

УДК 621.396.96

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-413-420

EDN QSEFSL

Моделирование сигнальных откликов от БПЛА при использовании доплеровской РЛС и их спектральный анализ

¹ Колесников Ю.Д., ² Заливин А.Н., ³ Александров А.В., ² Федорова Н.В.

¹ ООО «АйТи Бизнес Консалтинг», Россия, 196158, г. Санкт-Петербург

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

³ Белгородский университет кооперации, экономики и права
Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, д. 116а

1146325@bsuedu.ru, zalivin@bsuedu.ru, aleksandrov_vitaliy@mail.ru, fedorova_n@bsuedu.ru

Аннотация. В статье представлено детальное математическое описание алгоритмов моделирования микродоплеровских сигнальных откликов, возникающих при движении беспилотных летательных аппаратов, а также методов их спектрального анализа, реализованных в среде MATLAB. Рассмотрены основы генерации радиолокационных сигналов с применением частотной манипуляции, позволяющей эффективно выделять микродоплеровские компоненты. Особое внимание уделено современным методам спектральной обработки, включая быстрое преобразование Фурье, квадратично-взвешенное преобразование Фурье, преобразование Гильберта – Хуанга, кепстральный анализ, вейвлет-преобразование и распределение Вигнера – Вилле. Проведен сравнительный анализ этих методов, выделены их ключевые преимущества и недостатки применительно к обработке микродоплеровских сигнатур беспилотных летательных аппаратов. Результаты исследования могут быть использованы для повышения точности идентификации и классификации движущихся объектов в радиолокационных системах.

Ключевые слова: микродоплеровский сигнал, радиолокация, спектральный анализ, БПФ, КВПФ, Гильберт – Хуанг, кепстр, вейвлет, Вигнер – Вилле

Для цитирования: Колесников Ю.Д., Заливин А.Н., Александров А.В., Федорова Н.В. 2025. Моделирование сигнальных откликов от БПЛА при использовании доплеровской РЛС и их спектральный анализ. *Экономика. Информатика*, 52(2): 413–420. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-413-420 EDN QSEFSL

Modeling of Signal Responses from UAVS Using Doppler Radar and their Spectral Analysis

¹ Yuri D. Kolesnikov, ² Alexander N. Zalivin, ³ Vitaly V. Alexandrov, ² Nadezhda V. Fedorova

¹ I.T. Business Consulting LLC, St. Petersburg 196158, Russia

² Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

³ Belgorod University of Cooperation, Economics and Law,
116a Sadovaya St., Belgorod 308023, Russia

1146325@bsuedu.ru, zalivin@bsuedu.ru, aleksandrov_vitaliy@mail.ru, fedorova_n@bsuedu.ru

Abstract. The article provides a detailed mathematical description of algorithms for modeling Microdopler signal responses that occur during the movement of unmanned aerial vehicles, as well as methods for their spectral analysis implemented in the MATLAB environment. The basics of radar signal generation using frequency manipulation, which makes it possible to effectively isolate Microdopler components, are considered. Special attention is paid to modern spectral processing methods, including the fast Fourier

© Колесников Ю.Д., Заливин А.Н., Александров А.В., Федорова Н.В., 2025

transform, the quadratically weighted Fourier transform, the Hilbert-Huang transform, cepstral analysis, the wavelet transform, and the Wigner-Ville distribution. A comparative analysis of these methods is carried out, their key advantages and disadvantages are highlighted in relation to the processing of Microdopler signatures of unmanned aerial vehicles. The results of the study can be used to improve the accuracy of identification and classification of moving objects in radar systems.

Keywords: micro-Doppler signal, radar, spectral analysis, FFT, STFT, Hilbert-Huang, cepstrum, wavelet, Wigner-Ville

For citation: Kolesnikov Y.D., Zalivin A.N., Alexandrov A.V., Fedorova N.V. 2025. Modeling of Signal Responses from UAVs Using Doppler Radar and their Spectral Analysis. *Economics. Information technologies*, 52(2): 413–420 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-413-420 EDN QSEFSL

Введение

Радиолокационные системы широко применяются для обнаружения и классификации движущихся объектов, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), за счет анализа доплеровских и микродоплеровских эффектов в отраженных сигналах. Микродоплеровские сигнатуры возникают из-за вращения лопастей дрона [Joint Task Force on Cybersecurity..., 2018] и предоставляют важную информацию для идентификации цели. Представленный код MATLAB моделирует радиолокационный сигнал от квадрокоптера и применяет различные методы спектрального анализа для выделения микродоплеровских особенностей [Asghar, Luxton-Reilly, 2020]. В данной статье описываются математические основы моделирования сигналов и методов анализа, а также оцениваются их преимущества и ограничения.

Модель радиолокационного сигнала

Радар работает на несущей частоте $f_c = 24,125$ ГГц, с длиной волны $\lambda = \frac{c}{f_c}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Используется частотная манипуляция (FSK) с двумя частотами [Bishop, Miloslavskaya, Theocharidou, 2015; Dawson, Wang, William, 2018]:

$$f_{cA} = f_c - \frac{\Delta f}{2}, f_c = f_c - \frac{\Delta f}{2}, \quad (1)$$

где $\Delta f = 1$ МГц.

Мощность передатчика составляет $P_t = 10$ мВт, а коэффициент усиления антенны $G = 10^{G_{dB}/10}$, где $G_{dB} = 20$ дБ.

Положение дрона в трехмерной системе координат задается как:

$$r(t) = [x(t), y(t), z(t)] = [x_0 + V_x t, y_0 + V_y t, z_0 + V_z t], \quad (2)$$

где V_x, V_y, V_z – компоненты скорости дрона.

Радиальное расстояние до радара:

$$R(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2 + z(t)^2}. \quad (3)$$

Диаграмма направленности антенны моделируется гауссовой функцией [Endicott-Popovsky, Popovsky, 2014; Cabaj et al., 2018]:

$$G_{ant}(t) = \exp\left(-\frac{\phi(t)^2}{2\sigma_{az}^2}\right) \exp\left(-\frac{\psi(t)^2}{2\sigma_{el}^2}\right), \quad (4)$$

где $\phi(t)$ и $\psi(t)$ – азимутный и угол места, выражаются как:

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right), \psi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{z(t)}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}}\right). \quad (5)$$

Моделирование микродоплеровского эффекта

В качестве модели сигнала имитируется модель движения БПЛА, оснащенного четырьмя роторами с двумя лопастями на каждом роторе. Длина лопасти составляет $l = 0,1$ м. с частотой вращения $RPM = 800$ об/мин. Угловая скорость лопасти выражается как:

$$\omega = RPM \frac{2\pi}{60}. \quad (6)$$

Скорость на конце лопасти выражается как:

$$V_r = \omega l.$$

Микродоплеровский сдвиг частоты для лопасти:

$$f_d = \frac{2V_r \sin(\theta_i(t)) \cos(\theta(t))}{\lambda}, \quad (7)$$

где $\theta_i(t) = \omega t + \phi_i$, $\theta(t) = \cos^{-1}\left(\frac{VR}{|V||R|}\right)$ [Joint Task Force on Cybersecurity..., 2018; Asghar, Luxton-Reilly, 2020].

Амплитуда сигнала от каждой лопасти:

$$A_{blade} = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_{blade}}{(4\pi)^3 R(t)^4} G_{ant}(t)}, \quad (8)$$

где σ_{blade} – эффективная площадь рассеивания (ЭПР) лопасти.

Мгновенная фаза сигнала определяется как:

$$\phi(t) = \phi(t - \Delta t) + \frac{4\pi}{\lambda} V_{radial}(t) \Delta t, \quad (9)$$

где V_{radial} – микродоплеровский вклад лопасти в радиальную скорость дрона.

Итоговый сигнал представляет из себя сумму вкладов всех лопастей и тела с добавлением гауссова шума (при необходимости).

FSK и обработка I/Q сигналов

Сигналы FSK моделируются для двух частот с переключением на частоте:

$$f_{switch} = \frac{c}{2R_{max}\Delta f}. \quad (10)$$

I/Q сигналы формируются для двух приемников, разнесенных на $d = \lambda/2$, с фазовым сдвигом:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d \sin(\theta_{target})}{\lambda}, \quad (11)$$

где $\theta_{target} = 10^\circ$

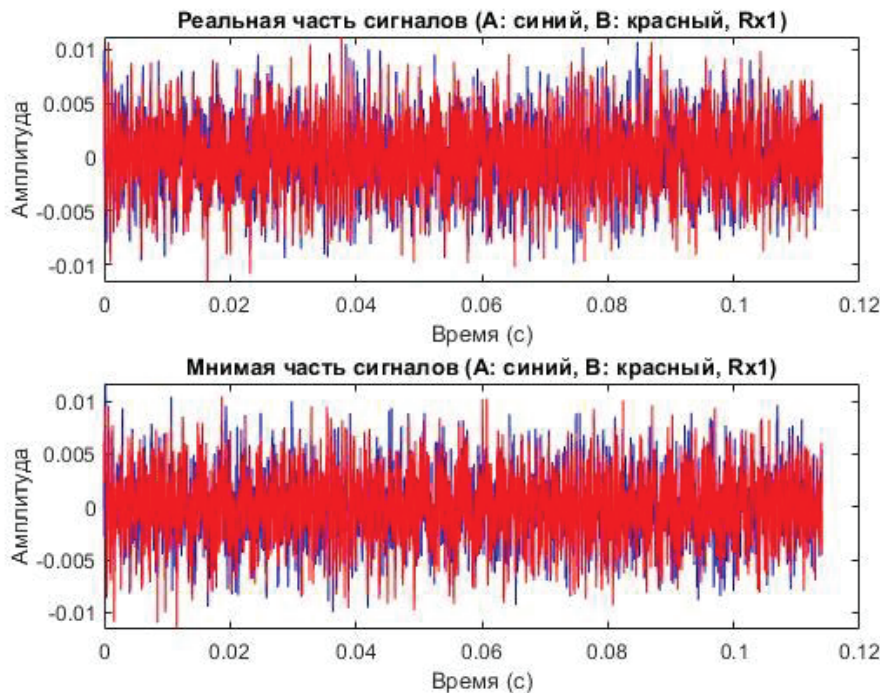


Рис. 1. Комплексное представление сигнала

Fig. 1. Complex representation of the signal

Сигналы смешиваются с гетеродинной частотой f_{het} для сдвига всех частот в спектре в положительную область:

$$f_{het} = \left| \frac{2V_{drone,radial}}{\lambda} - f_{d,blade,max} \right|, \quad (12)$$

где $V_{drone,radial}$ – максимальная скорость БПЛА, $f_{d,blade,max}$ – максимальная доплеровская частота движения лопасти.

Методы спектрального анализа

Быстрое преобразование Фурье вычисляется как [Chen, Maynard, Ahma, 2013, Dawson, Wang, William, 2018]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (13)$$

где N — длина сигнала, а k соответствует частотным бинам $f_k = \frac{kF_s}{N}$. Амплитудный спектр нормируется как $\frac{|X[k]|}{N}$.

Преимущества: высокая вычислительная эффективность $O = \frac{N}{\log N}$, простота интерпретации.

Недостатки: не учитывает нестационарность сигнала, ограниченное частотное разрешение.

Кратковременное преобразование Фурье [Белов, Хорев, 2015] вычисляется как:

$$S[t, f] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \omega[n - m] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (14)$$

где $\omega[n - m]$ – окно Хэмминга (48 отсчетов), перекрытие – 90 %.

Преимущества: учет изменений во времени, простота реализации [Белов, Лось, Малюк, 2018].

Недостатки: фиксированный размер окна ограничивает разрешение по времени и частоте.

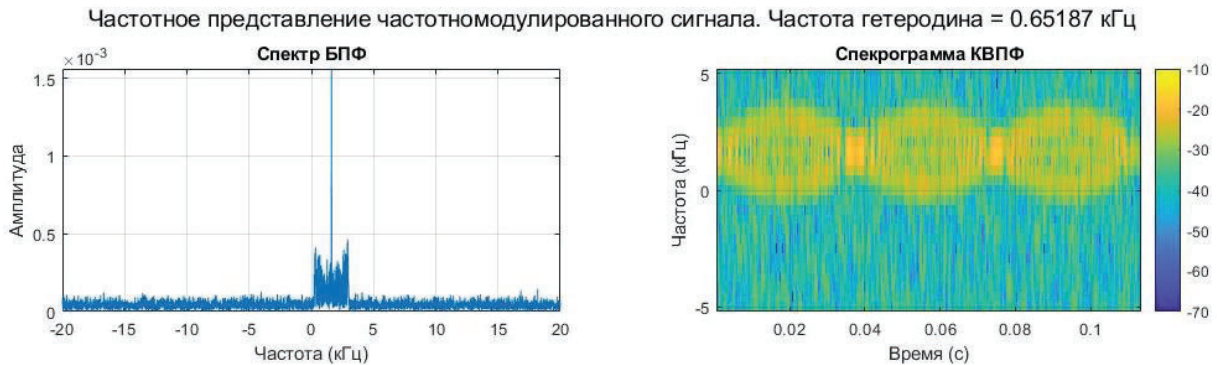


Рис. 2. Частотное представление сигнала
Fig. 2. Frequency representation of the signal

Преобразование Гильберта – Хуанга (ННТ) включает эмпирическую модовую декомпозицию (EMD) для разложения сигнала на внутренние модовые функции (IMF):

$$x(t) = \sum_{i=1}^M c_i(t) + r(t), \quad (15)$$

Для каждой IMF применяется преобразование Гильберта:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (16)$$

что дает аналитический сигнал $z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)]$, из которого извлекаются амплитуда $a_i(t) = |z_i(t)|$ и частота $f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arg(z_i(t))$.

Преимущества: адаптивность к нестационарным сигналам, высокое разрешение.

Недостатки: высокая вычислительная сложность, чувствительность к шуму.

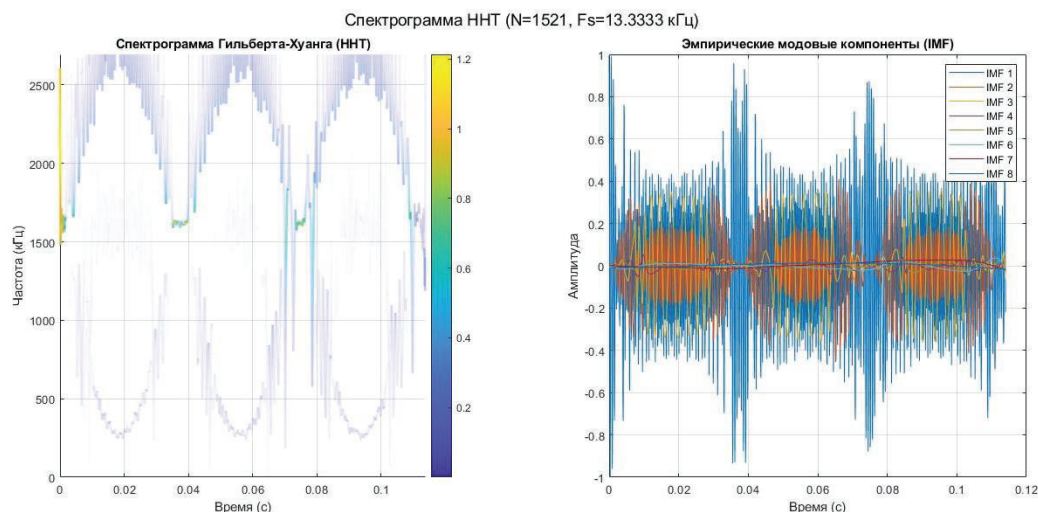


Рис. 3. Спектрограмма Гильберта – Хуанга
Fig. 3. The Hilbert-Huang spectrogram

Кепстральный анализ

Кепстр вычисляется как [Белов и др., 2020]:

$$c[n] = F^{-1}\{\log(|F\{x[n]\}| + \epsilon)\}. \quad (17)$$

Используется скользящее окно (150 отсчетов, перекрытие 30 отсчетов).

Преимущества: эффективность для выявления периодичностей.

Недостатки: ограниченная применимость для микродоплеровских сигналов.

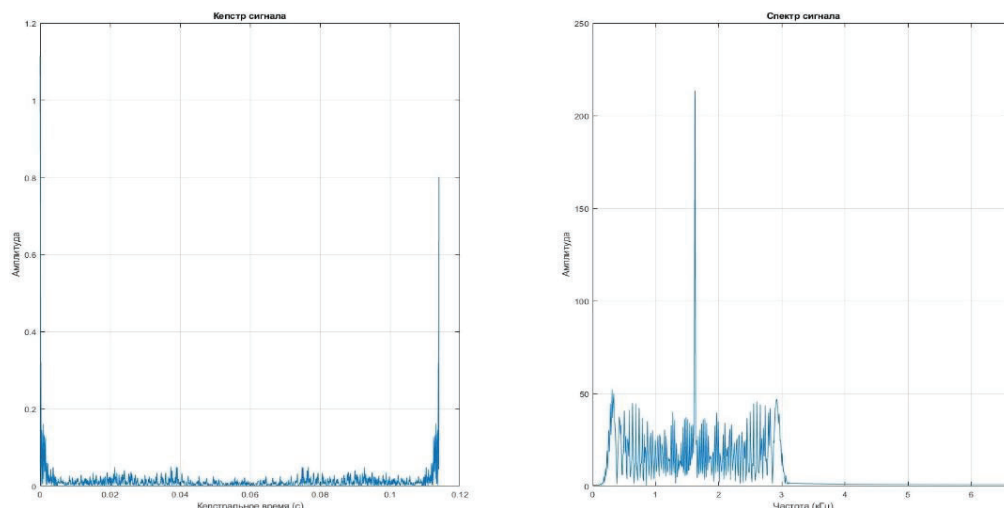


Рис. 4. Кепстральное представление сигнала
Fig. 4. Cepstral representation of the signal

Вейвлет-преобразование (CWT и DWT)

Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) [Chen, Maynard, Ahma, 2013; Henry, 2017]:

$$W(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad (18)$$

где, ψ – вейвлет-функция.

Дискретное вейвлет-преобразование (DWT) разлагает сигнал на коэффициенты с использованием вейвлета Добеши и разложением на 6 уровней [Chen, Maynard, Ahma, 2013; Henry, 2017]

$$a_j[k] = \sum_n x[n] \phi_{j,k}[n], \quad d_j[k] = \sum_n x[n] \psi_{j,k}[n], \quad (19)$$

где $a_j[k]$ – коэффициенты аппроксимации (низкочастотные компоненты), $d_j[k]$ – коэффициенты детализации (высокочастотные компоненты), $\phi_{j,k}[n]$ – масштабирующая функция, $\psi_{j,k}[n]$ – вейвлет-функция, j – уровень разложения, k – индекс сдвига.

Преимущества: гибкое разрешение (CWT), эффективность при небольшом количестве доминирующих частот (DWT).

Недостатки: высокая вычислительная сложность (CWT), фиксированные частотные полосы (DWT).

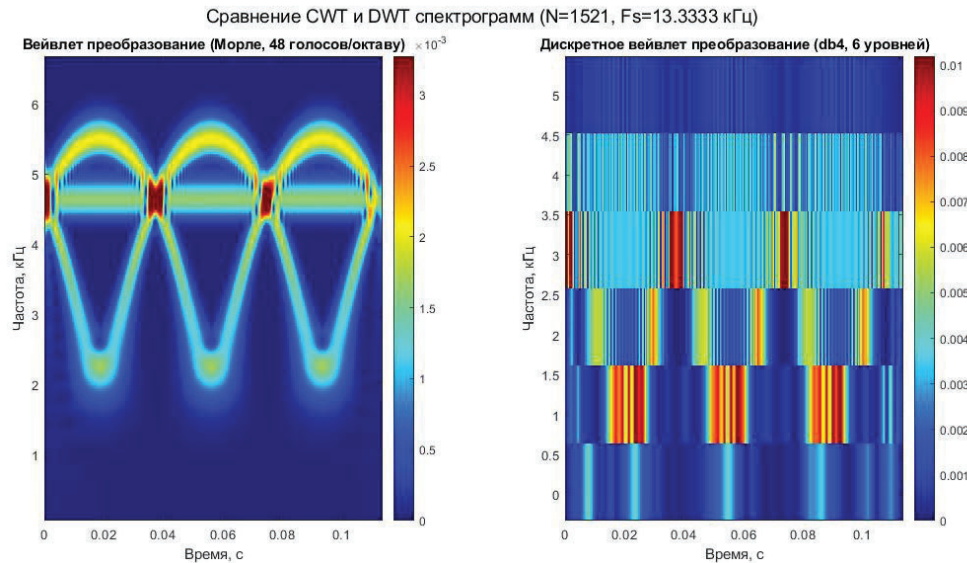


Рис. 5. Спектрограммы непрерывного и дискретного вейвлет преобразования
Fig. 5. Spectrograms of continuous and discrete wavelet transformations

Распределение Вигнера – Вилле (WVD)

WVD определяется как:

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (20)$$

где $x(t)$ – анализируемый сигнал, $x^*(t)$ – комплексное сопряжение сигнала, τ – временной сдвиг.

Сглаженная версия использует окна Ханна и Кайзера, определяемые как произведение $h(t)$:

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (21)$$

Преимущества: высокое разрешение во времени и частоте.

Недостатки: помехи от перекрестных членов, высокая вычислительная сложность.

Для нестационарного микроплеровского сигнала КВПФ и ННТ эффективно визуализируют динамику частот, CWT обеспечивает гибкость, а WVD – высокое разрешение, но требует подавления перекрестных членов. БПФ подходит для базового анализа, а кепстральный анализ менее применим.

Выводы и заключение

Каждый из рассмотренных методов спектрального анализа имеет свои сильные и слабые стороны, что делает их применимыми в различных сценариях радиолокационного анализа. Преобразование Фурье является базовым и эффективным для стационарных сигналов, в то время как вейвлет-преобразование и преобразование Гильберта – Жуанга лучше подходят для

нестационарных сигналов. Кепстральный анализ полезен для разделения компонентов сигнала, а преобразование Вигнера – Вилле обеспечивает высокое разрешение, но требует осторожности из-за кросс-термов. Выбор метода зависит от конкретной задачи, характеристик сигнала и доступных вычислительных ресурсов.

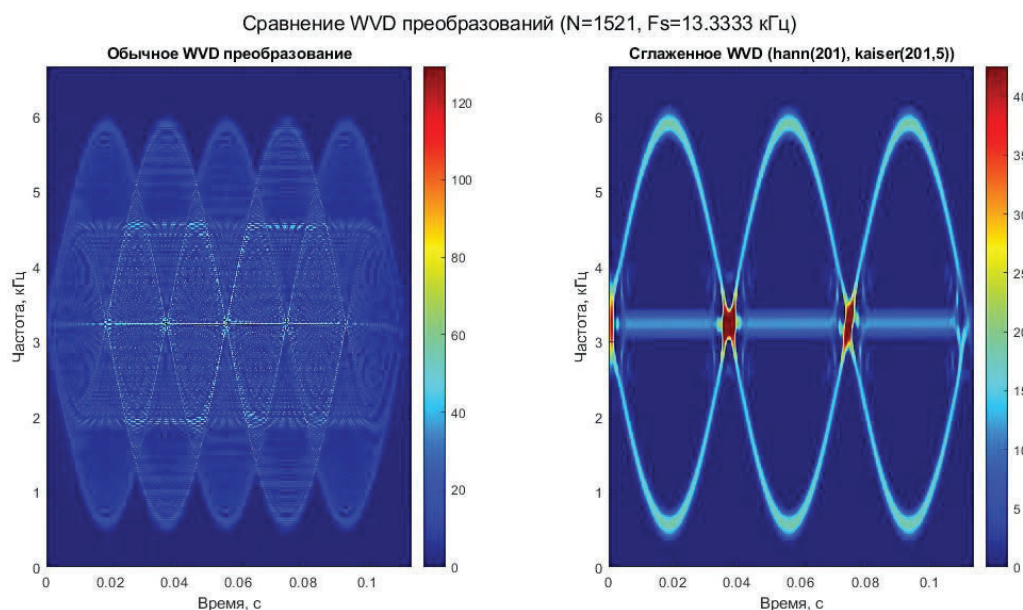


Рис. 6. Спектрограммы классического и сглаженного преобразования Вигнера – Вилле
Fig. 6. Spectrograms of the classical and smoothed Wigner-Ville transformations

Список литературы

- Вишвакарма С., Рам С.С. 2018. Изучение словаря с низкой вычислительной сложностью для классификации микродплеров человека на нескольких несущих частотах. *IEEE Access*, 6: 29793–29805.
- Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. 2020. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. М.: Горячая линия – Телеком, 640 с.
- Марпл-мл. С.Л. 2020. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 584 с.
- Радзиевский В.Г., Сиверс А.П. 2020. Теория и техника радиолокационных измерений. М.: Радиотехника, 320 с.
- Сергиенко А.Б. 2021. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 1024 с.
- Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М. 2019. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 784 с.
- Степанов О.А. 2019. Обработка радиолокационных сигналов на фоне помех. М.: Радиотехника, 488 с.
- Тихонов В.И., Харисов В.Н. 2018. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 608 с.
- Чен В. 2021. Микродплеровский эффект в радиолокации. М.: Техносфера, 424 с.
- Чен Х., Хуан Ю., Гуан Дж., Хэ Ю. 2017. Обнаружение и извлечение радиолокационного микродплеровского сигнала с помощью кратковременного дробного преобразования Фурье. Международная конференция по радиолокационным системам (Radar 2017). Международный технологический университет, 4: 1–4.
- Эрол Б., Амин М.Г., Гурбуз С.З. 2018. Автоматическое проектирование цепстральных объектов с частотным искажением данных для классификации микродплеров. *Труды IEEE по аэрокосмическим и электронным системам*, 4: 1724–1738.

References

- Vishwakarma S., Ram S.S. 2018. Learning a Low-Computational Complexity Dictionary for Classifying Human Micro-Dopplers at Multiple Carrier Frequencies. *IEEE Access*, 6: 29793–29805 (in Russian).
- Goryainov V.T., Zhuravlev A.G., Tikhonov V.I. 2020. Statistical Radio Engineering: Examples and Problems. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom, 640 p (in Russian).



- Marple Jr. S.L. 2020. Digital Spectral Analysis and Its Applications. Moscow: Mir, 584 p (in Russian).
- Radzievskiy V.G., Sivers A.P. 2020. Theory and Technology of Radar Measurements. Moscow: Radio Engineering, 320 p (in Russian).
- Sergienko A.B. 2021. Digital Signal Processing. St. Petersburg: Piter, 1024 p (in Russian).
- Solonin AI, Ulakhovich DA, Arbuzov SM 2019. Algorithms and processors for digital signal processing. SPb.: BHV-Petersburg, 784 p (in Russian).
- Stepanov OA 2019. Processing radar signals against the background of interference. Moscow: Radio Engineering, 488 p (in Russian).
- Tikhonov V.I., Kharisov V.N. 2018. Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: Radio and Communications, 608 p (in Russian).
- Chen W. 2021. Micro-Doppler effect in radar. Moscow: Technosfera, 424 p (in Russian).
- Chen H., Huang Y., Guan J., He Y. 2017. Detection and extraction of radar micro-Doppler signal using short-term fractional Fourier transform. International Conference on Radar Systems (Radar 2017). International University of Technology, 4: 1–4 (in Russian).
- Erol B., Amin M.G., Gurbuz S.Z. 2018. Automatic Design of Zeptral Objects with Frequency Distortion Data for Micro-Doppler Classification. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 4: 1724–1738 (in Russian).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 17.04.2025

Поступила после рецензирования 25.05.2025

Принята к публикации 04.06.2025

Received April 17, 2025

Revised May 25, 2025

Accepted June 04, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесников Юрий Дмитриевич, ведущий специалист, ООО «АйТи Бизнес Консалтинг», г. Санкт-Петербург, Россия

Заливин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Александров Виталий Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Белгородский университет кооперации, экономики и права, г. Белгород, Россия

Федорова Надежда Владимировна, старший преподаватель кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri D. Kolesnikov, Leading specialist, I.T. Business Consulting LLC, St. Petersburg, Russia

Alexander N. Zalivin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Vitaly V. Alexandrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Security, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russia

Nadezhda V. Fedorova, Senior Lecturer at the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia