

# РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТНО-КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

М. И. Ашряпов

На основе вейвлетно-корреляционного анализа предложен метод детектирования доплеровских сигналов по априорным данным. Из входного доплеровского сигнала, отраженного от моторики человека, синтезируется специальный вейвлет со свойствами сжатия и растяжения формы волны. Подход позволяет анализировать тесноту связи входного сигнала и априорного, в случаях, когда объект изменил скорость. Обозначена проблематика классического коррелятора. Приведены примеры с результатами анализа тесноты связи между априорными и входными сигналами. Продемонстрирована работа вейвлетных фильтров-корреляторов на основе шаблона пользовательского вейвлета в сравнении с классическим коррелятором.

**Ключевые слова:** коррелятор, доплеровский сдвиг, обнаружение сложной сигнальной последовательности, фильтрация на основе шаблона и его прототипа вейвлета.

## Введение

Существующие методы обработки и распознавания радиолокационных данных [1–3] активно развиваются и дополняются. В современной тенденции, разнообразие технических систем и алгоритмов цифровой обработки, а также нейронные сети, методы частотного анализа и классической фильтрации дополняют друг друга, повышается эффективность, расширяется спектр решаемых задач.

В основе метода распознавания [4] доплеровских сигналов (ДС) на уровне обработки вторичной РЛ информации участвует коррелятор, чувствительный к форме сигнала, сформированного приемником на выходе двух квадратур. Основная проблема связана с изменением скорости объекта, которая может меняться в пределах четверти для последующих экспериментов. Практически можно сказать, что при распознавании движений человека невозможно добиться точной повторяемости. Такая особенность вносит изменение в форму ДС, впоследствии снижает тесноту связи между априорными и входными сигналами.

Для решения задачи выбран метод вейвлетного коррелятора [4 – 5]. В таком случае ДС предварительно сжимают и растягивают во временной области, что равносильно изменению скорости.

## Моделирование доплеровского сигнала отраженного от объекта, перемещающегося в пространстве

Рис. 1 иллюстрирует систему в координатном пространстве, в котором находится движущийся объект, траектория движения лежит в плоскости луча радарного датчика.

Тогда возникает общий случай Доплера, перемещение к радару (точка 3) и от радара (точка 1). А также частный случай, когда вектор скорости перпендикулярен лучу радара (точка 2).

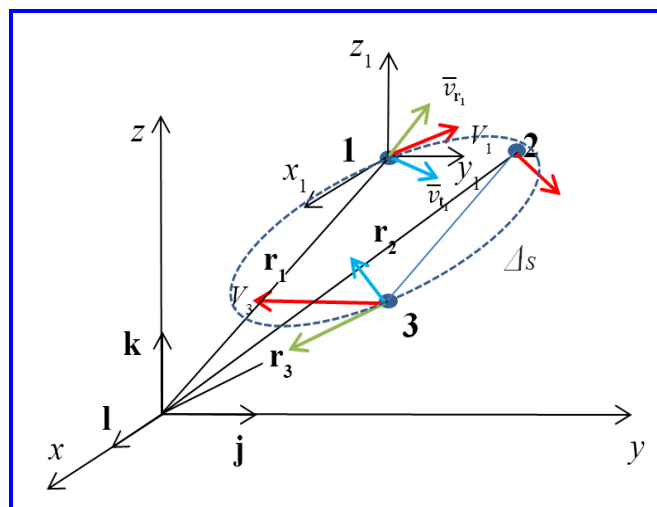


Рис. 1. Траекторная диаграмма перемещения объекта

Значение частоты Доплера зависит от радиальной скорости объекта. При линейном перемещении и постоянной путевой скорости 0,2 м/с частота Доплера составляет не более 8,6 Гц для тестируемого радара с несущей частотой 6,5 ГГц. Коэффициент 2 в нижеследующей формуле обусловлен доплеровским сдвигом, возникающим как для падающей, так и для отраженной волны.

$$\Delta f_d = f_0 \frac{2v_r}{c} = f_0 \frac{2V \cos(\theta)}{c}; \quad (1)$$

$$\Delta f_d = 6500000000 \cdot \frac{2 \cdot 0,2}{3 \cdot 10^8} = \frac{65 \cdot 0,4}{3} = 8,6.$$

Диаграмма направленности (ДН) антенны датчика достигает 40° и 20°, объект полностью попадает в ДН антенны и не выходит за ее пределы. Объект перемещается строго по кругу в плоскости xy. За точку отсчета принимается по-

зация 00, излучатель закреплен и не перемещается. Для построения модели аналитическим способом воспользуемся проекциями векторов на плоскости. Радиус траектории составляет  $R = 1$  м, с центром в секторе  $R_{ц}$  (2; 2 м). Число отсчетов  $i=320$ , шаг дискретизации  $di = 0,02$ .

Окружность построена по координатам в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} X_i = R\cos(\frac{\pi}{2} - di) + R_{ц}; \\ Y_i = R\sin(\frac{\pi}{2} - di) + R_{ц}. \end{cases} \quad (2)$$

Значение угловой скорости  $\omega_{уг} = t(\omega)$ , при  $t = 0 \dots 1$ , угловая скорость  $\omega = 0,062$  рад/с. А скорость перемещения  $|V| = 0,2$  м/с.

$$\begin{cases} V_x = \sin(\frac{\pi}{2} - \omega_{уг}) \cdot |V|; \\ V_y = \cos(\frac{\pi}{2} - \omega_{уг}) \cdot |V|. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение луча из центра (0;0) рассчитывается как:

$$\begin{cases} R_x = R\cos(\frac{\pi}{2} - \omega_{уг}) + R_{ц}; \\ R_y = R\sin(\frac{\pi}{2} - \omega_{уг}) + R_{ц}. \end{cases} \quad (4)$$

Вектор угол скорости спроецируем в точку (0;0), сложим  $V_x + R_x$ , а также  $V_y + R_y$ . Выполним расчет угла  $\theta$ :

$$\theta = \arctan(\frac{R_x}{R_y}) - \arctan(\frac{V_x}{V_y}). \quad (5)$$

Форма ДС при круговом перемещении с равномерной скоростью напоминает синусную волну, расчет согласно выражению (1). Дальность зондирования до 2 м, амплитуда трека 1 м. В ближней зоне (<1 м) от радарного датчика, наблюдается изменение формы ДС, синусоидальный закон переходит в пилообразный (рис. 2).

### Распознавание доплеровских сигналов по каналу классического коррелятора

В классическом случае корреляционного обнаружителя [6] максимальный отклик системы регистрируется при перекрытии двух сигнальных последовательностей, достигается высокая избирательность по форме сигнала. На этапе моделирования сформированы 2 – 4 ДС с разной длительностью (рис. 3, диаграммы а, б, в). После применения компенсирующего доплеровского фильтра (КДФ) по каналу классического коррелятора регистрируется пик тесноты связи априорных и входных данных (рис. 3., диаграмма г). Второй сигнал имеет сжатую форму, соответствующую ускорению на 20%. Отклик КДФ на сигнал снижен на 90%. Регистрируется высокая избирательность при отклонении скоростной компоненты.

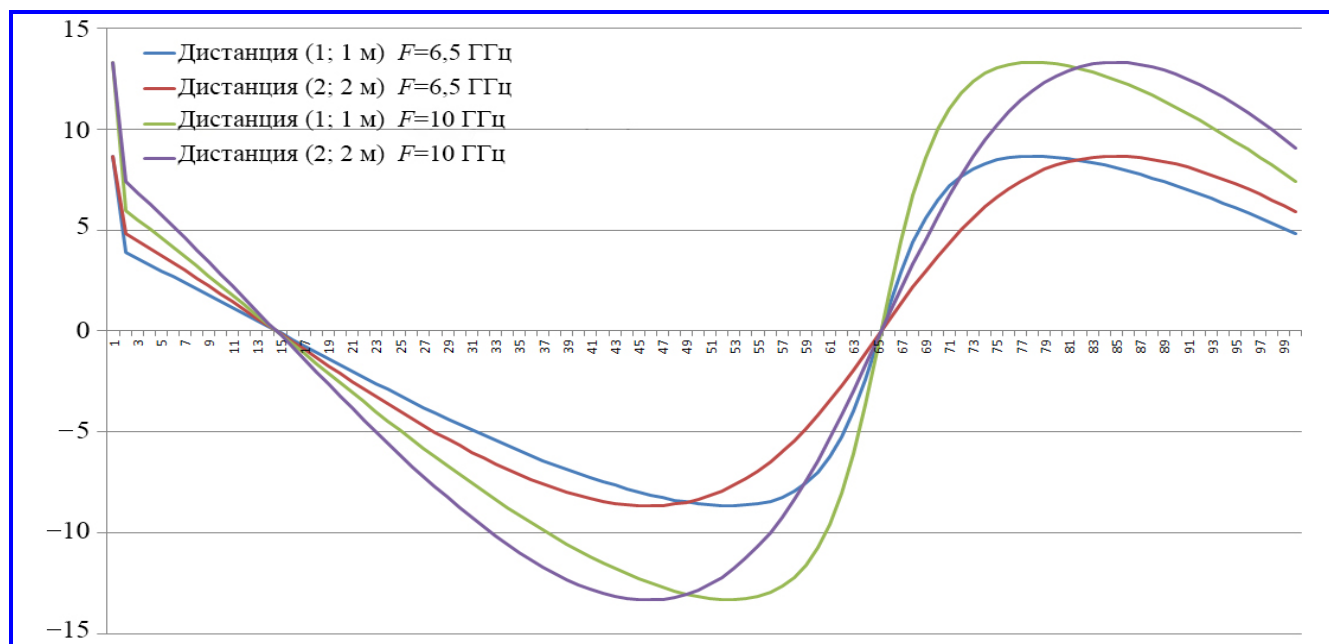
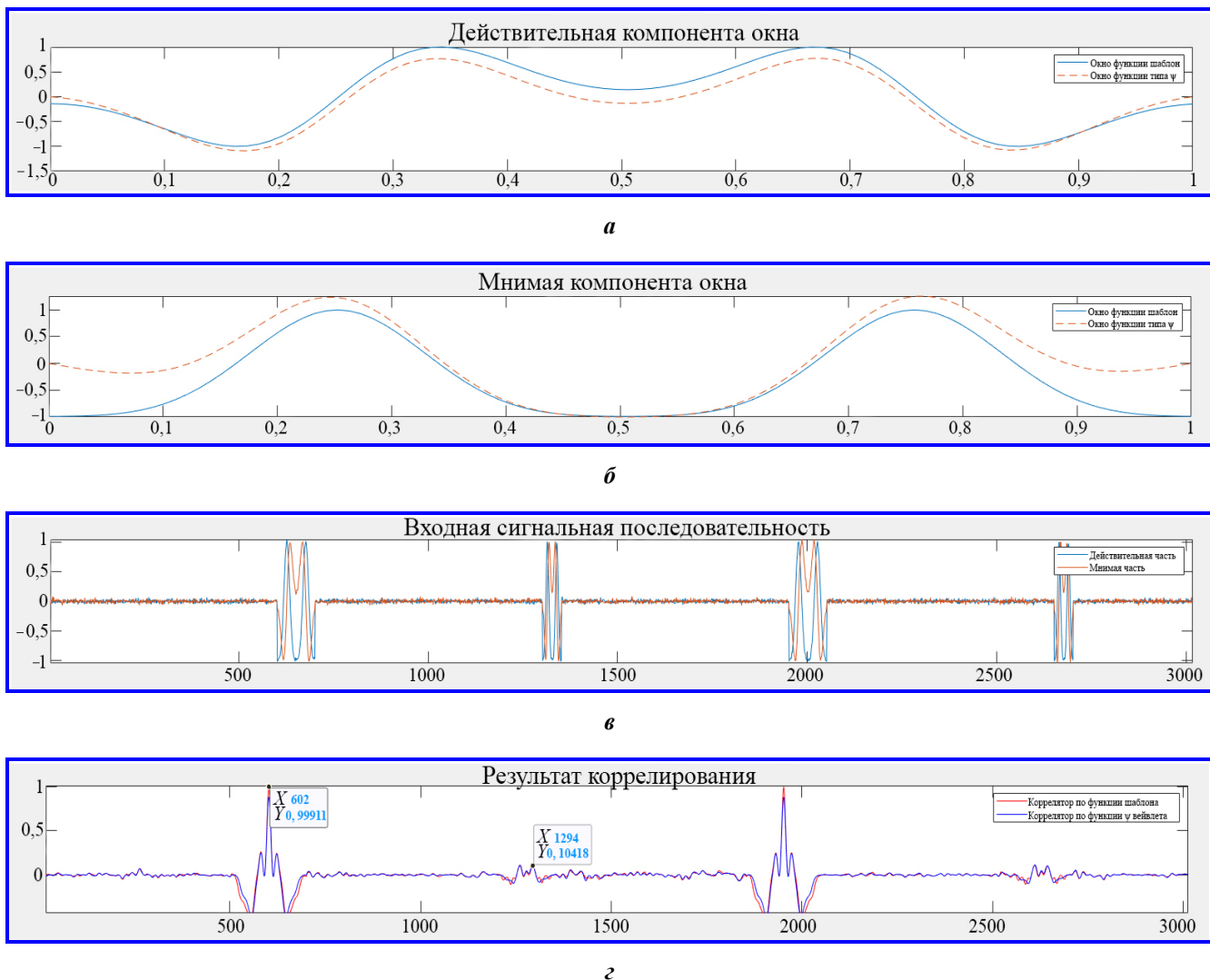
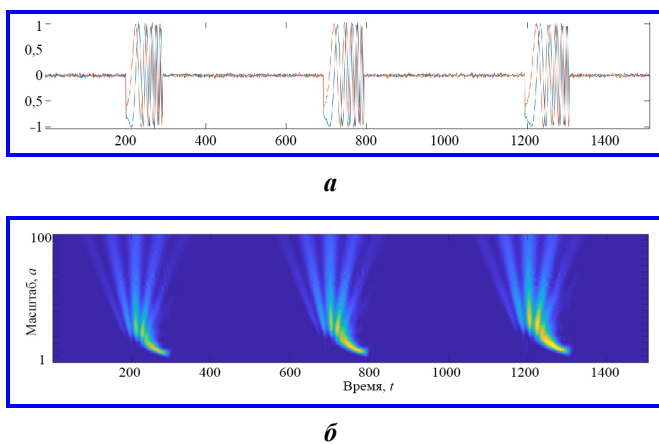


Рис. 2. Форма доплеровского сигнала кругового перемещения



**Рис. 3.** Диаграммы: *а* – сжатый доплеровский сигнал; *б* – расширенный доплеровский сигнал; *в* – входная последовательность с чередованием доплеровских сигналов; *г* – отклик корреляционного канала компенсирующего доплеровского фильтра



**Рис. 4.** Входная сигнальная последовательность на основе линейно-частотной модуляции является условной проекцией ускорения объекта (*а*); результат разложения (*б*)

**Распознавание доплеровского сигнала по каналу вейвлетного преобразования**

В составе структуры сигнальной последовательности представлены повторяющиеся элементы кругового движения. Функция двух квадратур является комплексной:

$$S = S_0 e^{j\{\varphi_0 + 2\pi(f_0 t + \frac{b}{2} t^2)\}} \quad (6)$$

На рис. 4, *а* изображен квадратурный сигнал с линейно-частотной модуляцией во времени. Данный сигнал является условной проекцией на серию круговых ДС с равномерным увеличением путевой скорости.

CWT-результат отражает информацию о последовательных ДС, на рис. 4, *б* представлен результат разложения. Каждая пачка включает набор круго-

вых ДС и характеризуется числом гребешков на высших масштабах до уровня 100.

Фильтрация на основе КДФ по каналу вейвлетного преобразования необходима для выполнения нескольких условий вторичной обработки:

1. По алгоритму SWT [7–8] выполняется разложение на частотно временные компоненты. Анализ позволяет обнаружить полный круговой ДС внутри серии. По срезу картины SWT производится выборка масштабирующего коэффициента.

2. Преобразование кадра ДС к виду вейвлета. Метод наименьших квадратов позволяет получить приближение к функции ДС посредством полиномиальной аппроксимации. Тем самым выполняется условие ортогональности и нормирования. На этом этапе выполняется сжатие и расширение кадра ДС (далее приводятся каналы КДФ сжатия и растяжения). Смоделированный ДС от кругового движения с равномерным ускорением (рис. 5) преобразован классическим ортогональным полиномом степени 4, 6, 8, 10.

Отклик КДФ по каналу вейвлетного преобразования представлен на рис. 6 и характеризует тесноту связи. Широкий лепесток принадлежит к разложению по функции вейвлета Морле. Тогда как узкий лепесток получен с разложением через аппроксимированный ДС полиномом 10-й степени. Чем уже лепесток, тем выше избирательность КДФ.

Распознавание образов ДС требует высокой избирательности по форме сигнала, тогда как граничные условия обнаружения не всегда опираются на априорные данные. Форма ДС сильно зависит как от колебания вектора суммарного отражения от местных предметов, стен помещения и самого человека, так и от полезного сигнала моторики руки. В некоторой мере представленные методы сопоставимы с методами селекции движущейся цели и рассматриваются как вторичные способы обработки информации источников квадратурных выходов приемного устройства.

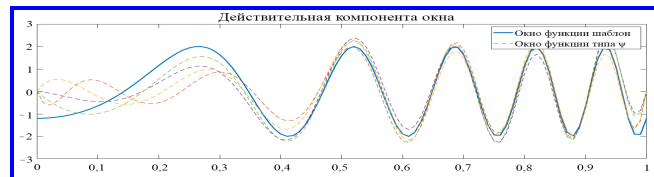
### Натурное испытание сверхширокополосного датчика

Эксперимент проводился на лабораторном макете сверхширокополосного радарного датчика, технические параметры устройства приведены в табл.

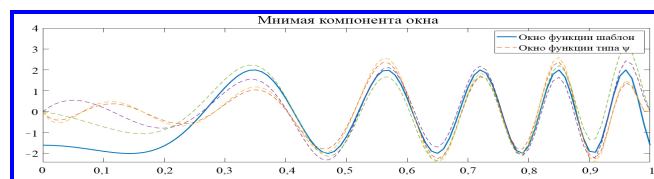
Радарный датчик закреплен на штативе, горизонтально напольному покрытию на высоте 1,5 м. Дистанция строба дальности от 1 до 5 м. Траектория трекинга выбрана с учетом формирования максимальной величины Доплера, а именно вдоль образующей по направлению главного лепестка антенной системы. Амплитуда трекинга не превышает размах в 1 м. Проведены серии сеансов записи ДС человека при написании символов алфавита моторикой руки. Сформированы 6 пачек сигналов, соответствующие проекциям скоростей (рис. 7).

Таблица

Параметры радарного датчика		
№	Параметр	Значение
1	Рабочая частота, ГГц	6,5
2	Полоса частот, МГц	800
3	Частота дискретизации, Гц	100
4	Выходная импульсная мощность, мВт	100
5	Средняя мощность, мВт	1
6	Длительность зондирующего импульса, нс	2
7	Скважность	2000
8	Дальность действия, м	0,2 – 5
9	Ширина ДН в вертикальной плоскости, град.	20
10	Ширина ДН в горизонтальной плоскости, град.	40



а



б

Рис. 5. Аппроксимация кругового доплеровского сигнала полиномом 4, 6, 8, 10-й степени: а – квадратура I; б – квадратура Q

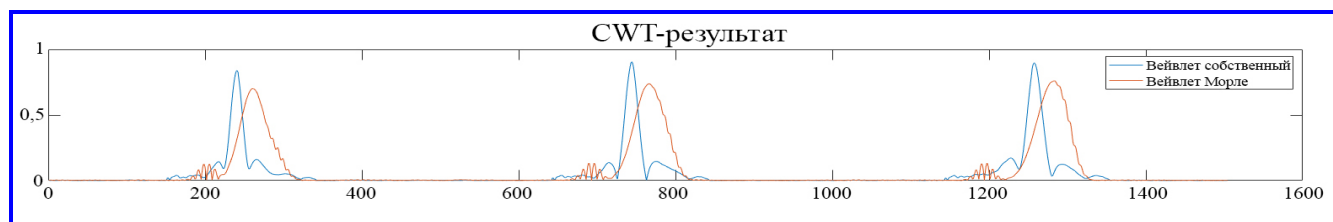


Рис. 6. Диаграмма тесноты связи входного сигнала с априорным

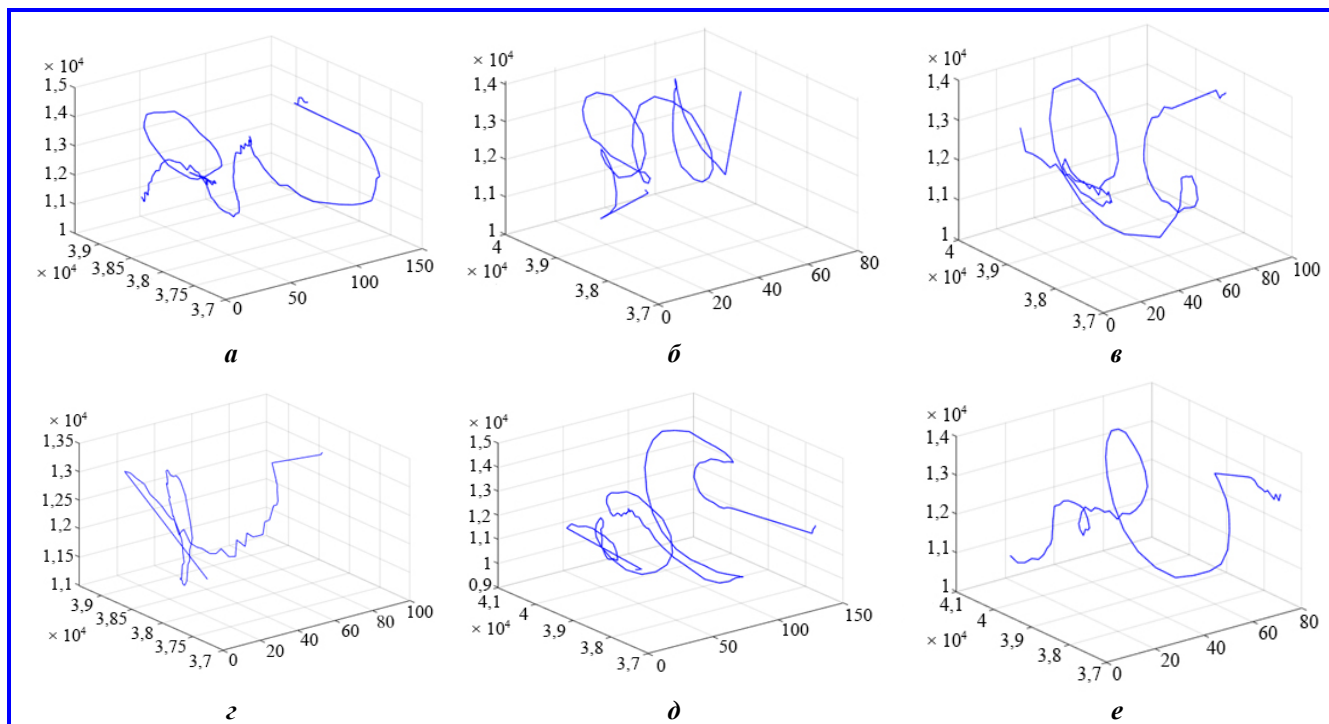
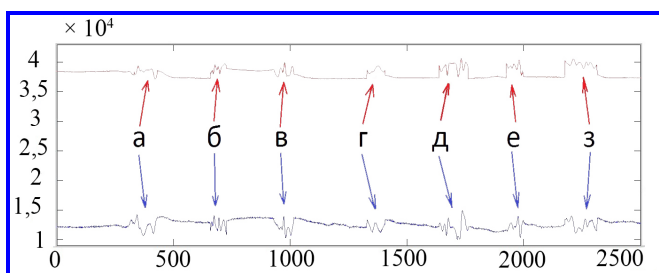
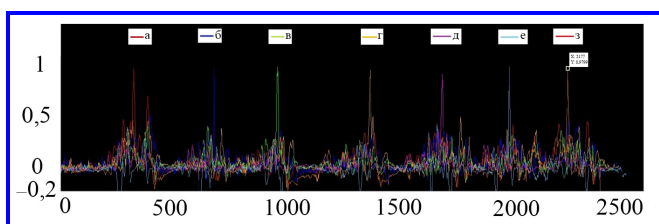


Рис. 7. Кадры доплеровских сигналов в комплексной проекции. Символы алфавита: *a* – «а»; *б* – «б»; *в* – «в»; *г* – «г»; *д* – «д»; *е* – «е»



*a*



*б*

Рис. 8. Результаты распознавания доплеровских портретов: *a* – входная последовательность; *б* – отклики компенсирующего доплеровского фильтра

Все сигналы объединены в комплексную сигнальную последовательность с разделением по времени в 1 с (рис. 8, *a*). Априорные пакеты ДС предварительно собраны и преобразованы с учетом замедления и ускорения перемещения. Конечный автомат реализует набор фильтров КДФ узкой избиратель-

ности. На каждую анализируемую пачку приходит одна реализация КДФ с 3 каналами скоростной селекции. Входной сигнал пропускается через параллельные фильтры. За счет человеческого фактора и моторики ДС не может быть воспроизведен точно, так как присутствует ошибка по скорости. Тогда каждый КДФ при сдвиге сигнала на один отсчет формирует коэффициент тесноты связи ДС с априорным сигналом.

Рис. 8, *б* иллюстрирует реакции фильтров на входной сигнал. Все отклики маркированы, а также отсутствуют перекрытия откликов, что характеризует высокую степень избирательности. Однако отклонение по скорости между априорным и входным кадром ДС существует (в пределах 10%), но компенсируется за счет каналов сжатия и растяжения внутри КДФ. Что подтверждается высоким коэффициентом тесноты связи до 0,9 пунктов.

### Заключение

1. Метод формирования опорной функции из доплеровского входного сигнала позволяет повысить эффективность вейвлет-анализа для распознавания доплеровских сигналов.
2. Метод распознавания входного доплеровского сигнала, отраженного от жестикулирующего человека, позволяет повысить вероятность правильно распознавания при изменении длительности вход-

ного сигнала в пределах четверти по сравнению с эталонным сигналом.

3. Метод подготовки эталонного сигнала, позволяющий увеличить диапазон дальности радиолокационного наблюдения мелкой моторики человека на 20%.

### Литература

1. Вторичная обработка данных в РЛС малой дальности действия / К. Ю. Гаврилов, Ю. В. Игонина // Материалы конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». – Москва, 2015. – С. 129 – 130.
2. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков [и др.] // Радиолокация и радиометрия, 2000. – № 2. – С. 5 – 65.
3. Формирование доплеровских портретов воздушных объектов с использованием метода сверхразрешения / А. В. Романенко // Журнал радиоэлектроники, 2015. – № 3. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23327275&ysclid=I9fi v3fuh1566546019>.
4. Ашряпов М. И. Корреляционное детектирование доплеровских сигнатур по вейвлетному шаблону / М. И. Ашряпов, Д. А. Охотников // Радиотехника, 2020. – Т. 84. – № 10 (20). – DOI: 10.18127/j00338486-202010(20)-06.

5. Ашряпов М. И. Обнаружение доплеровских сигнатур сложной формы при помощи вейвлетно-корреляционного алгоритма / М. И. Ашряпов, Д. А. Охотников // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9744085>. – DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744085.

6. An UWB correlation receiver for performance assessment of synchronization algorithms / L. Zwirello, C. Heine, Xuyang Li, T. Zwick. // 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 14 – 16 September 2011. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/252054576\\_An\\_UWB\\_correlation\\_receiver\\_for\\_performance\\_assessment\\_of\\_synchronization\\_algorithms](https://www.researchgate.net/publication/252054576_An_UWB_correlation_receiver_for_performance_assessment_of_synchronization_algorithms). – DOI: 10.1109/ICUWB.2011.6058829.

7. The fast continuous wavelet transformation (fCWT) for real-time, high-quality, noise-resistant time–frequency analysis / Lukas P. A. Arts, E. L. van den Broek // Nature Computational Science, 2022. – V. 2. – P. 47 – 58.

8. Low SNR radar signal detection using the continuous wavelet transform (CWT) and a Morlet wavelet / J. E. Ball, A. Tolley // IEEE National Radar Conference – Proceedings, June 2008. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224361444\\_Low\\_SNR\\_radar\\_signal\\_detection\\_using\\_the\\_Continuous\\_Wavelet\\_Transform\\_CWT\\_and\\_a\\_Morlet\\_wavelet](https://www.researchgate.net/publication/224361444_Low_SNR_radar_signal_detection_using_the_Continuous_Wavelet_Transform_CWT_and_a_Morlet_wavelet). – DOI:10.1109/RADAR.2008.4720950.

Поступила в редакцию 08.06.2022

*Марат Игоревич Ашряпов, ведущий инженер АО «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга», инженер МАИ (НИУ), т.: 8 (909) 974-44-27, e-mail: 3754248124@mail.ru. (АО «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)).*

## RADAR RECOGNITION OF DOPPLER SIGNALS BY WAVELET CORRELATION ANALYSIS

M. I. Ashryapov

*Based on wavelet-correlation analysis, a method for detecting Doppler signals from a priori data is proposed. From the input Doppler signal reflected from human motor skills, a special wavelet is synthesized, with the properties of compression and stretching of the waveform. The approach allows to analyze the tightness of the connection between the input signal and the a priori one, in cases where the object has changed speed. The problems of the classical correlator are outlined. Examples are given with the results of the analysis of the tightness of the relationship between a priori and input signals. The operation of wavelet filters of correlators based on the custom wavelet template is demonstrated in comparison with the classical correlator.*

**Keywords:** correlator, Doppler shift, complex signal sequence detection, filtering based on a template and its wavelet prototype.

### References

1. Secondary data processing in short-range radar systems / K. Yu. Gavrilov, Yu. V. Igonina // Proceedings of Conference 'Innovations in Aviation and Cosmonautics – 2015'. – Moscow, 2015. – P. 129 – 130.
2. Radar determination methods and their modelling / Ya. D. Shirman, S. A. Gorshkov [et al.] // Radar location and radiometrics, 2000. – No. 2. – P. 5 – 65.

3. Formation of Doppler portraits of air objects using the super-resolution method / A. V. Romanenko // Journal of Radio Electronics, 2015. – No. 3. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23327275&ysclid=19fiv3fuh1566546019>.
4. Ashryapov M.I. Correlation detection of Doppler signatures using a wavelet pattern / M. I. Ashryapov, D. A. Okhotnikov // Radiotekhnika, 2020. – Vol. 84. – No. 10 (20). – DOI : 10.18127/j00338486-202010(20)-06.
5. Ashryapov M. I. Detection of Doppler signatures of complex shape using the wavelet correlation algorithm / M. I. Ashryapov, D. A. Okhotnikov // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9744085>. – DOI : 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744085.
6. An UWB correlation receiver for performance assessment of synchronization algorithms / L. Zwirello, C. Heine, Xuyang Li, T. Zwick // 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 14 – 16 September 2011. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/252054576\\_An\\_UWB\\_correlation\\_receiver\\_for\\_performance\\_assessment\\_of\\_synchronization\\_algorithms](https://www.researchgate.net/publication/252054576_An_UWB_correlation_receiver_for_performance_assessment_of_synchronization_algorithms). – DOI: 10.1109/ICUWB.2011.6058829.
7. The fast continuous wavelet transformation (fCWT) for real-time, high-quality, noise-resistant time–frequency analysis / Lukas P. A. Arts, E. L. van den Broek // Nature Computational Science, 2022. – Vol. 2. – P. 47 – 58.
8. Low SNR radar signal detection using the continuous wavelet transform (CWT) and a Morlet wavelet / J. E. Ball, A. Tolley // IEEE National Radar Conference – Proceedings, June 2008. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224361444\\_Low\\_SNR\\_radar\\_signal\\_detection\\_using\\_the\\_Continuous\\_Wavelet\\_Transform\\_CWT\\_and\\_a\\_Morlet\\_wavelet](https://www.researchgate.net/publication/224361444_Low_SNR_radar_signal_detection_using_the_Continuous_Wavelet_Transform_CWT_and_a_Morlet_wavelet). – DOI : 10.1109/RADAR.2008.4720950.

***Marat Igorevich Ashryapov**, Leading Engineer of JSC TsNIRTI named after Academician A. I. Berg,  
Engineer of MAI (National Research University), tel.: +7 (909) 974-44-27, e-mail: 3754248124@mail.ru.  
(JSC TsNIRTI named after Academician A. I. Berg;  
Moscow Aviation Institute (National Research University)).*