем, что они превышают заданный порог чувствительности, который, скажем, принимается равным 10 % от амплитудного максимума ДП. Процедура ранжирования пиков заключается в следующем. Сначала из величин  $A_i$  составляется вариационный ряд в порядке убывания. Затем элементы ряда нумеруются от 1 до  $m$ . Наконец, порядковый номер каждого элемента в вариационном ряду определяет его ранг:

$$R_i = \text{rank}(A_i).$$

В итоге получаем наборы рангов пиков

$$R = (R_1, R_2, \dots, R_m).$$

Так для ДП, представленного на рис. 4,  $m = 5$ ,  $R = (3, 5, 4, 2, 1)$ .

### Геометрические информативные признаки

Геометрические признаки представляют глубину и моментные характеристики ДП  $\pi(\xi)$ .

Определим *глубину* ДП  $D$  как расстояние между крайними отсчетами в отраженном радиосигнале. Данные отсчеты необходимо выделять на фоне помех.

*Моментные характеристики* ДП определяются следующим образом:

а) момент нулевого порядка:

$$M_0 = \int_0^D \pi(\xi) d\xi;$$

б) момент первого порядка:

$$M_1 = \int_0^D \xi \pi(\xi) d\xi;$$

в) положение центра тяжести ДП:

$$\xi_0 = M_1/M_0;$$

г) центральный момент  $p$ -го порядка ( $p \geq 2$ ):

$$m_p = \int_0^D (\xi - \xi_0)^p \pi(\xi) d\xi.$$

Определенные выгоды при анализе ДП могут давать безразмерные величины, построенные по данным показателям. В частности, сюда относятся д) относительное положение центра тяжести ДП:

$$\xi'_0 = \xi_0/D;$$

е) центральные нормированные моменты:

$$\mu_p = m_p/M_0.$$

Последние инвариантны к мощности принимаемого сигнала.

К примеру, для ДП самолета В-52, представленного на рис. 4,  $\xi'_0 = 0,57$ ,  $\mu_p = 7,18$ .

### Вейвлетные информативные признаки

Вейвлет-анализ является мощной альтернативой анализу Фурье и дает более гибкую технику обработки сигналов [20, 21].

Одна из главных и особенно плодотворных идей вейвлетного представления сигналов заключается в их многоуровневой декомпозиции на две группы функций на каждом уровне: *аппроксимирующие* и *детализирующие*. Первые дают грубое описание сигналов, выделяя в них части с достаточно медленной динамикой, а вторые описывают составляющие с локальной и быстрой динамикой с последующим их дроблением и детализацией на последующих уровнях декомпозиции сигналов.

В основе непрерывного вейвлет-преобразования (ВП) лежит использование двух функций: масштабирующей (скейлинг-функции)  $\varphi(t)$  и материнского вейвлета  $\psi(t)$ . Первая отвечает условию

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1$$

и позволяет получать грубое приближение (аппроксимацию) сигнала. Вторая имеет нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0,$$

и определяет детали сигнала.

ВП одномерного сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

образуемых из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(t)$  посредством операций сдвига по аргументу ( $b$ ) и изменения *масштаба* ( $a$ ). Заметим, что нормы вейвлетов  $\psi_{ab}(t)$  равны норме  $\psi(t)$ , что обеспечивает нормировочный множитель  $|a|^{-1/2}$ .

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $f(t) \in L_2(\mathbf{R})$  по смыслу соответствует преобразованию Фурье с заменой гармонического базиса  $\exp(-j\omega t)$  на вейвлетный  $\psi_{ab}(t)$ :

$$w(a, b) = \langle f, \psi_{ab} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{ab}(t) dt.$$

Вейвлет-спектрограммы гораздо информативнее обычных Фурье-спектрограмм. Выбор анализирующего вейвлета определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала.

В общем случае вейвлет-преобразование на основе вейвлет-функции  $\psi(t)$  способно восстановить (реконструировать) по крайней мере тонкие детали сигнала. Однако для восстановления полной формы исходного сигнала  $f(t)$  приходится также прибегать к скейлинг-функции  $\varphi(t)$ , называемой также отцовским вейвлетом. Данная ситуация возникает не всегда, а, как правило, в случае применения ортогональных вейвлетов.

Эффективность вейвлет-анализа определяется выбором базисного вейвлета. В качестве примера рассмотрим результаты вейвлет-преобразования ДП бомбардировщика В-1В для трех вейвлетов: Морле, Добеши и "мексиканская шляпа". Графики данных вейвлетов приведены на рис. 7, а—в.

Рис. 8—10 иллюстрирует результаты вейвлет-анализа ДП самолета В-1В (см. рис. 5) для данных типов вейвлетов. Приведены графики вейвлет-ко-

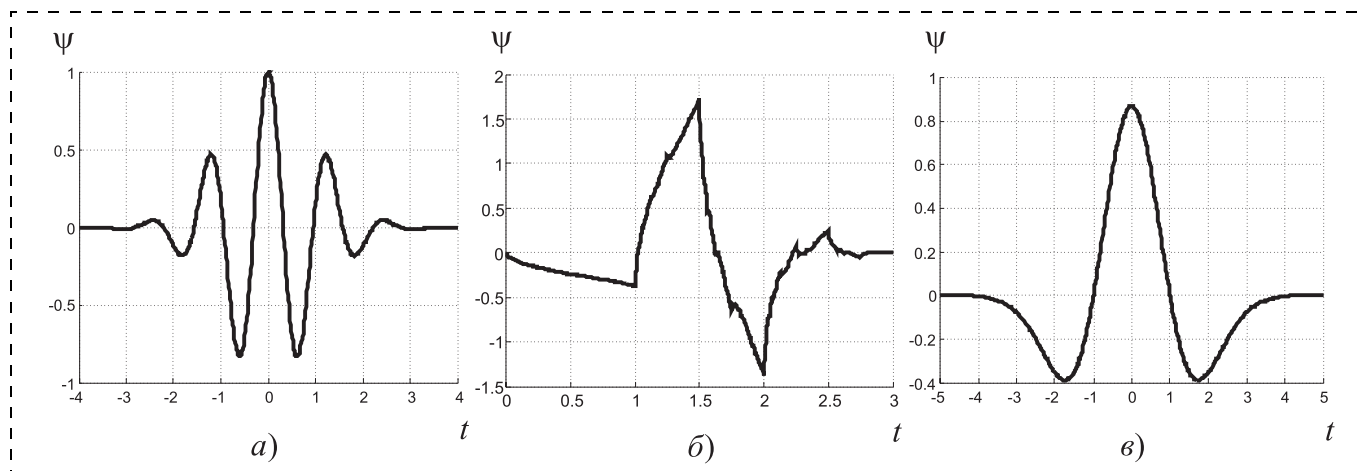


Рис. 7. Вейвлеты: а — Морле; б — Добеши; в — "мексиканская шляпа"

эффицентов  $w(a, b)$  как функций параметра сдвига  $b$  для разных параметров масштаба:  $a = 1, 4, 8, 16$ .  
Наличие широкого набора вейвлет-функций позволяет ставить вопрос о наилучшем выборе базисного вейвлета. Его решение предлагается основывать на анализе матрицы Грама, построен-

ной из вейвлет-коэффициентов ДП классифицируемых ВЦ.  
Пусть задана система функций, определенных и интегрируемых с квадратом по Лебегу на отрезке  $[a, b] \subset \mathbf{R}$ :  
$$\Phi = \{\varphi_i(x), i = 1:n\} \subset L_2[a, b].$$

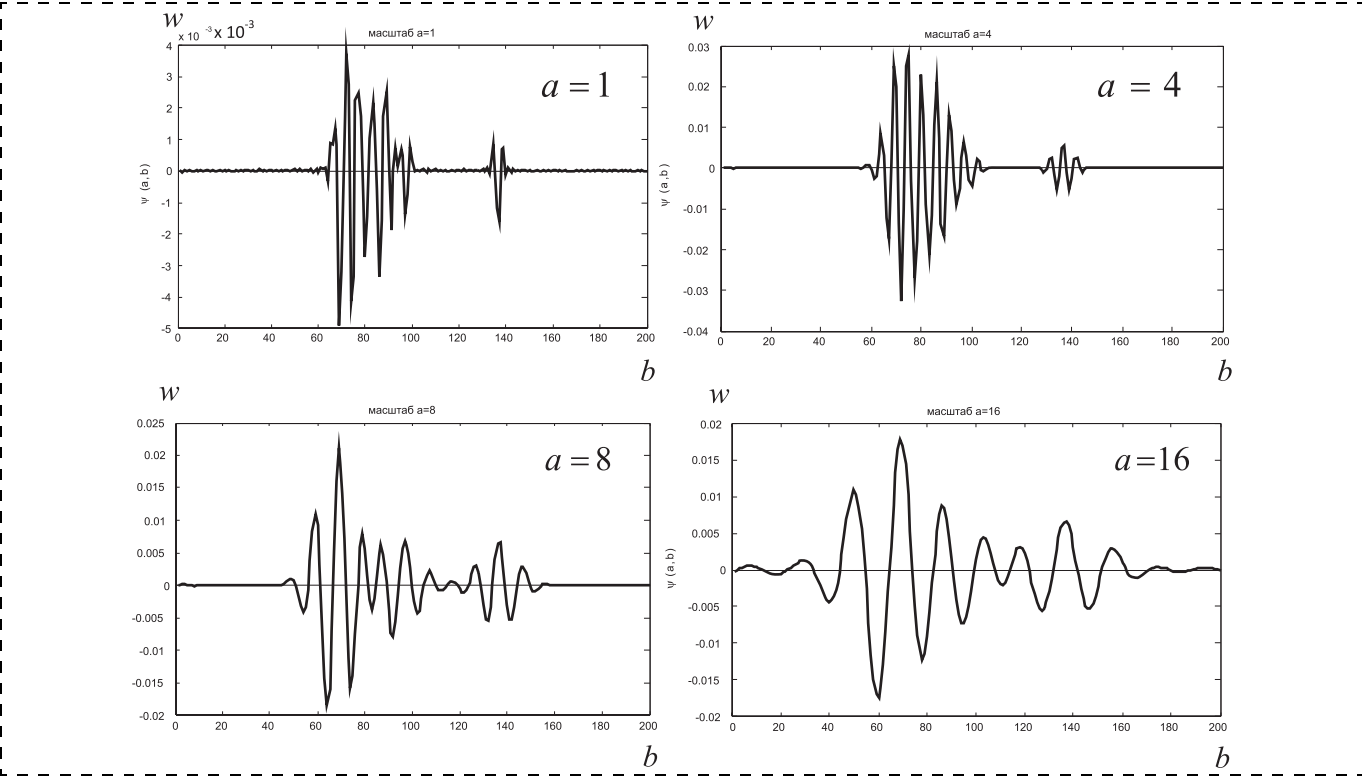


Рис. 8. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет Морле

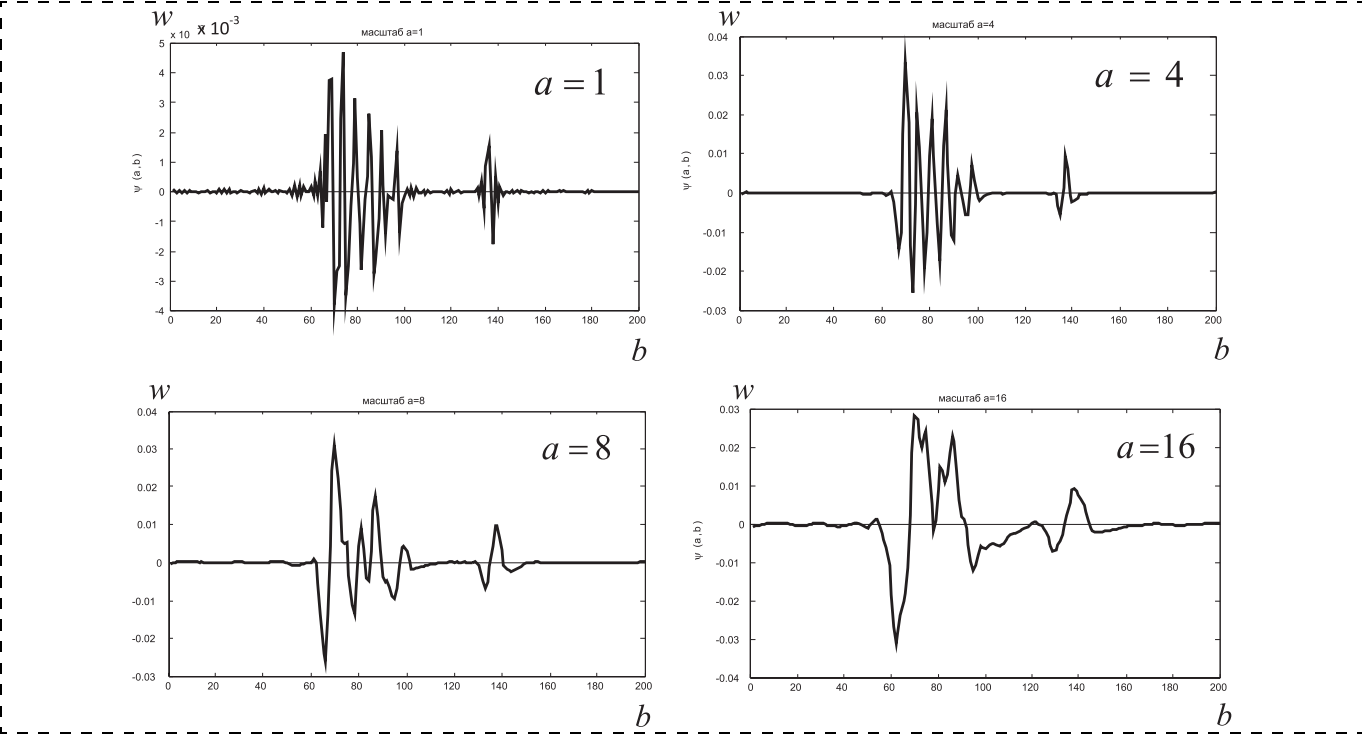


Рис. 9. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет Добеши

Соответствующая ей матрица Грама [22] определяется равенством:

$$\Gamma(\Phi) = \begin{bmatrix} \langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_1, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_1, \varphi_n \rangle \\ \langle \varphi_2, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_2, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_2, \varphi_n \rangle \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \langle \varphi_n, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_n, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_n, \varphi_n \rangle \end{bmatrix}.$$

Согласно теореме Грама данная система функций является линейно зависимой, если определитель Грама равен нулю:

$$\det \Gamma(\Phi) = 0.$$

Определитель Грама позволяет выявлять факт линейной зависимости построенной системы функций. Однако для нас представляет интерес возможность оценки качества выбранного базиса  $\Phi$ , которая определяется близостью матрицы Грама к вырожденности.

Как известно, необходимую оценку близости некоторой числовой квадратной матрицы  $A$  к вырожденности дает ее число обусловленности [23]:

$$\text{cond}(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|.$$

Здесь двойные прямые скобки  $\|\dots\|$  обозначают норму матрицы.

Если число обусловленности матрицы  $A$  мало, то она называется *хорошо обусловленной*. Если же число обусловленности велико:

$$\text{cond}(A) \gg 1,$$

то матрица называется *плохо обусловленной*.

Например, условия плохой и хорошей обусловленности матрицы могут иметь следующий вид:

$$\text{cond}(A) \geq 10^3, \text{cond}(A) \leq 100.$$

Суть предлагаемого подхода к выбору вейвлет-ного базиса заключается в следующем. Считаем, что имеется  $P$  различных типов ДП. Пусть выбран базисный вейвлет  $\psi(t)$ , а также задан параметр масштаба  $a$ . Далее, вычисляем вейвлет-коэффициенты  $w_i(a, b)$  ( $i = 1:P$ ) для всех типов ДП и затем выполняем их нормирование. В итоге получаем систему функций

$$W(a) = \{w_1(a, b), w_2(a, b), \dots, w_P(a, b)\},$$

которые служат крупномасштабными *эталоны* распознаваемых ВЦ. Для оценки информативности данной системы функции предлагается использовать матрицы Грама.

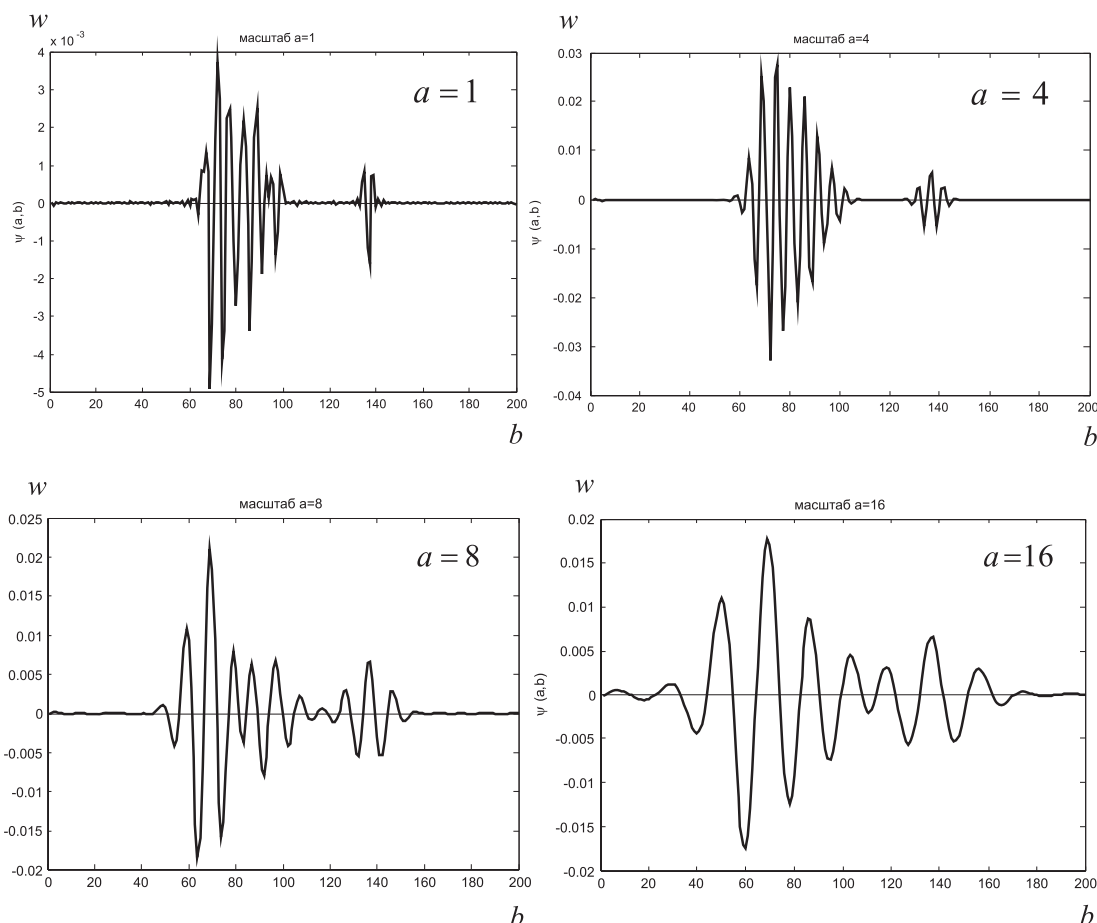


Рис. 10. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет "мексиканская шляпа"

Сопоставим построенной системе функций матрицу Грама  $\Gamma(W(a))$  и вычислим ее число обусловленности

$$\mu(a, \psi) = \text{cond}(\Gamma(W(a))). \quad (2)$$

Рассчитывая данный показатель для различных вейвлетов и разных параметров масштаба  $a$ , выбираем те вейвлеты, для которых данный показатель является *наименьшим*.

Приведем расчеты показателя (2) с параметром масштаба  $a = 10$  для трех типов базовых вейвлетов:

- 1) вейвлет Морле:  $\mu \cong 588$ ;
- 2) вейвлет Добеши-2:  $\mu \cong 15$ ;
- 3) вейвлет "мексиканская шляпа":  $\mu \cong 36\,799$ .

В качестве вейвлетных признаков ДП  $\pi(\xi)$  предлагается использовать следующие величины:

$$c(a) = \frac{\langle \pi, w_a \rangle}{\|\pi\| \cdot \|w_a\|}, \quad (3)$$

$$\text{где } \langle \pi, w_a \rangle = \int_0^D \pi(\xi) w(a, \xi) d\xi,$$

$$\|\pi\| = \sqrt{\int_0^D \pi^2(\xi) d\xi}, \quad \|w_a\| = \sqrt{\int_0^D w^2(a, \xi) d\xi},$$

вычисленные для ряда выбранных значений  $a$ .

Величина (3), очевидно, равна скалярному произведению двух функций: нормированного ДП  $\pi(\xi)/\|\pi\|$  и нормированного вейвлет-коэффициента этого ДП  $w(a, \xi)/\|w_a\|$ . Отметим, что построенные вейвлетные характеристики  $c(a)$ , отвечающие различным значениям масштаба  $a$ , аналогичны амплитудам отдельных гармоник в разложении сигналов в ряд Фурье.

Выполненные исследования показывают, что использование морфологических, геометрических и вейвлетных характеристик ДП в качестве информативных признаков позволяют успешно выполнять распознавание ВЦ.

В общем случае кортеж (1) всех информативных признаков ВЦ включает все три типа характеристик ДП:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3),$$

где  $\mathbf{x}_1$  — кортеж морфологических признаков;  $\mathbf{x}_2$  — кортеж геометрических признаков;  $\mathbf{x}_3$  — кортеж вейвлетных признаков.

Отметим, что избыточная входная информация об объектах наблюдения может существенно усложнять алгоритмы их классификации. В связи с этим несомненный научный интерес представляют вопросы оптимального комплексирования информативных признаков рассмотренного типа для ин-

женерного проектирования систем автоматического распознавания ВЦ.

#### Список литературы

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Советское радио, 1975. 336 с.
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
3. Лещенко С. П. Информативность и достоверность радиолокационного распознавания воздушных целей по дальностным портретам // Збірник наукових праць ХВУ. 2001. Вип. 7 (37). С. 63—72.
4. Лещенко С. П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей // Прикладная радиоэлектроника. 2009. Т. 8, № 4. С. 490—496.
5. Тоцкий А. В., Молчанов П. А., Поспелов Б. Б. Распознавание летательных аппаратов по радиолокационным дальностным профилям // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 5 (72). С. 77—82.
6. Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Братченко Г. Д., Орленко В. М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 11. С. 3—63.
7. Smith C. R., Goggans P. M. Radar target identification // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1993. Vol. 35, N. 2. P. 27—37.
8. Li H. J., Yang S. H. Using range profiles as feature vectors for identify aerospace objects // IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1993. Vol. 41, N. 3. P. 261—268.
9. Zyweck A., Bogner R. E. Radar target classification of commercial aircraft // IEEE Trans. Antennas Propagation. 1996. Vol. 32, N. 2. P. 598—606.
10. Jacobs S. P. et al. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range profiles // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, N. 2. P. 364—381.
11. Zhoum D., Liu G., Wang J. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar // Pattern Recognition. 2000. Vol. 33, N. 1. P. 1—7.
12. Xian-Da Zhang, Yu Shi, Zheng Bao. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition // IEEE Trans. Signal Processing. 2001. Vol. 49, N. 9. P. 1875—1885.
13. Nelson D. E., Starzyk J. A., Ensley D. D. Iterated wavelet transformation and signal discrimination for HRR radar target recognition // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 2003. Vol. 33, N. 1. P. 52—57.
14. Lan Du, Hongway Liu, Zheng Bao, Mengdao Xing. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra // IEEE Trans. Signal Processing. 2005. Vol. 53, No. 7. — P. 2359—2368.
15. Tait P. Introduction to radar target recognition. London: Institution of Electrical Engineers, 2005. IET radar series no. 18. 396 p.
16. Небабин В. Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
17. August W. R., Stephen J. H. Theory and practice of radar target identification, Artech House, 2000. 738 p.
18. Shirman Y. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Y., Sukharevskiy O. I. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Y. D. Shirman editor. Boston—London: Artech house, 2002. 294 p.
19. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982. 198 с.
20. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
21. Соломенцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
22. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. 636 с.
23. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.



# Methods for Formation of the Information Signatures of the Radar Range Profiles of the Aerial Targets

A. B. Filimonov, filimon\_ab@mail.ru✉, Pham Phuong Cuong, cuongbkedu@yahoo.com, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Aleksandr B.**, D. Sc., Professor, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: filimon\_ab@mail.ru

Received on December, 19, 2015

Accepted on December 27, 2015

Development of the theory and practice of the automatic radar object recognition is based on the latest computer technologies, system analysis and processing. One of the modern trends in the field of the aerial targets recognition is related to the analysis of the radar range profiles (RP). The authors discuss the idea of presentation of the radar aerial targets as a set of scatter points of the radio waves, which depends on its structural features, as it is shown in presentation of RP as a superposition of the elementary scatters. The procedure of the radar object recognition includes two sequential tasks. The first task is to build the classification signatures of the objects using the radar data, which allows us to distinguish the objects, one from another. The second task is identification of the observed objects by gathering of the obtained signatures. The reliability of the recognition depends mainly on the choice of the classification signatures. The article shows that a solution for recognition of the aerial targets can be based on the analysis of the morphological, geometrical and wavelet characteristics of the range profiles. The methods for formation of the corresponding information features are discussed in this article. Construction of the morphological signatures is based on the analysis of the impulse components in the RP structure: the composition and the results, ranking by the amplitude. The geometrical information signatures of RP include such indicators as its depth, center of gravity and moments of the zero, first and higher orders. A possibility of application of a continuous wavelet transformation is presented in the analysis of the range profile features. The wavelet analysis allows us to detect the local features of the signals. It is a powerful alternative to Fourier analysis, and it ensures a more flexible technique for processing of the signals. The effectiveness of the wavelet analysis depends substantially on the selection of the basic wavelet. The article raises the question of the best choice of the basic wavelet. The solution is proposed upon the analysis of the Gram matrix characteristics, which are constructed from the wavelet coefficients of the aerial target RP. In the implemented studies, all the necessary empirical data of the RRP aircraft were obtained by using Backscattering Simulation, simulation programs of the RP aerial targets, developed by Y. D. Shirman and his staff.

**Keywords:** radar observation, aerial target recognition, radar range profiles, information signature formation, morphological, geometrical and wavelet signatures.

For citation:

**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

## References

1. Belocerkovskij G. B. *Osnovy radiolokacii i radiolokacionnye ustroystva* (Radar basics and radar devices), Moscow, Sovetskoe radio, 1975, 336 p. (in Russian).
2. Bakulev P. A. *Radiolokacionnye sistemy* (Radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2007, 376 p. (in Russian).
3. Leshchenko S. P. *Informativnost' i dostovernosť radiolokacionnogo raspoznavaniya vozdušnyh celej po dal'nostnym portretam* (Information capability and reliability of aerial target radar recognition), *Zbirnik Naukovih Prac' HVU*, 2001, Iss. 7 (37), pp. 63–72 (in Ukrainian).
4. Leshchenko S. P. *Razvitie teorii i tekhniki radiolokacionnogo raspoznavaniya vozdušnyh celej* (Development of the theory and technology of aerial target radar recognition), *Prikladnaya Radioelektronika*, 2009, vol. 8, no. 4, pp. 490–496 (in Russian).
5. Tockij A. V., Molchanov P. A., Pospelov B. B. *Raspoznavanie letatel'nyh apparatov po radiolokacionnym dal'nostnym profilam* (Aircraft recognition using radar range profiles), *Aviacionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 2010, no. 5 (72), pp. 77–82 (in Russian).
6. Shirman Ya. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. *Metody radiolokacionnogo raspoznavaniya i ih modelirovanie* (Methods of radar recognition and simulation), *Zarubezhnaya Radioelektronika*, 1996, no. 11, pp. 3–63 (in Russian).
7. Smith C. R., Goggans P. M. Radar target identification, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1993, vol. 35, no. 2, pp. 27–37.
8. Li H. J., Yang S. H. Using range profiles as feature vectors for identify aerospace objects, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1993, vol. 41, no. 3, pp. 261–268.
9. Zyweck A., Bogner R. E. Radar target classification of commercial aircraft, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 598–606.
10. Jacobs S. P., O'Sullivan A. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range profiles, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 364–381.
11. Zhoum D., Liu G., Wang J. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar, *Pattern Recognition*, 2000, vol. 33, no. 1, pp. 1–7.
12. Xian-Da Zhang, Yu Shi, Zheng Bao. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition, *IEEE Trans. Signal Processing*, 2001, vol. 49, no. 9, pp. 1875–1885.
13. Nelson D. E., Starzyk J. A., Ensley D. D. Iterated wavelet transformation and signal discrimination for HRR radar target recognition, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 52–57.
14. Lan Du, Hongway Liu, Zheng Bao, Mengdao Xing. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra, *IEEE Trans. Signal Processing*, 2005, vol. 53, no. 7, pp. 2359–2368.
15. Tait P. Introduction to radar target recognition, London, Institution of Electrical Engineers, 2005, *IET radar series*, no. 18, 396 p.
16. Nebabin V. G., Sergeev V. V. *Metody i tekhnika radiolokacionnogo raspoznavaniya* (Methods and technology of radar recognition), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 152 p. (in Russian).
17. August W. R., Stephen J. H. *Theory and practice of radar target identification*, Artech House, 2000, 738 p.
18. Shirman Y. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Y., Sukharevskiy O. I., Y. D. Shirman editor. *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking*, Boston—London, Artech house, 2002, 294 p.
19. Runion R. *Spravochnik po neparametricheskoj statistike* (Non-parametric Statistics References), Moscow, Finansy i statistika, 1982, 198 p. (in Russian).
20. D'yakonov V. P. *Vejvlety. Ot teorii k praktike* (Wavelets. From theory to practice), Moscow, SOLON-R, 2002, 448 p. (in Russian).
21. Smolencev N. K. *Osnovy teorii vejvletov. Vejvlety v MATLAB* (Basics of wavelet theory. Wavelets in Matlab), Moscow, DMK Press, 2005, 304 p. (in Russian).
22. Bahvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M. *Chislennyye metody* (Numerical Methods), Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2004, 636 p. (in Russian).
23. Verzhbickij V. M. *Osnovy chislennyh metodov* (Basics of Numerical Methods), Moscow, Vyssh. shk., 2002. — 840 p. (in Russian).