

DOI: 10.17516/1999-494X-0434

УДК 621.396.969

Methods of Recognition of Micro-Doppler Portraits on the Basis of Correlation Wavelet Analysis

Marat I. Ashryapov*

*JSC CNIRTI named after A. I. Berg
Moscow, Russian Federation*

Received 01.09.2022, received in revised form 16.09.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. Based on the correlation analysis, a method for detecting Doppler portraits based on a priori data is proposed. The method implements the structure of special compensating Doppler filters for velocity channel analysis in radar motion detection sensors. And it is relevant in the tasks of image recognition of a high-speed Doppler portrait. The problems of the classical correlator are outlined. Examples are given with the results of correlations both on simple signals and on those close to real prototypes. The operation of wavelet correlator filters 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.

Citation: Ashryapov, M. I. Methods of recognition of micro-doppler portraits on the basis of correlation wavelet analysis. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 759–767. DOI: 10.17516/1999-494X-0434

Методы распознавания микродоплеровских портретов на основе корреляционного вейвлет-анализа

М.И. Ашряпов

*Центральный научно-исследовательский
радиотехнический институт
им. академика А.И. Берга
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. На основе корреляционного анализа предложен метод детектирования доплеровских портретов по априорным данным. Метод реализует структуру специальных компенсирующих доплеровских фильтров анализа скоростного канала в радарных датчиках обнаружения движения и актуален в задачах распознавания образа скоростного доплеровского портрета. Обозначена проблематика классического коррелятора. Приведены примеры с результатами корреляций как на простых, так и на приближенных к реальным прототипам сигналах. 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.

Цитирование: Ашряпов, М.И. Методы распознавания микродоплеровских портретов на основе корреляционного вейвлет-анализа / М.И. Ашряпов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 759–767. DOI: 10.17516/1999-494X-0434

Введение

Существующие методы обработки вторичной РЛ информации по направлению распознавания образов активно развиваются и дополняются. Демонстрируются новые возможности аппаратных решений (многопозиционные датчики, ММО и т.д.) в области цифровой обработки и анализа, к которым относятся нейронные сети, методы частотного анализа и классической фильтрации.

В основе метода распознавания [1] доплеровских портретов (ДП), на уровне обработки вторичной РЛ информации, участвует коррелятор, чувствительный к форме сигнала, сформированного приемником на выходе двух квадратур. Скоростной параметр объекта может меняться в пределах от половины до полутра и отличаться в последующих экспериментах и сеансах сбора данных. Практически можно сказать, что при распознавании движений человека невозможно добиться идентичной повторяемости. Такая особенность вносит изменение в форму ДП и впоследствии снижает вероятность распознавания классическим способом.

Для решения задачи выбран метод вейвлетного коррелятора [2]. В таком случае ДП предварительно сжимают и растягивают во временной области, что равносильно изменению скорости.

1. Моделирование скорости точечного отражателя при перемещении в пространстве

Рис. 1 иллюстрирует систему в координатном пространстве, где находится движущийся элементарный отражатель, а траектория движения лежит в плоскости луча радарного датчика.

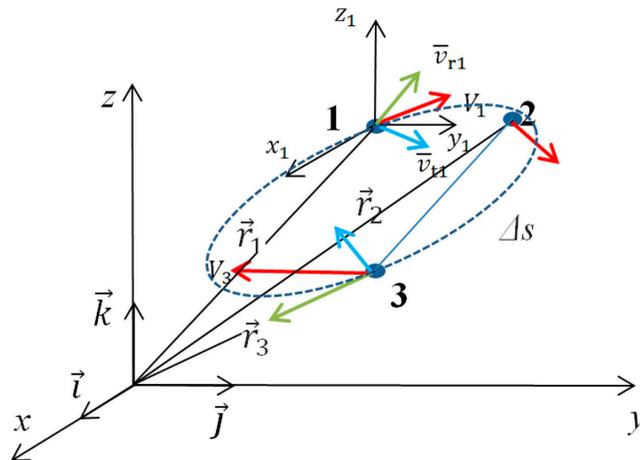


Рис. 1. Траекторная диаграмма перемещения отражателя

Fig. 1. Trajectory diagram of reflector movement

Исходя из условий 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). Величина частоты Доплера тесно связана с радиальной скоростью объекта, тогда при линейном перемещении с постоянной путевой скоростью 0.2 м/с частота Доплера составляет не более 8.6 Гц для тестируемого радара с несущей частотой 6.5 ГГц. Коэффициент 2 в нижеприведенной формуле обусловлен доплеровским сдвигом, возникающим как для падающей, так и для отраженной волны:

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

$$\Delta f_d = 6500000000 \cdot \frac{2 \cdot 0.2 \left[\frac{m}{c} \right]}{3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{c} \right]} = \frac{65 \cdot 0.4}{3} = 8.6 [Гц]. \quad (1)$$

Диаграмма направленности антенны датчика достигает 40° в двух плоскостях, объект полностью попадает в диаграмму и не выходит за ее пределы. Точечный объект перемещается строго по кругу в плоскости xy . За точку отсчета принимается позиция 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 $R_c(2;2)$ м. Число отсчетов $i=320$, шаг дискретизации $dl_i = 0.02$.

Окружность построена по координатам в соответствии с выражением

$$\begin{cases} X_i = R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - dl_i\right) + R_y; \\ Y_i = R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - dl_i\right) + R_y. \end{cases} \quad (2)$$

Значение угловой скорости $\omega_{y\bar{z}} = t \cdot \omega$ при $t=0 \dots 1$, угловая скорость $\omega = 0.062$ рад/с, а скорость перемещения $|V| = 0.2$ м/с.

$$\begin{cases} V_x = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_{y2}\right) \cdot |V|; \\ V_y = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_{y2}\right) \cdot |V|. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение луча из центра 0;0 рассчитывается как

$$\begin{cases} R_x = R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_{y2}\right) + R_y; \\ R_y = R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_{y2}\right) + R_y. \end{cases} \quad (4)$$

Вектор угловой скорости спроецируем в точку 0;0, сложим $V_x + R_x$, а также $V_y + R_y$:

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

Форма ДП от кругового перемещения с равномерной скоростью напоминает синусную волну, расчет согласно выражению (1). Дальность зондирования до 2 м, амплитуда трека 1 м. В случае экстремального приближения ближе, чем в 1 м от радарного датчика, наблюдается изменение формы ДП, синусоидальный закон переходит в пилообразный (рис. 2).

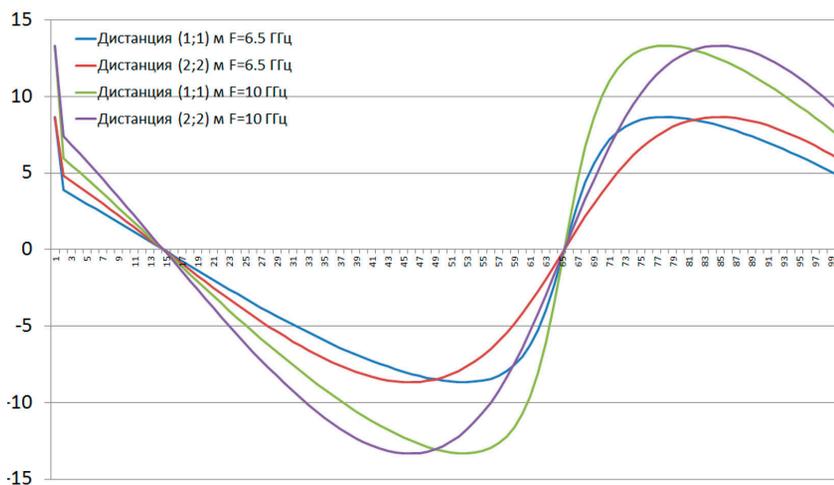


Рис. 2. Форма ДП кругового перемещения

Fig. 2. Shape of DP circular movement

2. Распознавание ДП по каналу классического коррелятора

В классическом случае корреляционного обнаружителя максимальный отклик системы регистрируется при перекрытии двух сигнальных последовательностей. Достигается высокая избирательность по форме волны. С одной стороны, это является преимуществом, с другой – недостатком с позиции недетерминированного анализа. На этапе моделирования сформированы сигналы ДП с разной длительностью (рис. 3, диаграммы а, б, в). После применения компенсирующего доплеровского фильтра (КДФ) по каналу классического коррелятора регистрируется

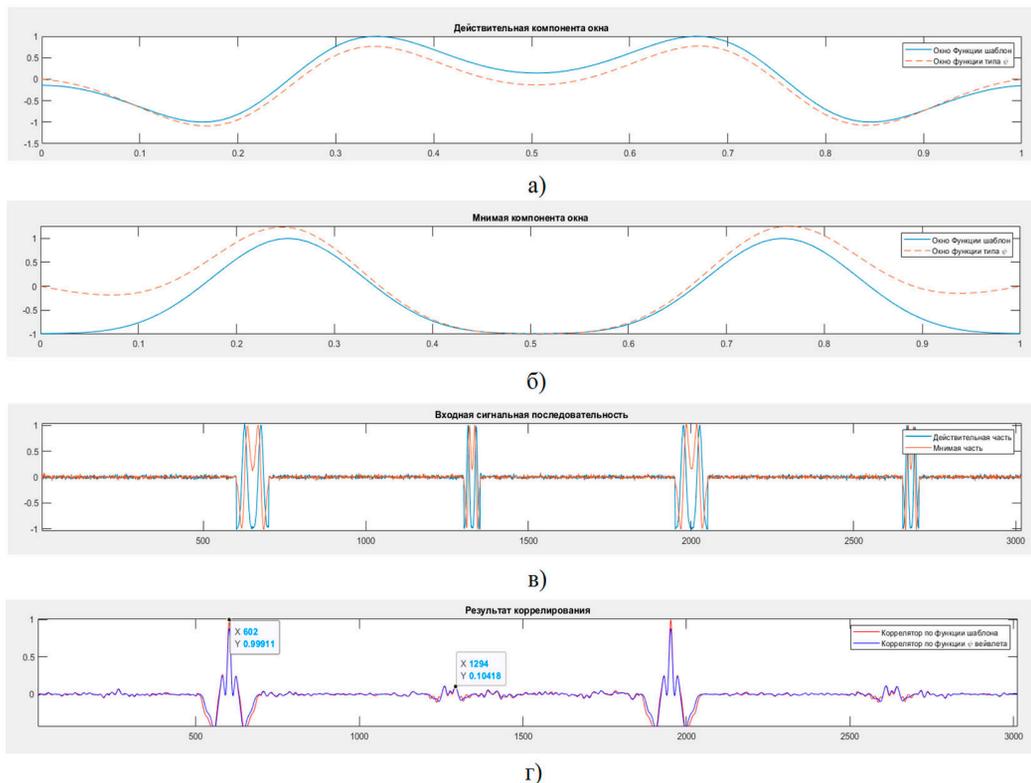


Рис. 3. Сигналы ДП: а) сжатый, б) расширенный, в) входная последовательность с чередованием ДП, г) отклик корреляционного канала КДФ

Fig. 3. DP signals: a) compressed, b) extended, c) input sequence with DP interleaving, d) CDF correlation channel response

пик с единичной вероятностью распознавания (рис. 2, диаграмма г). Второй ДП имеет сжатую форму, соответствующую ускорению на 20 %. Отклик КДФ на ДП снижен на 90 %. Регистрируется высокая избирательность при отклонении скоростной компоненты.

3. Распознавание ДП по каналу вейвлетного преобразования

В составе структуры сложного ДП представлены повторяющиеся элементы кругового движения. Описывающая функция выхода 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. 4а изображен ЛЧМ сигнал во временной области в квадратурном виде. Данный сигнал есть условная проекция на серию круговых ДП с равномерным увеличением путевой скорости.

CWT отклик содержит информацию о последовательных ДП, на рис. 4б представлен результат разложения. Каждая пачка включает набор круговых ДП и характеризуется числом гребешков на высших масштабах до уровня 100.

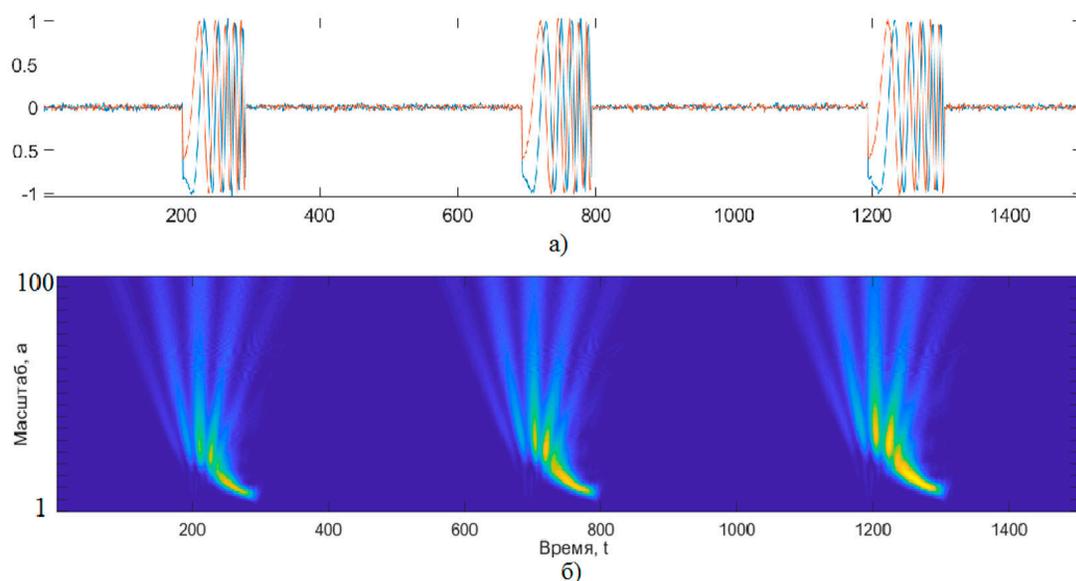


Рис. 4. Сигнал во временной области: а) входная сигнальная последовательность на основе ЛЧМ (условная проекция ускорения объекта), б) результат разложения

Fig. 4. Signal in the time domain: a) input signal sequence based on LFM (conditional projection of object acceleration), b) decomposition result

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

1. Разложение на частотно-временные компоненты по алгоритму SWT. Анализ позволяет обнаружить полный круговой ДП внутри серии. По срезу картины SWT производят выборку масштабирующего коэффициента.

2. Преобразование кадра ДП к виду вейвлета. Метод МНК позволяет получить приближение к функции ДП посредством полиномиальной аппроксимации. Тем самым выполняется условие ортогональности и нормирования. На этом этапе выполняется сжатие и расширение кадра ДП (далее приводятся каналы КДФ сжатия и растяжения). Смоделированный ДП 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 степень избирательности. Широкий лепесток принадлежит к разложению по функции вейвлета Морле, тогда как узкий лепесток получен с разложением по аппроксимированному ДП с полиномом 10 степени. Чем уже лепесток, тем выше избирательность КДФ.

Распознавание образов ДП требует высокой избирательности по форме волны, тогда как граничные условия правильного обнаружения кадра не всегда опираются на априорные данные. Форма ДП 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 РЛ информации источников квадратурных выходов приемника устройства.

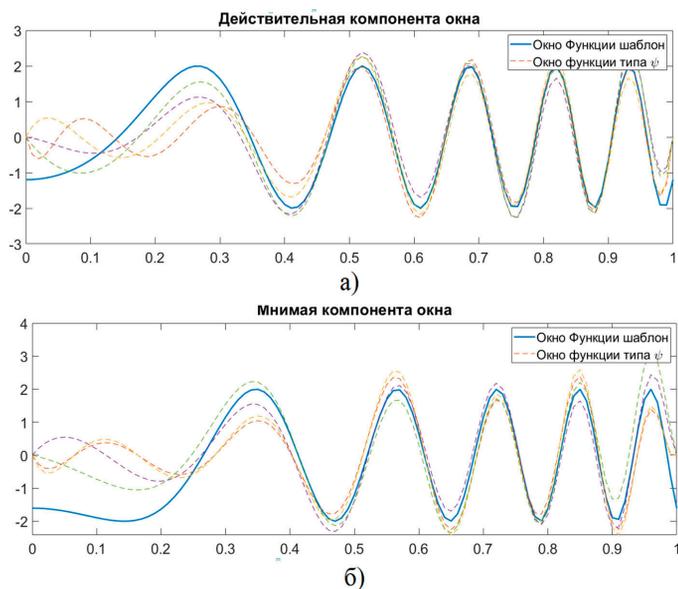


Рис. 5. Аппроксимация кругового ДП полиномом 4, 6, 8, 10 степени: а) квадратура I, б) квадратура Q
 Fig. 5. Approximation of the circular DP by a polynomial of 4, 6, 8, 10 degrees: a) quadrature I, b) quadrature Q

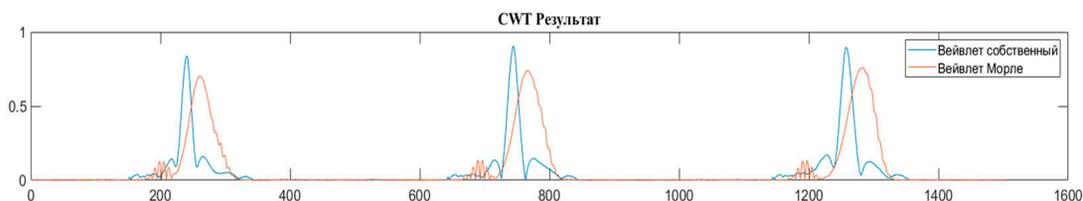


Рис. 6. Динамика вероятностей распознавания
 Fig. 6. Dynamics of recognition probabilities

4. Натурное испытание сверхширокополосного датчика

Эксперимент проводили на лабораторном макете СШП радарного датчика, технические параметры устройства приведены в табл. 1.

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 ДП человека при написании символов алфавита моторикой руки. Сформированы 6 ДП, соответствующие проекциям скоростей (рис. 7).

Все ДП объединены в комплексную сигнальную последовательность с разделением по времени в 1с (рис. 8а). Априорные кадры ДП собраны предварительно и обработаны с учетом замедления скорости объекта, а также с ускорением. Конечный автомат реализует набор фильтров КДФ узкой избирательности. На каждый анализируемый ДП приходится одна реали-

Таблица 1. Параметры радарного датчика

Table 1. Radar sensor parameters

№	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	Сквозность	2000
8	Дальность действия, м	0.2–5
9	Ширина ДН в вертикальной плоскости	20
10	Ширина ДН в горизонтальной плоскости	40

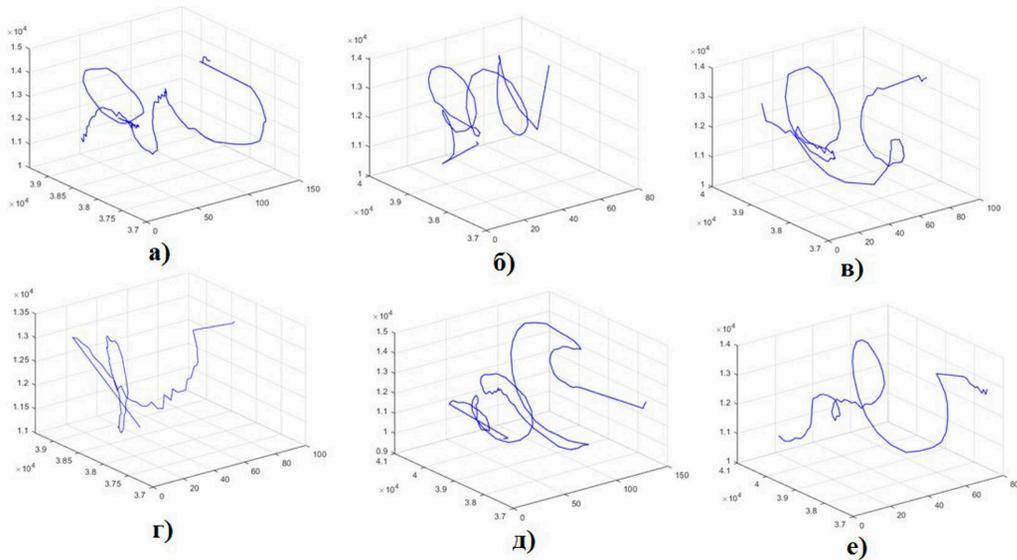


Рис. 7. Кадры ДП в комплексной проекции. Символы алфавита: а) «а», б) «б», в) «в», г) «г», д) «д», е) «е»

Fig. 7. DP frames in the complex projection. Alphabet symbols: a) “a”, b) “б”, c) “в”, d) «г», e) «д», f) «е»

зация КДФ с 3 каналами скоростной селекции. Входной сигнал проходит через каждый фильтр параллельно. За счет человеческого фактора и моторики человека ДП не может быть воспроизведен точно, присутствует ошибка по скорости, поэтому каждый КДФ при сдвиге сигнала на один отсчет формирует коэффициент вероятности распознавания ДП. Рис. 8б иллюстрирует реакции фильтров на входной сигнал. Все отклики маркированы, а также отсутствуют перекрытия откликов, что характеризует высокую степень избирательности. Отклонение по скорости между априорным и входным кадром ДП существует (в пределах 10 %), но компенсируется за счет каналов сжатия и растяжения внутри КДФ, что подтверждается высоким коэффициентом распознавания – до 0.9 пунктов.

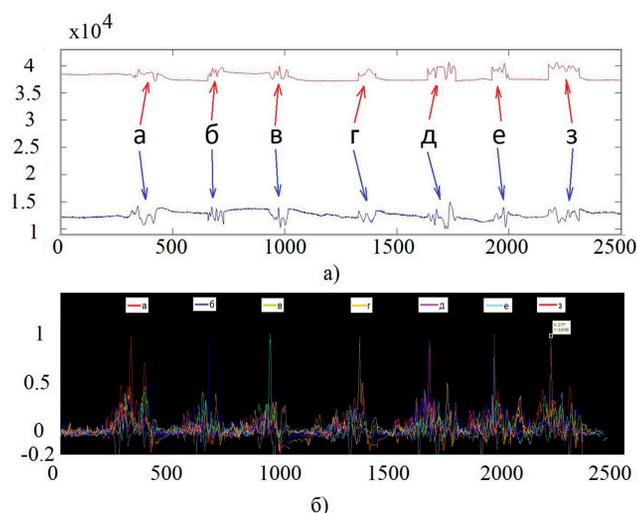


Рис. 8. Результаты распознавания ДП: а) входная последовательность, б) отклики КДФ

Fig. 8. DP recognition results: a) input sequence, b) KDF responses

Заключение

Влияние дистанции на форму ДП приводит к существенному снижению вероятности распознавания. С учетом дальности вводится дополнительная поправочная сигнатура, снижающая ошибку распознавания до 12 %.

Распознавание сложного ДП, отличающегося по длительности на $\pm 1/4$ от априорного кадра, повышается в пределах 12–25 % с использованием семейства комплексных вейвлетных корреляторов в сравнении с классическими корреляторами.

При дистанционном радиолокационном обнаружении (распознавании) моторики человека применение вейвлет-преобразования на основе пользовательского шаблона расширяет диапазон скоростей воспроизведения моторики на 10 % в сравнении с классическим корреляционным анализом.

Список литературы / References

[1] Ашряпов, М.И., Охотников, Д.А. Корреляционное детектирование доплеровских сигнатур по вейвлетному шаблону, *Радиотехника*, 2020, 84, 10(20). DOI: 10.18127/j00338486–202010(20)-06 [Ashryapov, M.I., Okhotnikov, D. A. Doppler Signature Detection with Wavelet Pattern Correlator, *Radiotekhnika*, 2020, 84, 10(20). DOI: 10.18127/j00338486–202010(20)-06 (in Russian)]

[2] Ашряпов, М.И., Охотников, Д.А. Обнаружение доплеровских сигнатур сложной формы при помощи вейвлетно-корреляционного алгоритма. *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* ISBN: 978–166540635–2. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744085 [Ashryapov, M.I., Okhotnikov, D.A. Detection of Doppler signatures of complex shapes using the wavelet correlation algorithm, *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* ISBN: 978–166540635–2. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744085 (in Russian)]