

УДК 621.396:681.34

**О. Г. ВЬЮНИЦКИЙ, А. А. БОРОДАВКО, А. В. ТОЦКИЙ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **НОВЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ЖЕСТОВ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗ ОЦЕНКИ БИСПЕКТРА РАДИОСИГНАЛА**

*Предложен новый метод распознавания жестов человека в электромагнитном поле высокочастотного (ВЧ) радиоизлучения. Метод основан на извлечении информативных признаков с помощью оценивания биспектра огибающей ВЧ радиосигнала, параметры которого меняются под воздействием жестов в интерференционном поле радиоизлучения в замкнутом пространстве. Экспериментально исследованы показатели устойчивости биспектральных информативных признаков: представлены результаты экспериментальных исследований, выполненные на измерительном устройстве с использованием разработанных алгоритма и компьютерной программы. Результаты, полученные для серии тестовых жестов, показывают, что предлагаемый метод не зависит от вариаций амплитуды сигналов и времени задержки обрабатываемых сигналов, метод достаточно хорошо реагирует на изменение формы сигналов, однако сильно зависит от длительности обрабатываемого сигнала.*

**Ключевые слова:** радиоизлучение, огибающая высокочастотного радиосигнала, оценка биспектра, система распознавания и классификации жестов.

### **Введение**

В последнее десятилетие за рубежом ведутся интенсивные исследования в области разработки методов и создания систем распознавания и классификации движений человека, включая различные жесты. Развитие современных методов цифровой обработки сигналов вместе с прогрессом в области средств вычислительной техники позволяют исследователям решать новые задачи по обнаружению сигналов на фоне интенсивных помех, различению сигналов, распознаванию и классификации образов на основе анализа. Особый интерес в этом научном направлении представляют исследования с использованием взаимодействия движений руки с электромагнитным полем легкодоступного в настоящее время радиоизлучения – широко применяемого в Wi-Fi и FM радиосистемах, а также в системах мобильной связи и системах телевидения [1 – 3]. Предварительные экспериментальные результаты показывают, что при определенном типе движения руки человека данная система будет способна, например, дистанционно управлять уровнем громкости музыкального центра, когда пользователь находится на определенном удалении, в частности, находясь за препятствием – стеной [4]. Системы распознавания и классификации жестов человека перспективны в будущем в таких приложениях как: автоматизация

управления бытовыми приборами (современный «умный дом»); создание нового типа бесконтактного компьютерного интерфейса; бесконтактное управление водителем автомобиля устройствами мультимедиа в салоне автомобиля. Усилия исследователей, работающих в области практического создания подобного рода систем, направлены в настоящее время на разработку таких методов обработки сигналов, которые позволяют выделить класс устойчивых информативных признаков. В этой связи зарубежными исследователями ведутся интенсивные попытки оценивания устойчивости таких информативных параметров огибающей радиосигнала, как амплитуда и доплеровский сдвиг частоты при воздействии на радиоизлучение движений руки человека [1 – 3]. Существенным недостатком данной стратегии является низкая помехоустойчивость и влияние на точность распознавания жестов большого динамического диапазона изменений амплитуды огибающей несущего колебания при воздействии движений руки человека, наблюдаемые в интерференционном поле в замкнутом пространстве. Для тех процессов, у которых спектральные компоненты статистически независимы, оценка энергетического спектра является исчерпывающей характеристикой при традиционном некогерентном спектрально-корреляционном анализе поведения и свойств таких процессов.

В практических условиях многолучевости и интерференции, характерных для распространения электромагнитных волн в замкнутом пространстве, расстояние от пользователя до излучателя может изменяться в широких пределах. В результате, амплитуда радиосигнала и отношение сигнал-помеха соответственно меняются в широких пределах.

Цель настоящей статьи заключается в разработке нового биспектрального метода выделения информативных признаков, который позволяет улучшить помехоустойчивость системы распознавания и классификации жестов человека, а значит – повысить вероятность распознавания жестов.

Поставленная цель достигается с помощью выделения нового класса признаков распознавания и классификации жестов в биспектральной области и использования свойств биспектра. Предлагаемый подход позволяет обеспечить устойчивость информативных признаков к изменчивой нестационарной помеховой обстановке и, следовательно, улучшить вероятность распознавания и классификации жестов в условиях нестационарного изменения параметров обрабатываемого сигнала.

Отметим, что в принятом радиосигнале, кроме информационной компоненты, которая содержит полезные данные про жест человека, присутствует также искажающий вклад помехи, включая: нормальный аддитивный шум (окружающий фоновый шум и электрический шум на входе приемного устройства), интерференционные помехи, случайные временные задержки радиосигналов, и случайные вариации амплитуды сигнала. Такая помеховая обстановка обусловлена практическими условиями и особенностями распространения радиоволн в замкнутом пространстве. В этих условиях предлагается применить биспектральную стратегию обработки сигналов, которая позволяет выделить на фоне отмеченных помех только вклады тех полезных спектральных доплеровских компонент, которые имеют определенные частотно-фазовые связи, связанные с воздействием на радиосигнал жестов. В то же самое время, те вклады спектральных компонент помехи, которые не имеют частотно-фазовых связей, будут подавлены в оценке биспектра [5]. Перспективность предлагаемого подхода основана на следующих свойствах биспектра, подробно описанных в работе [6]:

- 1) оценка биспектра помехи с нормальным законом плотности распределения вероятностей и нулевым средним значением стремится к нулю;
- 2) оценка биспектра инвариантна к случайным и нестационарным временным задержкам обрабатываемого сигнала;
- 3) поскольку выделение информативного признака происходит путем оценки фазового биспектра,

предлагаемый новый биспектральный информативный признак не зависит от амплитуды обрабатываемого сигнала.

### Экспериментальные исследования устойчивости биспектральных информативных признаков классификации жестов

Величину предлагаемого нового информативного признака  $P(\alpha)$  распознавания и классификации жестов человека предлагается рассчитывать при помощи формулы вида:

$$P(\alpha) = \arctan\left[\frac{I_i(\alpha)}{I_r(\alpha)}\right], \quad (1)$$

где  $\dot{I}(\alpha) = I_r(\alpha) + jI_i(\alpha) = \int_{f_1=0+}^{1/\alpha} \dot{B}(f_1, \alpha f_2) df_1$ ;

$\dot{B}(f_1, \alpha f_2)$  - оценка биспектра, которую формируют в сечении на бичастотной плоскости под определенным углом наклона, равным  $\alpha$ ;

$f_2 = \alpha f_1$ ,  $f_1$  и  $f_2$  - частоты сигнала.

Комплексная функция двух частотных переменных  $\dot{B}(f_1, f_2)$  - оценка биспектра обрабатываемого сигнала, равная согласно [6]:

$$\dot{B}(f_1, f_2) = \langle \dot{X}(f_1) \dot{X}(f_2) \dot{X}^*(f_1 + f_2) \rangle, \quad (2)$$

где  $\langle \dots \rangle$  означает процедуру статистического усреднения по ансамблю наблюдаемых реализаций;

$\dot{X}(f)$  - результат преобразования Фурье наблюдаемой реализации  $x(t)$  на входе системы обработки сигналов.

Для оценки работоспособности предлагаемого метода исследовалась устойчивость биспектрального информативного признака (1) по отношению к изменчивости параметров обрабатываемого сигнала. Было выполнено компьютерное моделирование и проведен ряд тестовых экспериментов на измерительном макете, которые описаны ниже.

*Первый эксперимент:* исследование зависимости поведения биспектрального информативного признака  $P(\alpha)$  (1) от формы модели сигнала.

*Второй эксперимент:* исследование зависимости параметра  $P(\alpha)$  от вариаций амплитуды модели входного сигнала.

*Третий эксперимент:* исследование зависимости параметра  $P(\alpha)$  от параметров обрабатываемого сигнала.

*Четвертый эксперимент:* эксперимент, выполненный на реальном макете, с использованием генератора радиосигналов на несущей частоте, равной 2 ГГц, рамочной антенны, подключенной через интегрирующую цепочку ко входу цифрового ос-

циллографа типа DS1052E. Назначение интегрирующей цепочки – выделение огибающей ВЧ радиосигнала. В рамках четвертого эксперимента исследовалось воздействие на параметры радиосигнала жеста руки типа «сверху вниз».

*Пятый эксперимент:* исследовалось воздействие движения руки типа «снизу вверх».

*Шестой эксперимент:* исследование движения руки типа «хлопок».

Как видно из данных таблицы 1, величина признака  $P(\alpha)$ , рассчитанная по формуле (1), *зависит от формы сигнала и инвариантна* в отношении инвертирования сигнала: величина  $P(\alpha)$  одинакова для сигнала и его инвертированной реплики.

Как видно из данных таблицы 2, признак  $P(\alpha)$  инвариантен по отношению к величине амплитуды обрабатываемого сигнала.

Как видно из данных таблицы 3, величина признака  $P(\alpha)$  зависит от длительности импульса, причем диапазон вариаций информативного параметра  $P(\alpha)$  довольно большой.

Таблица 1

Результаты эксперимента 1

Форма импульса	Прямоугольная	Пилообразная	Треугольная
$P(\alpha)$	- 0,3	0,8	- 0,0113
Форма импульса	Инвертированная реплика	Инвертированная реплика	Инвертированная реплика
$P(\alpha)$	- 0,3	0,8	- 0,0113

Таблица 2

Результаты эксперимента 2

Сигнал	Амплитуда сигнала = 1	Амплитуда сигнала = 3
1 Прямоугольный импульс	$P(\alpha) = - 0,3$	$P(\alpha) = - 0,3$
2 Пилообразный импульс	$P(\alpha) = 0,8$	$P(\alpha) = 0,8$
3 Треугольный импульс	$P(\alpha) = - 0,0113$	$P(\alpha) = - 0,0113$

Таблица 3

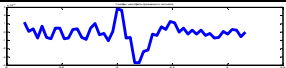
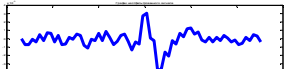
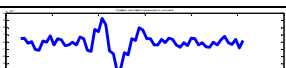
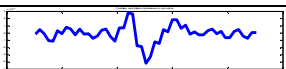

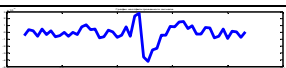
Результаты эксперимента 3

Импульс	Длительность импульса = 20 отсчетов	Длительность импульса = 40 отсчетов
1 Прямоугольный импульс	$P(\alpha) = 1,6$	$P(\alpha) = - 1,4$
2 Пилообразный импульс	$P(\alpha) = 0,8$	$P(\alpha) = 0,4$
3 Треугольный импульс	$P(\alpha) = - 0,0113$	$P(\alpha) = 0,43$

*Четвертый эксперимент* выполнен в практических условиях оценки параметров радиосигнала при их изменении под воздействием тестовых движений руки человека. В качестве источника радиосигнала использовался ВЧ генератор, к выходу которого подключена передающая антенна, а на приемном устройстве применялась рамочная антенна и интегрирующая RC цепочка, подключенная ко входу цифрового осциллографа, на котором проводилась регистрация и запоминание тестовых сигналов (табл. 4)

Таблица 4

Результаты эксперимента 4

Тип движения на рис. 1	Форма огибающей	$P(\alpha)$
Движение 1		0,2
Движение 2		0,3
Движение 3		0,2
Движение 4		0,4
Движение 5		0,4
Движение 6		1,0

Данные с осциллографа записывались в файл в виде массива чисел, которые затем обрабатывались в среде Matlab с помощью специально разработанной компьютерной программы биспектральной обработки сигналов. В рамках 4-го эксперимента исследовалась последовательность нескольких тестовых движений руки типа «сверху вниз» (рис. 1). Было выделено по очереди каждый отдельный жест типа «сверху вниз», а затем для каждого жеста было рассчитано значение параметра  $P(\alpha)$  в соответствии с (1).

Как видно из таблицы 4, предлагаемый метод для одного и того же движения, повторенного шесть раз подряд, дает достаточно близкие значения  $P(\alpha)$ . Это свидетельствует о довольно хорошей повторяемости предлагаемого биспектрального признака распознавания и классификации жестикуляции.

*В пятом эксперименте* исследовались тестовые жесты типа «снизу вверх» (рис. 2).

Результаты, полученные для разных типов жестов, подтверждают робастные свойства нового биспектрального признака классификации жестов человека.

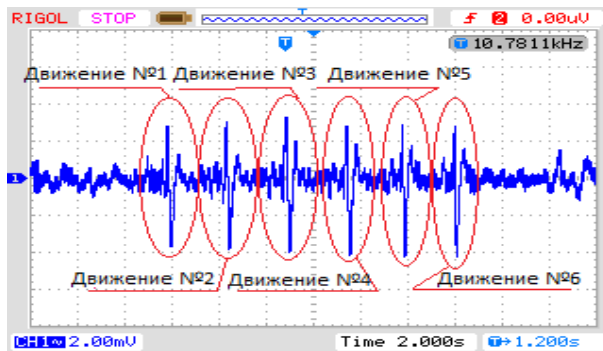


Рис. 1. Сигнал, содержащий последовательность движений руки типа «сверху вниз»

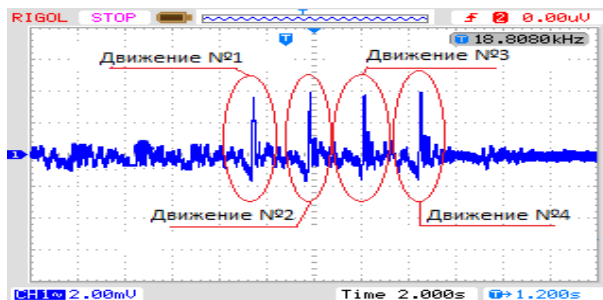


Рис. 2. Сигнал, содержащий последовательность движений руки типа «снизу вверх»

- Движение 1 -  $P(\alpha) = 0,1$ ;  
 Движение 2 -  $P(\alpha) = -0,2$ ;  
 Движение 3 -  $P(\alpha) = -0,2$ ;  
 Движение 4 -  $P(\alpha) = -0,195$ .

В шестом эксперименте исследовались тестовые жесты типа «хлопок» (рис. 3).

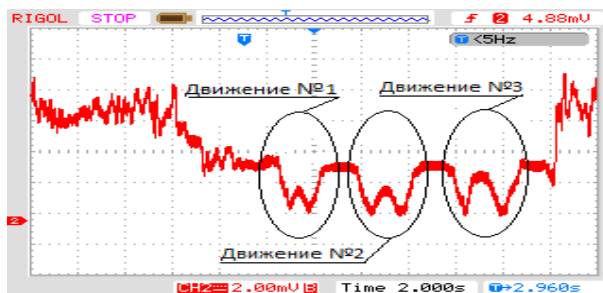


Рис. 3. Сигнал, содержащий последовательность движений руки типа "хлопок"

- Движение 1 -  $P(\alpha) = 0,1223$ ;  
 Движение 2 -  $P(\alpha) = 0,218$ ;  
 Движение 3 -  $P(\alpha) = 0,2623$ .

## Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований показателей нового метода распознавания жестов с использованием биспектральной

стратегии выделения классификационных признаков. Результаты исследований показывают, что предлагаемый метод не зависит от вариаций амплитуды сигналов и времени их задержки, достаточно хорошо реагирует на изменение формы сигналов, однако сильно зависит от длительности сигнала. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает достаточно близкие по величине значения информативного признака для серии одинаковых жестов и предлагаемый биспектральный метод отличается хорошей ортогональностью и робастностью информативных признаков для разных типов тестовых жестов.

## Литература

1. Adib, F. See through walls with Wi-Fi [Text] / F. Adib, D. Katabi // Proc. ACM Special Interest Group on Data Commun. Conf., Hong Kong, China. – Aug. 2013. – P. 75-86.
2. Kellog B. Bringing gesture recognition to all devices [Text] / B. Kellog, V. Talla, S. Gollacota // Proc. 11<sup>th</sup> USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation, NSDI'14, USENIX Berkeley, CA, USA. – 2014. – P. 303-316.
3. Tang, Mu-Cyun. Human gesture sensor using ambient wireless signals based on passive radar technology [Text] / Mu-Cyun Tang, Fu-Kang Wang, Tzyy-Sheng Horng // Proc. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, Arizona, USA, 17-22 May, 2015. – P. 1376-1379.
4. What is WiSee? [Electronic resource]: WiSee, website. – Access mode: <http://wiseen.cs.washington.edu>. – 30.05.2016.
5. Totsky, A. V. Bispectral methods of signal processing [Text] / A. V. Totsky, A. A. Zelensky, V. F. Kravchenko // Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston, 2015. – 199 p.
6. Nikias, C. L. Bispectral estimation: A digital signal processing framework [Text] / C. L. Nikias, M. R. Raghuvee // Proc. IEEE. – 1987. – Vol. 75, No. 7. – P. 869-891.

## References

1. Adib, F., Katabi, D. See through walls with Wi-Fi. Proc. ACM Special Interest Group on Data Commun. Conf., Hong Kong, China, Aug. 2013, pp. 75 - 86.
2. Kellog, B., Talla, V., Gollacota, S. Bringing gesture recognition to all devices. Proc. 11<sup>th</sup> USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation, NSDI'14, USENIX Berkeley, CA, USA, 2014, pp. 303 - 316.
3. Tang, Mu-Cyun, Wang, Fu-Kang, Horng, Tzyy-Sheng, Human gesture sensor using ambient wireless signals based on passive radar technology. Proc. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, Arizona, USA, 17-22 May 2015, pp. 1376 - 1379.

4. *What is WiSee?* Available at: <http://wisee.cs.washington.edu> (accessed 30.05.2016).

5. Totsky, A. V., Zelensky, A. A., Kravchenko, V. F. *Bispectral methods of signal processing*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston, 2015, 199 p.

6. Nikias, C., Raghuvue, C. Bispectral estimation: A digital signal processing framework. *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 7, 1987, pp. 869 - 891.

*Поступила в редакцію 10.11.2016, рассмотрена на редколлегии 09.12.2016*

## НОВИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЖЕСТИВ НА ОСНОВІ ВИДІЛЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК З ОЦІНКИ БІСПЕКТРУ РАДІОСИГНАЛУ

*О. Г. В'юницький, О. А. Бородавко, О. В. Тоцький*

Запропоновано новий метод розпізнавання жестів людини в електромагнітному полі високочастотного (ВЧ) радіовипромінювання. Метод засновано на виділенні інформативних ознак за допомогою оцінювання біспектру обвідної ВЧ радіосигналу, параметри якого змінюються під впливом жестів в інтерференційному полі радіовипромінювання у замкнутім просторі. Експериментально досліджено показники стійкості інформативних ознак: надано результати досліджень, що виконано на вимірному пристрої з використанням розроблених алгоритму та програми. Результати, які отримано для низки тестових жестів, показують, що запропонований метод не залежить від варіацій амплітуди та затримки сигналів, метод достатньо добре реагує на зміну форми сигналу, але сильно залежить від тривалості сигналу.

**Ключові слова:** радіовипромінювання, обвідна високочастотного радіосигналу, оцінка біспектру, система розпізнавання і класифікації жестів.

## NOVEL GESTURES RECOGNITION AND CLASSIFICATION TECHNIQUE BASED ON EXTRACTION THE INFORMATION FEATURES FROM BISPECTRAL ESTIMATE OF RADIO SIGNAL

*O. G. Viunyt'skyi, O. A. Borodavko, A. V. Totsky*

Novel technique dedicated for human gesture recognition and classification in electromagnetic field of radio-frequency radiation is suggested. Proposed technique is based on extraction of information features by using bispectrum estimation evaluated for high-frequency signal envelope with varied parameters caused by influence of gesture and performed in the interference electromagnetic field in closed space. Robustness performance for information features is experimentally studied by using designed algorithm and software. Obtained results demonstrate that performance of suggested technique depends on signal magnitude and signal delay variations. Technique is sensitive to the signal shape however it largely depends on the signal duration.

**Key words:** radio-frequency radiation, envelope of high-frequency radio signal, gesture recognition and classification system.

**В'юницький Олег Геннадієвич** – студент кафедри приёма, передачі и обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковський авіаційний інститут», Харків, Україна. e-mail: Leshauhrin@gmail.com.

**Бородавко Алексей Андреевич** – студент кафедри приёма, передачі и обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковський авіаційний інститут», Харків, Україна. e-mail: Lasha.borodavko@mail.ru.

**Тоцький Александр Владимирович** – д-р техн. наук, професор кафедри приёма, передачі и обробки сигналів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковський авіаційний інститут», Харків, Україна. e-mail: Totskiyalexander@gmail.com.

**Viunyt'skyi Oleh Gennadiyevich** – student department of reception, transmission and signal processing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. e-mail: Leshauhrin@gmail.com.

**Borodavko Oleksii Andreevich** – student department of reception, transmission and signal processing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. e-mail: Lasha.borodavko@mail.ru.

**Totsky Aleksandr Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of reception, transmission and signal processing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. e-mail: Totskiyalexander@gmail.com.