

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пащенко¹, В.М. Илюшко², А.С. Фатеев¹, Д.О. Цюпак¹¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

РАСПОЗНАВАНИЕ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Рассмотрена возможность использования величины фрактальной размерности в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа. Показано, что значения фрактальных размерностей сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличаются от значений фрактальных размерностей фоновых сигналов. Однако при зондировании зависящего и движущегося БПЛА величины фрактальных размерностей сигналов практически не отличаются. Установлено, что различие в характере движения БПЛА можно определить по протяженности и периодичности появления наименьших фрактальных размерностей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, распознавание БПЛА, фрактальная размерность.

Постановка проблемы и анализ литературы

В последнее время значительно расширился парк беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). С их помощью решаются разнообразные задачи, как в военной, так и в гражданской сфере. БПЛА, благодаря малым габаритам, а также использованию при их конструировании пластмасс, стекловолокна, пенопласта, картона и других слабоотражающих электромагнитные волны материалов, имеют небольшую эффективную отражающую способность. В результате этого применение радиолокационных средств для их обнаружения и распознавания значительно усложняется. Кроме того, для движения БПЛА используют маломощные и практически бесшумные двигатели. Это значительно снижает эффективность их распознавания с использованием визуальных и инфракрасных средств.

Экспериментальное исследование отраженных сигналов от движущихся объектов показывает, что различная сложность движения приводит к различным формам сигнала, то есть анализируемый сигнал имеет флуктуации за счет изменения частоты, фазы и амплитуды отраженного сигнала.

В последнее время для анализа сигналов, имеющих сложную форму, используют фрактальный метод анализа временных рядов [1 – 3].

Характер флуктуаций отраженного сигнала определяется характером движения объекта, а степень флуктуаций может быть описана с помощью характеристического коэффициента – фрактальной размерности D . Фрактальная размерность (ФР), как правило, является положительным нецелым числом, которое отображает, некоторым образом, сложность формы сигнала. При двумерном представлении принимаемого сигнала, величина фрактальной раз-

мерности лежит в пределах $1,0 < D < 2,0$ [4]. Большому значению ФР соответствует большая степень заполнения плоскости. Для гладких сигналов ФР будет близка к единице $D = 1,0$, то есть практически совпадает с топологической размерностью линии, а для изрезанных сигналов, которые заполняют всю плоскость, – $D = 2,0$ (практически совпадают с топологической размерностью плоскости).

Расчет ФР исходного временного ряда позволяет проанализировать сложность (форму) отраженных сигналов. Как уже отмечалось формы отраженных сигналов от движущихся объектов имеют различную сложность, т.е. величина ФР, которая характеризует эту сложность, также будет зависеть от типа движущегося объекта, что может быть использовано при их распознавании.

Цель статьи: рассмотреть возможность использования величины фрактальной размерности в качестве признака распознавания БПЛА.

Краткое описание эксперимента

Для проведения исследований была развернута экспериментальная установка (рис. 1) на базе когерентно импульсной РЛС 1РЛ133 "Кредо" сантиметрового диапазона (простой сигнал, $\lambda = 2$ см, $\tau_n = 0,4$ мкс) [5].

Для сохранения полученной информации с целью ее последующей обработки использовались аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер (ПЭВМ). В качестве объекта исследований использовался БПЛА мультироторного типа с тремя винтами, разработанный в ООО "КБ АВИА" Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" [6]. Сотрудники ООО "КБ АВИА" осуществляли полеты в месте проведения исследований.

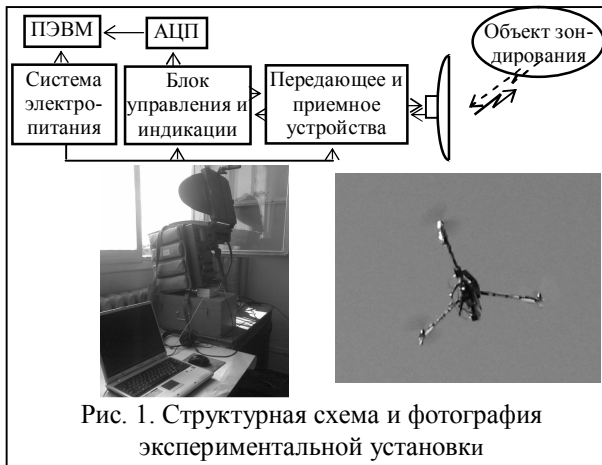


Рис. 1. Структурна схема та фотографія експериментальної установки

Експериментальні дослідження складалися з двох етапів. На першому етапі здійснювався політ БПЛА і проводилося його зондування з допомогою РЛС 1РЛ133 “Кредо”. Сигнал з вихода фазового детектора (головних телефонів) записувався з допомогою АЦП в пам'ять комп'ютера. При цьому розглядалось два види руху БПЛА – зависання (на висоті 20 м) і рух (на висоті 30 м) БПЛА в напрямку до РЛС і від неї.

На другому етапі проводився візуальний аналіз записаних сигналів і їх комп'ютерна обробка (рахунок ФР) для розв'язання задачі розпізнавання БПЛА. Для аналізу сигналів вихідний часовий ряд оброблявся з допомогою “скачущого вікна”, розміри “вікна” і величина “скачка” рівнялись 10 000 точок, що відповідає 0,5 секунди записаного сигналу. Для кожного положення “вікна” розраховувалась ФР з допомогою спеціальної програми для розрахунку ФР сигналів і фазових портретів. Фрактальна розмірність визначалась з використанням методу покриття [4].

Розрахунок фрактальних розмірностей сигналів, відбитих від фону

Записаний сигнал з вихода головних телефонів при зондуванні фону мав довжину часового ряду рівну 330 800 точкам, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідає 15,0 секундам. На рис. 2, а показано весь записаний сигнал, а на рис. 2, б і в – часові реалізації (довжиною 10 000 точок) сигналів для 11-го і 12-го положень “вікна”. При цьому в 11-ом “вікні” спостерігався сигнал, в якому крім фону присутні відбиття від рухомих людей (операторів, керуючих польотом БПЛА), а в 12-м “вікні” – тільки фон. На зображеннях фонових сигналів по осі абсцис відкладено номери точок записаного сигналу (I), а по осі ординат його амплітуда (Y).

Як видно з аналізу даних, показаних на рис. 2, часові структури сигналів, записаних з вихода головних телефонів РЛС, при зондуванні

фону мають вигляд промодульованих по амплітуді, частоті і фазі синусоїд. Синусоїдальний характер сигналу обумовлений його модуляцією джерелом живлення, а модуляція по амплітуді, частоті і фазі характеризує безпосередньо вплив фону (подстилююча поверхня, рух дерев під впливом вітру, переміщення людей на трасі зондування і т.д.).

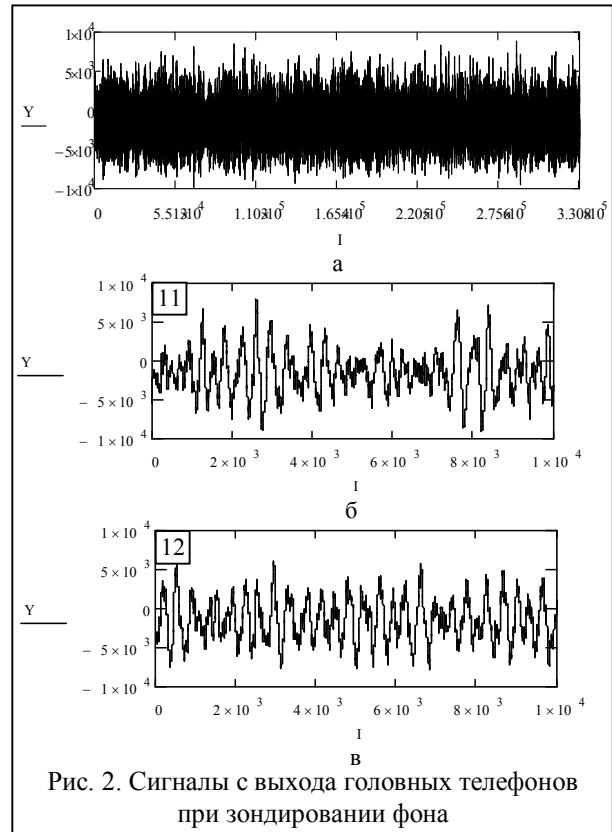


Рис. 2. Сигнали з вихода головних телефонів при зондуванні фону

Необхідно відзначити (див. рис. 2, б і в), що часові реалізації сигналів, відбитих від чистого фону, практично не відрізняються від сигналів, які характеризують і фон і рух людини, т.е. по часовим реалізаціям провести аналіз особливостей фону не представляється можливим.

Таким чином, візуальний аналіз часових реалізацій фонових сигналів не дозволяє визначити, коли сигнал модулюється тільки фоном, а коли фоном, і рухами людини.

Для розв'язання задачі аналізу фонових сигналів цілком доцільно розрахувати ФР і по їх величинам оцінити складність відбитих сигналів.

В табл. 1 наведено значення ФР при “вікновому” аналізі записаного сигналу, наведеного на рис. 2, а (всього 33 значення, так як довжина часового ряду дорівнює 330 800 точкам). Як видно з аналізу даних табл. 1, величини ФР сигналів в 2-м, 4-м, 12-м, 13-м, 15-м, з 17-го по 20-е, а також в 31-м і 33-м “вікнах” (відповідно, $D_2 = 1,8906$,

$D_4 = 1,8858$, $D_{12} = 1,8929$, $D_{13} = 1,8934$, $D_{15} = 1,8923$, $D_{17} = 1,8966$, $D_{18} = 1,8860$, $D_{19} = 1,8866$, $D_{20} = 1,8843$, $D_{31} = 1,8848$ и $D_{33} = 1,8904$) обусловлены только фоном.

При этом значения ФР изменяются в пределах приблизительно от $D = 1,885$ до $D = 1,895$, т.е. среднее значение ФР близко $D_{cp} \approx 1,89$.

Таблица 1

Величины ФР фонового сигнала

Номер "окна"	Значение ФР	Номер "окна"	Значение ФР
1	1,8854	18	1,8860
2	1,8906	19	1,8866
3	1,8752	20	1,8843
4	1,8858	21	1,8802
5	1,8796	22	1,8820
6	1,8641	23	1,8608
7	1,8574	24	1,8688
8	1,8797	25	1,8766
9	1,8766	26	1,8819
10	1,8702	27	1,8798
11	1,8647	28	1,8700
12	1,8929	29	1,8602
13	1,8934	30	1,8796
14	1,8754	31	1,8848
15	1,8923	32	1,8795
16	1,8738	33	1,8904
17	1,8966		

В тоже время значения ФР сигналов в которых преобладает движение людей (соответственно, $D_7 = 1,8574$, $D_{11} = 1,8647$, $D_{23} = 1,8608$ и $D_{29} = 1,8602$, отмечены в таблице серым фоном), колеблются около значения $D_{cp} \approx 1,86$. В остальных "окнах" ФР изменяется в пределах приблизительно от $D = 1,865$ до $D = 1,885$, т.е. можно сказать, что в этих "окнах" сигнал обусловлен и фоном, и движением людей. При этом в "окнах", в которых ФР ближе к $D = 1,865$ преобладают отражения от движущихся людей, а в "окнах" в которых ближе к $D = 1,885$ – отражения от фона.

Таким образом, фрактальная размерность фонового сигнала в среднем близка значению $D_{cp} = 1,89 \pm 0,01$, что в дальнейшем можно использовать при разделении фонового сигнала и сигнала, обусловленного движущимися объектами.

Оценка фрактальных размерностей сигналов при зондировании БПЛА мультироторного типа

Проведем визуальный анализ сигналов, записанных при зондировании БПЛА мультироторного типа, а также оценим их сложность, рассчитав ФР.

Зафиксированный сигнал с выхода головных телефонов, который был записан во время зависания БПЛА с тремя винтами на высоте 20 м, показан на рис. 3, а. Исходный временной ряд содержит 286 700 точек, что при частоте дискретизации 22,05 кГц соответствует по времени 13,0 секундам. На рис. 3, б-д приведены временные реализации (длиной 10 000 точек) сигналов для характерных положений "окна" (номер "окна" обозначен слева сверху на временных реализациях).

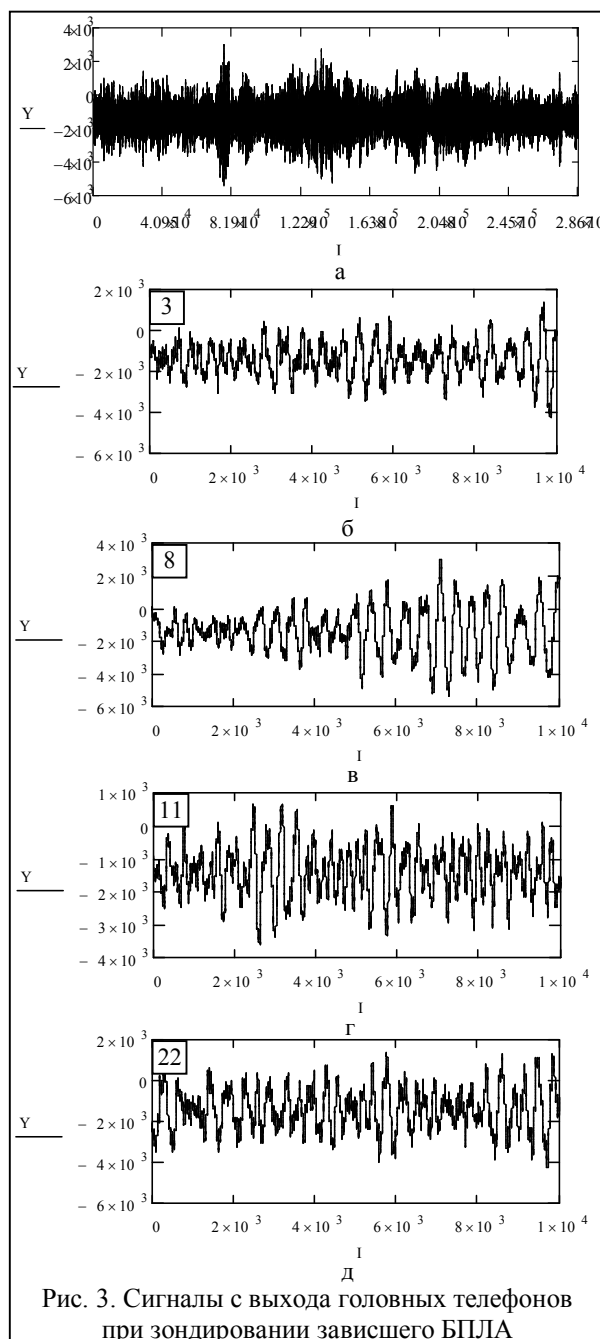


Рис. 3. Сигналы с выхода головных телефонов при зондировании зависшего БПЛА

Визуальный анализ записанного сигнала показывает, что его структура не является однородной, наблюдаются изменения амплитуды, которые больше всего проявляются около 80 000 точки, а также в диапазоне от 120 000 до 150 000 точек. Однако оп-

ределить, чем вызваны изменения амплитуды сигнала – фоном или движением БПЛА, по временной реализации невозможно. По временным реализациям в пределах “окна” (см. рис. 3, б-д) также нельзя определить какому типу объекта относится сигнал. Как будет показано ниже в 3-ем и 8-ом “окнах” наблюдался сигнал, в котором кроме фона присутствуют отражения от БПЛА, а в 11-ом и 22-ом “окнах” – только фон.

Проведем анализ структуры полученного временного ряда с использованием ФР. Условия обработки исходного временного ряда будем принимать такими же, как и при обработке фонового сигнала (размер “окна” и величина “скачка” равняются 10 000 точек). На рис. 4 показано изменение величины ФР от положения “окна”, по оси абсцисс отложены номера положения “окна” (N), а по оси ординат значения ФР в “окне” (D).



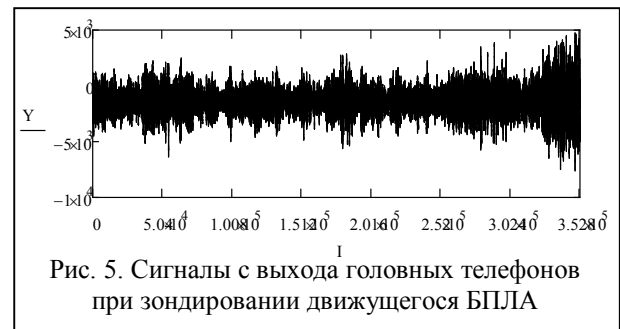
Как видно из анализа данных, приведенных на рис. 4, наименьшие значения ФР наблюдаются в 1-ом, 3-ем, 5-ом, 8-ом, 9-ом, 15-ом, 18-ом, 20-ом, 23-ем, 25-ом и 28-ом “окнах”. При этом ФР в этих “окнах”, соответственно, равны $D_1 = 1,8625$, $D_3 = 1,8496$, $D_5 = 1,8615$, $D_8 = 1,8506$, $D_9 = 1,8392$, $D_{15} = 1,8528$, $D_{18} = 1,8542$, $D_{20} = 1,8509$, $D_{23} = 1,8685$, $D_{25} = 1,8563$ и $D_{28} = 1,8256$. Таким образом, среднее значение ФР сигналов, обусловленных зависанием БПЛА, в основном колеблется около значения $D_{cp} = 1,85 \pm 0,01$. Кроме того, необходимо отметить, что приведенные выше значения ФР, проявляются с периодичностью 2-3 положения “окна”. Особенно это проявляется в начале и в конце временного ряда. Это, скорее всего, объясняется тем, что в эти моменты зависание БПЛА осуществлялось при равномерном вращении винтов, без изменения высоты.

Фрактальные размерности в других “окнах” также характеризуют зависание БПЛА, однако в них большей или меньшей степени преобладает фоновый сигнал, и ФР в этих “окнах” увеличивается, что характерно для фонового сигнала. Наибольшие значения ФР наблюдаются в 11-ом, 17-ом, 19-ом и 22-ом “окнах”, при этом ФР в этих “окнах”, соответственно, равны $D_{11} = 1,8847$, $D_{17} = 1,8803$, $D_{19} = 1,8831$ и $D_{22} = 1,8870$. Как было показано выше, такие зна-

чения ФР соответствуют фоновому сигналу ($D_{cp} = 1,89 \pm 0,01$).

Таким образом, различие в величинах фрактальных размерностей сигналов с выхода головных телефонов при зондировании фона и БПЛА может быть использовано в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа с тремя винтами.

Проведем анализ сигнала при движении БПЛА. Зафиксированный сигнал с выхода головных телефонов, который был записан во время движения БПЛА с тремя винтами на высоте 30 м в сторону к РЛС и от нее, показан на рис. 5. Исходный временной ряд содержит 352 800 точек при частоте дискретизации 22,05 кГц, что соответствует по времени 16,0 секундам.



Визуальный анализ записанного сигнала показывает, что структура сигнала, также как и при зависании БПЛА, не является однородной. По характеру сигнала можно сказать, что он не является фоновым (см. рис. 2, а), однако по временной реализации нельзя оценить, чем вызваны изменения амплитуды сигнала.

Проведем анализ полученного временного ряда с использованием ФР. Условия обработки исходного временного ряда будем принимать такими же, как и при обработке фонового сигнала и сигнала, обусловленного зависанием БПЛА. На рис. 6 показано изменение величины ФР от положения “скачущего окна”.



Из сравнения данных, приведенных на рис. 4 и рис. 6, видно, что величины ФР сигналов, полученных при зависании БПЛА и во время его движения в направлении к РЛС и от нее, практически не отли-

чаються, т.е. по величині ФР визначити тип руху БПЛА неможливо. Це пояснюється тим, що модуляція сигналу в основному відбувається через обертання гвинтів, а не через швидкість польоту БПЛА, яка в часі експериментів була не високою.

На рис. 6 також видно, що в початку початкового часового ряду спостерігається зависання БПЛА, і найменші ФР спостерігаються з періодичністю 2-3 положення "вікна" (див. $N=2$, $N=4$ і $N=6$). При цьому ФР в позначених "вікнах", відповідно, рівні $D_2 = 1,8603$, $D_4 = 1,8392$ і $D_6 = 1,8478$. Далі в 10-му "вікні" спостерігається початок руху БПЛА, що проявляється в мінімальному значенні ФР, рівному $D_{10} = 1,8089$.

Рух БПЛА в подальшому характеризується збільшенням тривалості появи найменших ФР – спочатку до трьох "вікна": 10-го, 11-го і 12-го "вікна" ($D_{10} = 1,8089$, $D_{11} = 1,8607$ і $D_{12} = 1,8517$), а далі – до десяти: з 16-го по 25-е "вікно" ($D_{16} = 1,8551$, $D_{17} = 1,8457$, $D_{18} = 1,8586$, $D_{19} = 1,8670$, $D_{20} = 1,8568$, $D_{21} = 1,8711$, $D_{22} = 1,8573$, $D_{23} = 1,8497$, $D_{24} = 1,8683$ і $D_{25} = 1,8307$).

В кінці початкового часового ряду найменші ФР спостерігаються тільки в двох "вікнах" підряд – 29-го, 30-го і 32-го, 33-го "вікна", що обумовлено, швидше за все, вильотом БПЛА з зони дальності РЛС.

Таким чином, різниця в характері руху БПЛА (зависання або рух в напрямку к РЛС і від неї) можна визначити за тривалості появи найменших фрактальних розмірностей.

Також необхідно зазначити, що середнє значення ФР сигналів при зондуванні БПЛА ($D_{cp} \approx 1,85$) відрізняється від значень ФР, отриманих при русі людей на маршруті зондування ($D_{cp} \approx 1,86$).

Выводы

1. Різниця в величинах фрактальних розмірностей сигналів з вильоту головних телефонів при зондуванні фону і БПЛА може бути використано в якості ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу з трьома гвинтами.

2. Фрактальні розмірності сигналів при зависанні БПЛА і в час його руху на невисокій швидкості практично не відрізняються, т.е. по величині ФР неможливо визначити тип руху БПЛА.

3. Різниця в характері руху БПЛА можна визначити за тривалості появи найменших фрактальних розмірностей.

4. При проведенні подальших досліджень цілком доцільно оцінити можливість використання величини фрактальної розмірності при розпізнаванні БПЛА, відрізняються кількістю роторів.

Список литературы

1. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / Берже П., Помо И., Видаль К. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
2. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
3. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / [Доля Г.Н., Иванов В.К., Пащенко Р.Э. и др.]; Под ред. Р.Э. Пащенко. – Харьков: ХООО "НЭО "ЭкоПерспектива", 2006. – 348 с.
4. Федер Е. Фракталы / Е. Федер – М.: Мир, 1991. – 254 с.
5. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.
6. ООО "КБ АВИА" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kb-avia.com/index.html>.

Поступила в редколлегию 24.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Полярус, Харьковский национальный автомобильный университет, Харьков.

РОЗПІЗНАВАННЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Р.Е. Пашенко, В.М. Ілюшко, О.С. Фатєєв, Д.О. Цюпак

Розглянута можливість використання величини фрактальної розмірності як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу. Показано, що значення фрактальних розмірностей сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняються від значень фрактальних розмірностей фонових сигналів. Але при зондуванні БПЛА, що завис, і, що рухається, величини фрактальних розмірностей сигналів практично не відрізняються. Встановлено, що відмінність у характері руху БПЛА можна визначити за тривалістю і періодичністю появи найменших фрактальних розмірностей.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, розпізнавання БПЛА, фрактальна розмірність.

RECOGNITION BPLA OF MULTIROTOR TYPE WITH THE USE FRACTAL DIMENSIONS

R.E. Paschenko, V.M. Ilushko, A.S. Fateev, D.O. Cypak

Possibility of the use size of fractal dimension is considered as sign of recognition BPLA of multirotor type. It is noted that the values of fractal dimension signals, got at sounding of BPLA, differ from the values of fractal dimensions base-line signals. However at sounding hanging up and locomotive BPLA size of fractal dimensions signals does not differ practically. It is set that distinction in character of motion BPLA it is possible to define on an extent and periodicity of appearance the least fractal dimensions.

Keywords: drone, UAV detection, fractal dimension.