

Р.Е. Пащенко, В.К. Іванов, Д.О. Цюпак

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: r.paschenko@i.ua; ivanov@ire.kharkov.ua; tsyupak87@mail.ru

**Аналіз доплерівських сигналів,
відбитих від роторів БПЛА, з використанням
фазових портретів**

Предмет і мета роботи. Проведено порівняльний аналіз форм фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), побудованих з різними часовими затримками. Проаналізовано форми фазових портретів доплерівських сигналів при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів і швидкістю їх обертання.

Методи і методологія роботи. Запропоновано метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА з використанням фазових портретів. Метод дозволяє визначати кількість роторів на БПЛА та оцінити швидкість їх обертання.

Результати роботи. Установлено, що форма фазового портрета фонового сигналу практично не залежить від часової затримки і може бути охарактеризована як випадковий рух зображувальної точки по фазовій траєкторії в центрі фазового портрета. Поява на краях фазового портрета характерних областей дозволяє розділити фоновий сигнал і сигнал при зондуванні обертового ротора БПЛА. Показано, що в процесі зондування обертового ротора БПЛА форма фазового портрета доплерівського сигналу залежить від величини часової затримки. У випадку збільшення часової затримки схожі форми фазового портрета з'являються через проміжки часу, що дорівнюють періоду доплерівського сигналу, а при збільшенні швидкості обертання ротора періодичність появи схожих фазових портретів зменшується.

Висновок. Під час зондування обертових роторів БПЛА форми фазових портретів доплерівського сигналу залежать від величини часової затримки. Періодичний характер зміни форм фазових портретів доплерівського сигналу у випадку збільшення кількості зондованих роторів БПЛА зберігається. При цьому форми фазових портретів ДС значно відрізняються для різної кількості роторів БПЛА. Іл. 16. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: доплерівський сигнал, безпілотний літальний апарат, псевдофазова площина, фазовий портрет.

На цей час малі безпілотні літальні апарати (БПЛА) мультироторного типу (так звані мультикоптери) все ширше використовуються для вирішення різноманітних завдань у цивільній і військовій сферах [1, 2]. Це обумовлено їх невисокою вартістю і розвитком сучасних технологій виробництва. Застосування в їх конструкціях пластмас, скловолокна, пінопласту, картону, а також малопотужних економічних двигунів значно ускладнює їх виявлення і розпізнавання з застосуванням засобів оптичного, радіолокаційного та інфрачервоного спостереження. Крім того, збільшення кількості таких

БПЛА призводить до зростання потенційних загроз від їх використання.

Розширення парку БПЛА мультироторного типу, а також кола задач, які вони вирішують, приводить до необхідності впорядкування їх польотів і контролю за їх використанням. Створюючи системи контролю за виконанням правил експлуатації мультироторних БПЛА, доцільно використовувати різні технічні засоби, включаючи радіолокаційні.

Доплерівські сигнали, відбиті від обертових роторів БПЛА, мають різну форму у часовій області. У [3] наведено результати спектраль-

ного аналізу доплерівських сигналів (ДС) при зондуванні обертових роторів БПЛА з різною швидкістю і при різній їх кількості. Показано, що спектри ДС мають складну структуру, яка стає більш складною при збільшенні швидкості обертання роторів і збільшенні їх кількості. Складність структури спектрів ДС не дозволяє ефективно досліджувати такі сигнали. Особливості форми ДС, які важко досліджувати аналітично, піддаються наочному зображенню та якісному дослідженню за допомогою перетворення вихідного сигналу в іншу площину аналізу, наприклад, перетворення на псевдофазову площину (ПФП) [4, 5]. На ПФП будуються фазові портрети (ФП), тобто залежність амплітуди сигналу від цієї ж величини в інший момент часу, що відстає або випереджає даний момент часу на сталу величину ($t \pm T$) [6]. Сигнал $x(t + T)$ пов'язаний з похідною $\dot{x}(t)$, і результат має ті ж властивості, що і у випадку використання дійсної фазової площини [7]. Використання ЕОМ дозволяє будувати ФП складних динамічних систем практично в реальному масштабі часу.

У роботі [8] показано, що перетворення вихідного часового ряду на ПФП і побудова ФП дозволяють проаналізувати форму сигналів з виходу каналу фазового детектування РЛС. Також в [8] показано, що форма ФП сигналів, одержаних у результаті зондування мультироторного БПЛА з трьома роторами, відрізняється від форми ФП фонових сигналів. Однак у роботі не проведений аналіз залежності форми ФП від швидкості обертання роторів.

У роботі [9] запропонований метод розпізнавання БПЛА мультироторного типу з використанням форми ФП, побудованих для різних часових затримок, але не проведений аналіз залежності форми ФП ДС від кількості роторів і швидкості їх обертання. Представляє практичний інтерес оцінити можливість використання ФП ДС, відбитих від БПЛА, для визначення кількості роторів і швидкості їх обертання.

Мета статті – провести аналіз зміни форм ФП ДС при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів і швидкістю їх обертання.

1. Методика досліджень та особливості побудови фазових портретів на псевдофазовій площині. Для отримання відбитих сигналів використовувалася експерименталь-

на установка на базі доплерівської РЛС *IPS-154* з безперервним синусоїдальним сигналом ($f_n = 24$ ГГц, $\lambda \approx 12$ мм), яка розроблена фірмою *InnoSenT* [10]. Також застосовувалися персональний комп'ютер *Notebook Samsung P29* і вимірювач дальності *Laser Distance Meter* китайського виробництва. Об'єкт досліджень БПЛА з трьома роторами (дволопатеві ротори з пластику з кутом нахилу $4,7''$ і довжиною 320 мм). Детальний опис експериментальної установки та умов проведення експериментів наведено у [3]. На рис. 1 показано структуру експериментального комплексу.

У процесі проведення експериментів ДС з виходу РЛС записувався в цифровій формі за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) вбудованої звукової карти персонального комп'ютера (частота дискретизації АЦП – $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц, при 16-бітовому квантуванні за рівнем). Відстань від РЛС до об'єкта дослідження складала 5 м. У ході експериментів були одержані ДС за умови обертання одного, двох і трьох роторів. Відповідно змінювалася швидкість обертання роторів, яка складала 12,5 об/с, 25 об/с і 37,5 об/с. Для одержаних часових рядів ДС використовувалася «віконна» обробка довгого вихідного сигналу, з якого вирізувалися вибірки розміром $2^{10} = 1024$ точки. Крім того, проводилося нормування вихідного ДС щодо його середнього значення. Така попередня обробка дозволила провести аналіз часових реалізацій ДС.

На рис. 2 показано приклад ДС під час обертання одного ротора № 1 зі швидкістю 12,5 об/с.

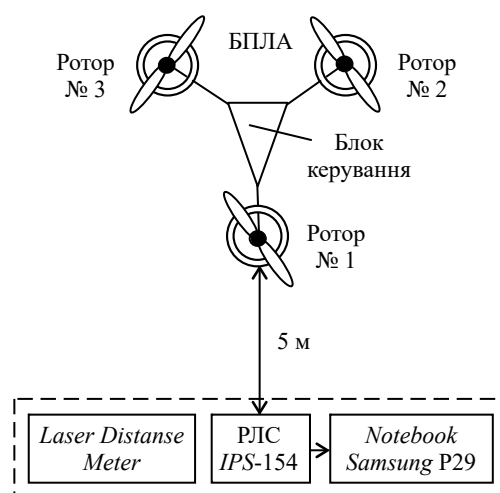


Рис. 1. Структура експериментального комплексу

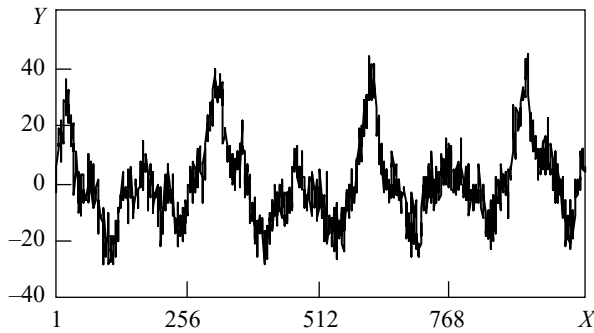


Рис. 2. Доплерівський сигнал під час обертання одного ротора № 1 з швидкістю 12,5 об/с

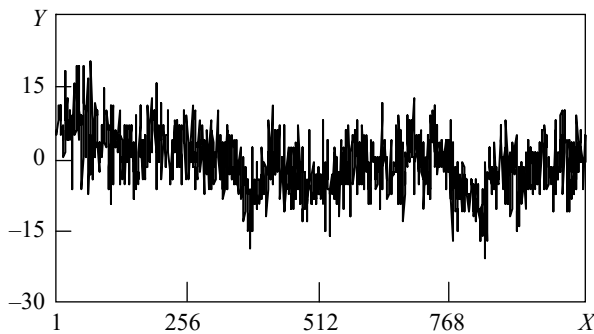


Рис. 3. Доплерівський сигнал, що відповідає фону на трасі зондування

По осі абсцис відкладено порядкові номери точок записаного сигналу, а по осі ординат – амплітуду ДС.

Як видно на рис. 2, при наближенні передньої (першої) лопаті ротора до РЛС частота випромінюваного сигналу збільшується і виходить максимальне значення ДС. При віддаленні передньої лопаті ротора від РЛС частота сигналу зменшується і виходить мінімальне значення ДС. Оскільки ротор має дві лопаті, то процес, описаний для передньої лопаті, має повторюватися і для задньої (другої) лопаті, але з меншою амплітудою, оскільки лопать знаходиться далі. На невеликих швидкостях обертання ротора цей ефект проявляється на часовій реалізації ДС у вигляді двох послідовних максимальних і мінімальних значень сигналу. Крім того, оскільки ротор обертається деякий час, то і зазначений ефект повторюється декілька разів, тобто ДС є періодичним.

Під час експериментів також був записаний фоновий ДС на трасі зондування, «віконна» обробка якого показана на рис. 3. Цей сигнал також нормувався. Фоновий сигнал являє собою суміш шумової складової РЛС та випромінювання електричної мережі частотою 50 Гц.

З порівняння рис. 2 і 3 видно, що фоновий ДС відрізняється від ДС під час зондування обертового ротора БПЛА і має в основному високочастотні складові, які характерні для шумового сигналу.

Розглянемо особливості побудови ФП на ПФП (перетворення вихідного часового ряду на нову площину аналізу) і порядок аналізу форми ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА.

Псевдофазова площина, на якій будуються фазові портрети, є площина з координатами $[x(t), x(t + T)]$. На ній будується залежність амплітуд ДС у різні моменти часу, тобто залежність амплітуди ДС від його ж амплітуди в інший момент часу, що випереджає поточний момент часу на постійну величину T . Найбільш важким завданням у побудові ФП на ПФП є вибір часової затримки T . Підходи до вибору T описані в [5].

Простий спосіб – це обрати T близьким до першого нуля автокореляційної функції (АКФ) для часового ряду x_i

$$B(T) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+T} - \bar{x}), \quad m = M - T, \quad (1)$$

де \bar{x} – середнє значення часового ряду; M – довжина часового ряду.

Складніший спосіб заснований на обчисленні середньої взаємної інформації (СВІ) між двома вимірюваннями. Нехай дано дві множини вимірювань A і B . Взаємна інформація між елементом a_i множини A та елементом b_j множини B визначається як кількість інформації, яку мають вимірювання a_i і b_j відносно один до одного:

$$I_{a_i, b_j} = \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right]. \quad (2)$$

Якщо вимірювання незалежні, то взаємна інформація дорівнює нулю. Усреднюючи за всіма вимірюваннями, одержуємо

$$I_{A, B} = \sum_{a_i, b_j} P_{AB}(a_i, b_j) \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right]. \quad (3)$$

Замінюючи a_i і b_j на x_i і x_{i+T} відповідно, одержуємо середню взаємну інформацію як функцію часової затримки T . Затримка T оби-

рається рівною часу першого мінімуму у взаємній інформації.

На рис. 4, *a* наведено графік АКФ, а на рис. 4, *б* – графік СБІ, що відповідають ДС під час обертання одного ротора зі швидкістю 12,5 об/с, розраховані з використанням програми *FRACTAN* [11].

Як видно на рис. 4, *a*, перший нуль АКФ досягає за часової затримки $T = 47$, а перший мінімум СБІ (рис. 4, *б*) виникає за умови $T = 10$.

На рис. 5 показані ФП ДС при обертанні одного ротора зі швидкістю 12,5 об/с, побудовані з часовими затримками $T = 10$ (перший мінімум СБІ) і $T = 47$ (перший нуль АКФ). На зображеннях ФП по осі абсцис відкладені значення записаного сигналу (Y), а по осі ординат – зміщені на T точок значення цього ж сигналу (Z).

Як видно на рис. 5, форма ФП сильно залежить від величини часової затримки T . Якщо T обрати близьким до першого мінімуму СБІ (рис. 5, *a*), то ФП матиме витягнуту по діагоналі форму і аналізувати особливості ДС в цьому випадку буде дуже важко. Єдина особливість такого ФП проявляється у верхній частині у вигляді деякого відокремлення фазової траєкторії від основної частини ФП.

Збільшення часової затримки до величини, близької до першого нуля АКФ, дозволяє досліджувати особливості ДС на ПФП (рис. 5, *б*). У цьому випадку ФП не є витягнутим по діагоналі, а має характерну форму. На краях ФП спостерігаються чотири характерні області – дві зверху ФП і дві знизу. Верхні області відповідають максимальним амплітудам ДС, а нижні – мінімальним. Наявність цих областей дозволяє зробити висновок, що ДС має низькочастотну складову, якої немає у фоновому ДС.

На рис. 6 показані ФП фоновому ДС, побудовані з часовими затримками $T = 10$ і $T = 47$. Часові затримки обрані такими ж, як і для побудови ФП ДС обертового ротора.

Як видно на рис. 6, форма ФП фоновому сигналу практично не залежить від часової затримки, а високочастотна (фонові) складові концентрується в центрі ФП. Невелика еліпсоїдна форма ФП обумовлена модуляцією фоновому сигналу електричною мережею частотою 50 Гц.

Таким чином, поява на краях ФП характерних областей дозволяє розділити фоновий сигнал і сигнал при зондуванні обертового ротора.

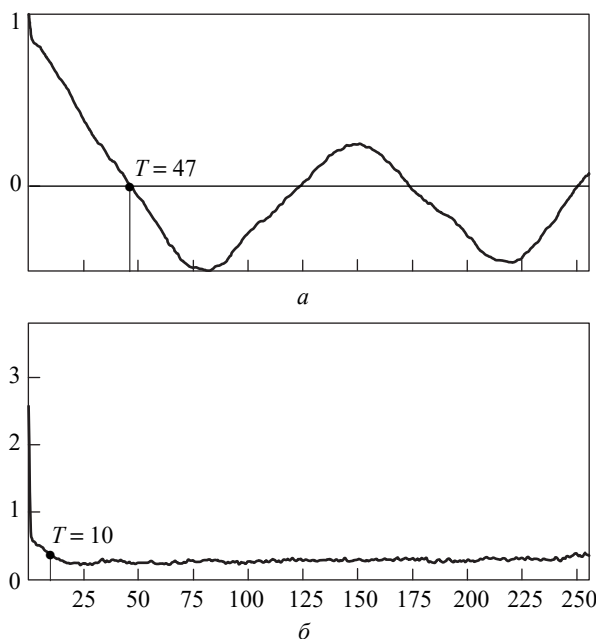


Рис. 4. Графіки автокореляційної функції (*a*) і середньої взаємної інформації (*б*) ДС під час обертання одного ротора зі швидкістю 12,5 об/с

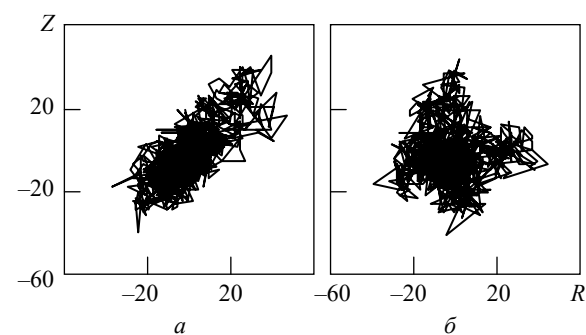


Рис. 5. Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора зі швидкістю 12,5 об/с, побудовані з часовими затримками $T = 10$ (*a*) і $T = 47$ (*б*)

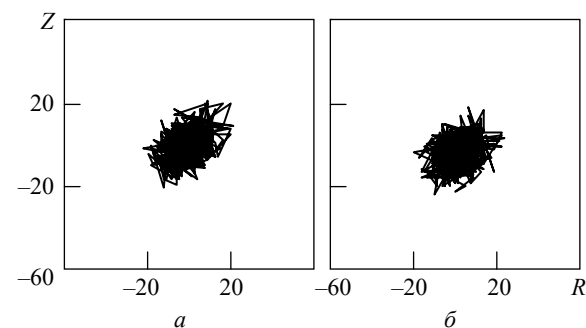


Рис. 6. Фазові портрети ДС, побудовані з часовими затримками $T = 10$ (*a*) і $T = 47$ (*б*)

Порівняння ФП на рис. 5 і 6 показує, що форма ФП фоновому сигналу не залежить від величин часової затримки T , а форма ФП ДС при зондуванні роторів БПЛА із збільшенням T значно

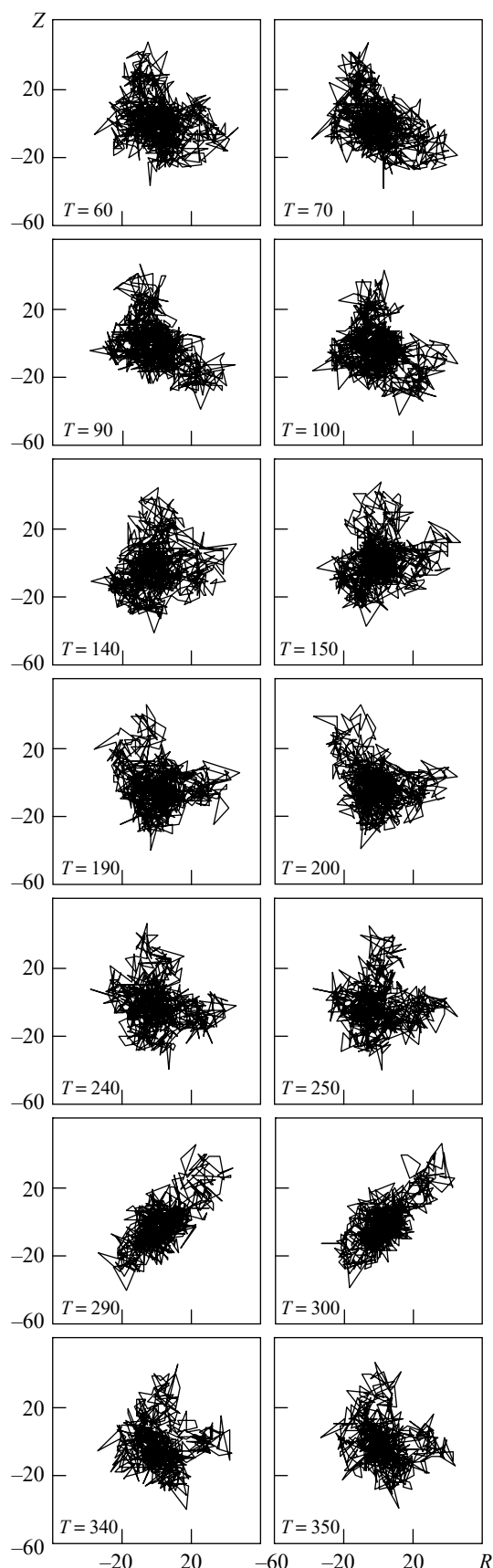


Рис. 7. Зміна форми ФП ДС під час збільшення часової затримки

змінюється. Розглянемо динаміку зміни форми ФП сигналу, показаного на рис. 2, у випадку збільшення часової затримки.

2. Аналіз змін форм фазових портретів. На рис. 7 показано зміни форм ФП ДС за умови обертання одного ротора зі швидкістю 12,5 об/с і збільшення часової затримки. Величини T показані зліва знизу на зображеннях ФП. На рис. 7 наведено тільки типові ФП, які дозволяють оцінити поведінку фазової траєкторії на краях ФП.

Як видно з аналізу ФП, наведених на рис. 5 і 7, зі збільшенням часової затримки центральна частина ФП не змінюється, тобто вона обумовлена високочастотною складовою ДС, яка є наслідком присутності у сигналі фонові складової. Для детального аналізу структури цієї складової необхідно зменшувати довжину вихідного сигналу до величин, менших одного періоду ДС, і обирати малі значення часової затримки. Особливості поведінки ДС виявляються на краях ФП. Так, при збільшенні T верхні області, відповідні максимальним амплітудам ДС, починають віддалятися ($T = 60$), а нижні, що відповідають мінімумам ДС, згладжувати ($T = 70$). У процесі подальшого збільшення часової затримки ФП витягується по діагоналі ($T = 90$), а далі ($T = 100$) характерні області ФП зберігаються.

Як наголошувалося вище, на рис. 2 видно, що ДС є періодичним, і в одному періоді існують два максимальних (різної амплітуди) і два мінімальних (близької амплітуди) значення. У цьому випадку період ДС складає приблизно 300 точок часового ряду, а період між максимумами з різними амплітудами – приблизно 150 точок. Тому при часових затримках $T = 140$ і $T = 150$ форма ФП нагадує форму ФП при T , близьких до першого нуля АКФ. Форма ФП продовжує змінюватися зі збільшенням T ($T = 190$, $T = 200$, $T = 240$, $T = 250$). Характерні області переміщуються за годинниковою стрілкою навколо центра ФП. Збільшення часової затримки до $T = 290$... 300 призводить до того, що форма ФП практично повторює форму ФП при $T = 10$. Форма ФП при $T = 340$... 350 також практично повторює форму ФП при $T = 47$.

Таким чином, з проведеного аналізу можна зробити висновок: оскільки вихідний ДС є періодичним, то схожі форми ФП також з'явля-

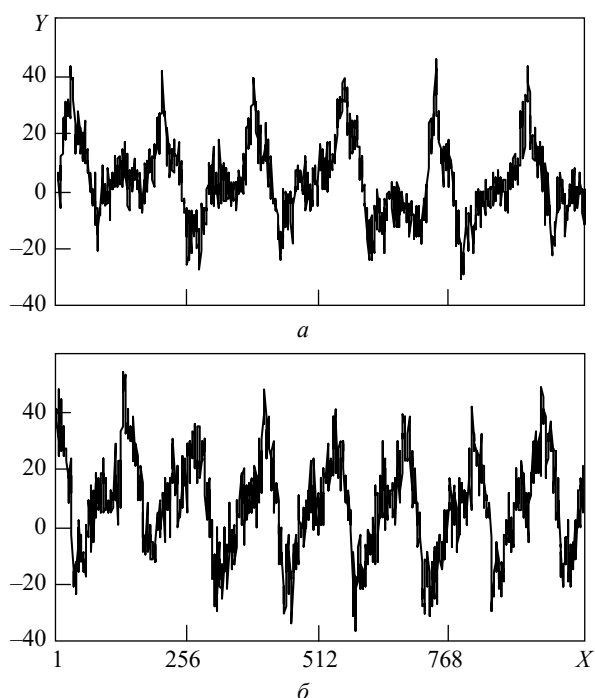


Рис. 8. Доплерівські сигнали під час обертання одного ротора № 1 зі швидкостями 25 об/с (а) і 37,5 об/с (б)

ються з періодом, рівним часовій затримці, яка дорівнює періоду ДС. При цьому форма ФП ДС змінюється певним чином зі зміною часової затримки.

Встановлена закономірність зміни форм ФП підтверджується і у разі збільшення швидкості обертання ротора БПЛА. На рис. 8 показані ДС при обертанні одного ротора № 1 зі швидкостями 25 об/с (а) і 37,5 об/с (б).

На рис. 8 видно, що при збільшенні швидкості обертання ротора частоти ДС зростають. Число періодів у «вікні» збільшується до шести (рис. 8, а) і до восьми (рис. 8, б). Період ДС, показаного на рис. 8, а, складає приблизно 180 точок часового ряду, а ДС, показаного на рис. 8, б – приблизно 130 точок.

На рис. 9 наведено ФП ДС при обертанні одного ротора зі швидкістю 25 об/с, побудовані з часовими затримками $T = 9$ (перший мінімум СВІ), $T = 32$ (перший нуль АКФ), $T = 180$, $T = 210$, $T = 350$ і $T = 380$. Величини T показані знизу на зображеннях ФП.

Як видно на рис. 9, форма ФП практично повторюється приблизно через часові затримки, кратні $T = 170$ точкам, що відповідає періоду ДС, показаному на рис. 8, а. Відмінності у формі ФП проявляються у деякому розрідженні фазової траєкторії, що обумовлено тим, що

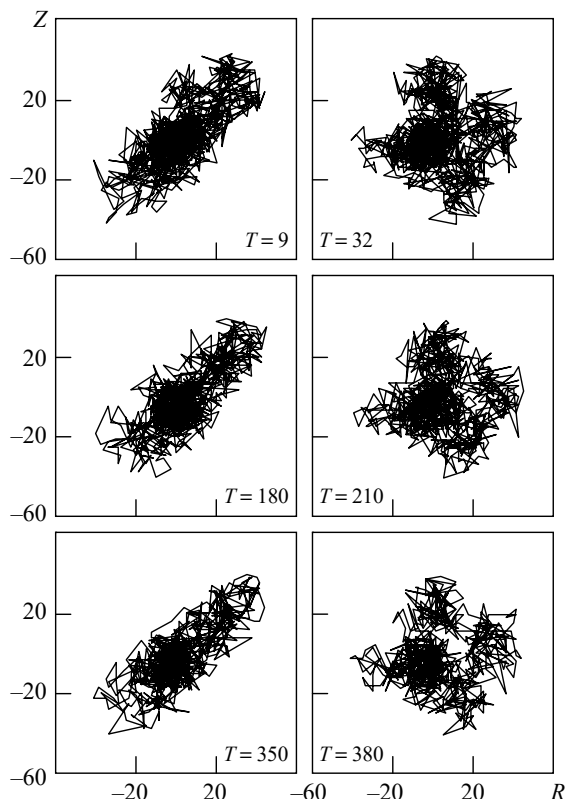


Рис. 9. Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора зі швидкістю 25 об/с

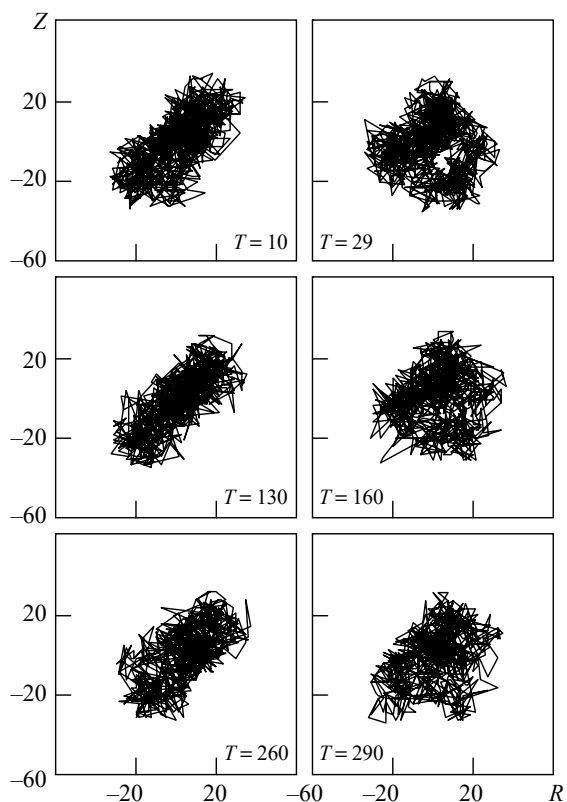


Рис. 10. Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора зі швидкістю 37,5 об/с

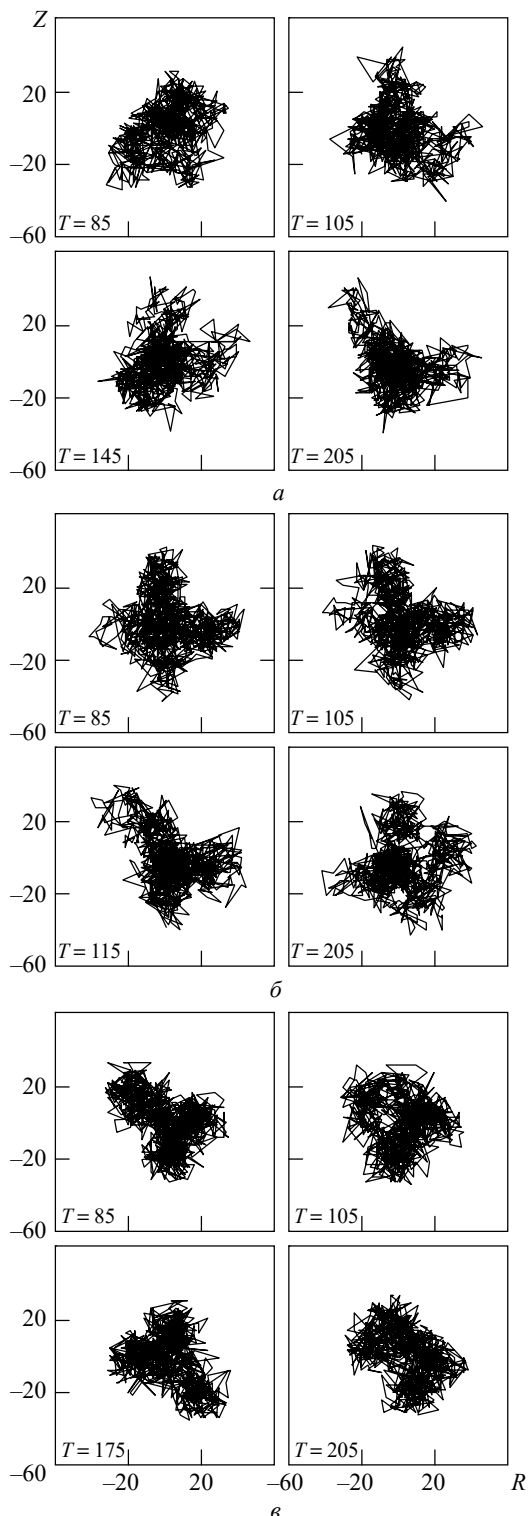


Рис. 11. Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора зі швидкостями 12,5 об/с (а), 25 об/с (б) і 37,5 об/с (в)

при збільшенні T зменшується кількість точок, які беруть участь у побудові ФП, але характерні особливості фазової траєкторії зберігаються.

На рис. 10 показані ФП ДС при обертанні одного ротора зі швидкістю 37,5 об/с, побудова-

ні з часовими затримками $T = 9$ (перший мінімум СВІ), $T = 29$ (перший нуль АКФ), $T = 130$, $T = 160$, $T = 260$ і $T = 290$.

На рис. 10 видно, що як і при інших швидкостях обертання ротора, форми ФП практично повторюються через часові затримки $T = 130$, що дорівнює періоду вихідного ДС. Також необхідно зазначити, що розрідження фазової траєкторії у ФП не проявляється. Це пов'язано з тим, що вихідний ДС містить більше число періодів у порівнянні з ДС, розглянутими вище.

Таким чином, порівняльний аналіз показав, що схожі форми ФП при збільшенні часової затримки проявляються з періодом, що дорівнює періоду ДС. Також форма ФП ДС залежить від величини часової затримки.

Розглянемо відмінні особливості форми ФП ДС у випадку зондування одного обертового ротора БПЛА з різною швидкістю. Порівняння ФП, представлених на рис. 5, а, 9, а і 10, а, показує, що при невеликих часових затримках, близьких до першого мінімуму СВІ, аналізувати особливості ДС не виявляється можливим. Усі ФП витягнуті по діагоналі і мають невеликі відокремлення фазових траєкторій у верхній і нижній частинах ФП, тому подальший аналіз проведемо за інших часових затримок.

Одна особливість зміни форм ФП у випадку збільшення швидкості обертання ротора була розглянута вище – поява схожих ФП при часовій затримці, яка дорівнює періоду вихідного ДС. Друга особливість всіх ФП, яка не залежить від швидкості обертання роторів, пов'язана з тим, що високочастотні складові ДС групуються в центральній частині ФП, у формі, яка може бути названа «клубок ниток». Таким чином, на всіх ФП присутня область, в якій спостерігається випадковий рух зображувальної точки, що обумовлений фоновим сигналом.

Проведемо аналіз поведінки фазових траєкторій на краях ФП при збільшенні швидкості обертання ротора і зміні величини часової затримки. На рис. 11 показані по чотири типові фазові портрети ДС, побудовані з різними часовими затримками, при обертанні одного ротора з швидкостями 12,5 об/с (а), 25 об/с (б), 37,5 об/с (в). Значення величин T показано зліва знизу на зображеннях ФП.

Аналіз ФП показує, що зі збільшенням швидкості обертання ротора (частота ДС збіль-

шується) характер змін форм ФП за однакової довжини (кількості точок) вихідного ДС і однакової часової затримки буде різним. Однак ці відмінності не значні, і порівняння форм ФП необхідно проводити при часових затримках T , більших ніж перший нуль АКФ. На рис. 11 це показано на лівих верхніх рисунках для $T = 85$ точок. Порівняння форм ФП показує, що чим більше T відрізняється від величин, близьких до першого нуля АКФ, тим більше форми ФП відрізняються у випадку збільшення швидкості обертання ротора (див. рис. 5, б, 9, б, 10, б). Подальше збільшення часової затримки до $T = 105$ точок (верхні рисунки праворуч) показує, що відмінності у формах ФП продовжують збільшуватися.

Аналіз характерних форм ФП, наведених на нижніх рисунках, показує, що при збільшенні швидкості обертання ротора фазові траєкторії на краях ФП групуються з більшою щільністю. Цей процес добре видно на ФП, що мають трикутну форму (на рис. 11 це ФП за умови $T = 205$ для $V_p = 12,5$ об/с, $T = 115$ для $V_p = 25$ об/с, $T = 85$ для $V_p = 37,5$ об/с). Також аналіз форм ФП показує, що гармонічна низькочастотна складова ДС при зміні швидкості обертання ротора проявляється у вигляді чотирьох характерних областей на ФП: двох зверху (максимальні амплітуди ДС) і двох знизу (мінімальні амплітуди ДС). Але при високій швидкості обертання ротора ($V_p = 37,5$ об/с) ці області розташовуються ближче до центральної частини ФП, яка обумовлена високо частотною (фоновою) складовою ДС.

Таким чином, проведені дослідження показують, що якісний аналіз ДС (побудова і аналіз ФП) дозволяє оцінити особливості ДС, відбитих від обертючих роторів БПЛА. Зміна часової затримки у процесі побудови ФП (аналіз динаміки змін форм ФП) дозволяє виявити відмінні особливості ДС при зміні швидкості обертання роторів. Розглянемо особливості форми ФП ДС при зондуванні різної кількості роторів БПЛА, які обертаються з однаковою швидкістю.

3. Аналіз змін форм ФП при різній кількості роторів. На рис. 12 показано нормовані ДС, що відповідають обертанню двох роторів № 1, № 2 (а) і трьох роторів (б) на швидкості 37,5 об/с. Докладний частотно-часовий аналіз таких ДС наведено у [3].

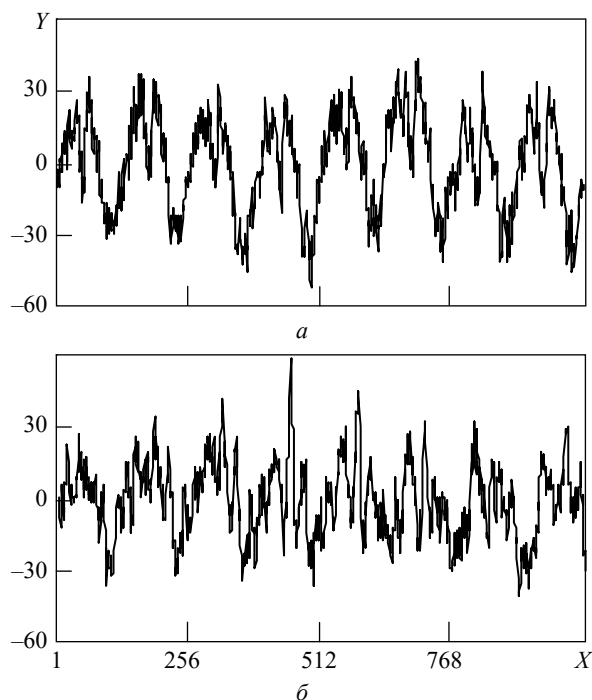


Рис. 12. Доплерівські сигнали, що відповідають обертанню двох роторів № 1, № 2 (а) і трьох роторів (б) зі швидкістю 37,5 об/с

На рис. 12, а видно, що ДС у процесі зондування двох роторів відрізняється за формою від ДС при зондуванні тільки одного ротора № 1 (рис. 8, б). У кожному періоді максимумів ДС спостерігається розділення сигналу на два практично однакові максимуми, а мінімуми ДС не мають такої характерної форми. Поява двох максимумів ДС є внеском частоти обертання ротора № 2 у ДС ротора № 1 (період між двома максимумами складає приблизно 30 точок часового ряду). У цьому разі періодичність ДС не змінюється (число періодів у «вікні» дорівнює восьми, період ДС складає приблизно 130 точок).

На рис. 12, б видно, що структура ДС за одночасного обертання трьох роторів відрізняється від ДС при зондуванні одного і двох роторів. Так, у максимумах сигналу виявляються три максимуми (період між сусідніми максимумами, також як при зондуванні двох роторів, складає приблизно 30 точок). Центральний максимум, як правило, найбільший. Періодичність сигналу не змінюється, оскільки швидкість обертання роторів залишилася тією самою. Мінімальні складові мають таку ж структуру, але характер розділення трьох складових не так виразно виявляється, як у максимумах.

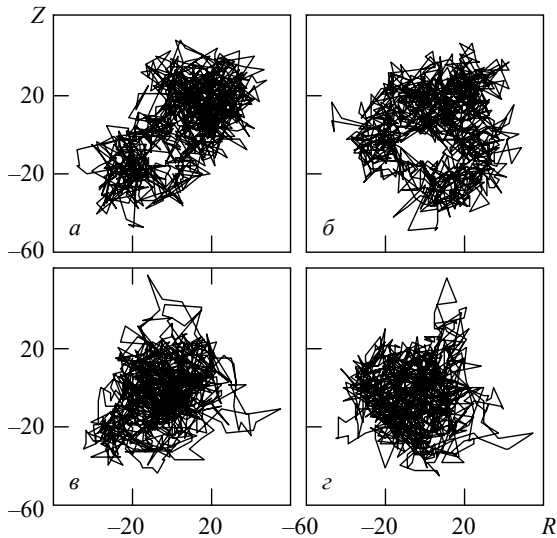


Рис. 13. Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів при $T = 10$ (а), $T = 28$ (б) і трьох роторів при $T = 9$ (в), $T = 34$ (з)

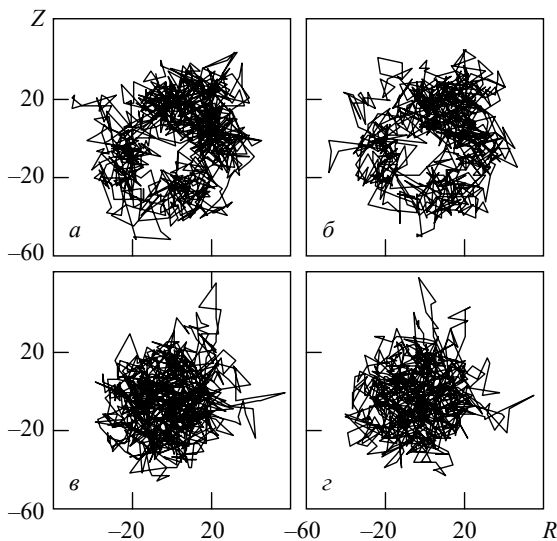


Рис. 14. Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів при $T = 150$ (а), $T = 280$ (б) і трьох роторів при $T = 160$ (в), $T = 290$ (з)

Також на рис. 12 видно, що, як і при зондуванні одного ротора, ДС мають низькочастотну (обумовлену швидкістю обертання та кількістю роторів) та високочастотну (обумовлену впливом фону і вібраціями роторів при обертанні) складові.

На рис. 13 показано ФП ДС під час обертання двох роторів, які побудовані з часовими затримками $T = 10$ – перший мінімум СВІ (а) і $T = 28$ – перший нуль АКФ (б), а також трьох роторів при часових затримках $T = 9$ – перший мінімум СВІ (в) і $T = 34$ – перший нуль АКФ (з).

Таким чином, при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів ФП ДС значно відрізняються. Так, при виборі часової затримки, близької до першого нуля АКФ, при зондуванні одного ротора на краях ФП виділяються чотири характерні області – дві зверху ФП і дві знизу (рис. 10, б). У випадку зондування двох роторів ФП має кільцеподібну форму (рис. 13, б), а трьох роторів – форму «клубка ниток» з трьома областями на краях ФП (рис. 13, з). Такі відмінності форм ФП можуть бути використані для розпізнавання типу мультироторного БПЛА.

Як видно на рис. 13, форми ФП значно відрізняються між собою і від форм ФП у випадку зондування одного ротора (див. рис. 10, а і б). Ці відмінності проявляються при виборі величини часової затримки T , близької як до першого мінімуму СВІ, так і до першого нуля АКФ, що не спостерігалось при зондуванні одного ротора з різними швидкостями. Так, при зондуванні двох роторів форма ФП має дві характерні області при $T = 10$ (рис. 13, а), а деяка витягнутість ФП по діагоналі також зберігається. При $T = 28$ (рис. 13, б) форма ФП стає кільцеподібною. При зондуванні трьох роторів у формі ФП відсутня витягнутість по діагоналі при $T = 9$ (рис. 13, в), а на краях ФП виділяються три характерні області. Центральна частина ФП має форму «клубка ниток», що характерне для високочастотної (фонові) складові, але розміри цієї області у три рази більші, ніж у ФП фонові ДС (див. рис. 6, а). При $T = 34$ (рис. 13, з) форма ФП змінюється не сильно, відділення фазової траєкторії від центра ФП також відбувається в трьох областях.

Розглянемо поведінку фазової траєкторії при значеннях часової затримки, відмінних від T , близьких до першого нуля АКФ, як це було проведено при аналізі зміни форми ФП ДС при обертанні одного ротора.

На рис. 14 показані ФП ДС при обертанні двох роторів при $T = 150$ (а), $T = 280$ (б) і трьох роторів при $T = 160$ (в), $T = 290$ (з). Такі часові затримки вибрані виходячи з величини періоду ДС при швидкості обертання ротора 37,5 об/с, яка, як наголошувалося вище, складає приблизно 130 точок. Як видно з аналізу ФП, представлених на рис. 13, б і 14, а, б, їх форма практично повторюється приблизно через $T \approx 130$ точок. Відмінності проявляються тільки в розріджен-

ні фазової траєкторії. Також порівняння форм ФП, представлених на рис. 13, *г* і 14, *в, г*, показує, що характер поведінки фазової траєкторії практично повторюється через $T \approx 130$ точок.

Таким чином, періодичний характер змін форм ФП ДС при збільшенні кількості зондованих роторів БПЛА зберігається, також як і при збільшенні швидкості одного ротора. Форма ФП ДС також залежить від величин часової затримки. Проведемо аналіз зміни форм ФП при збільшенні кількості обертових роторів і зміні величини часової затримки.

На рис. 15 показано по чотири типові фазові портрети ДС, побудовані з різними часовими затримками, при обертанні двох (*а*) і трьох (*б*) роторів зі швидкістю 37,5 об/с. Величини T обрані такими ж, як і при зондуванні одного ротора, ФП якого показано на рис. 11, *в*.

Порівняння форм ФП, наведених на рис. 11, *в* і рис. 15, показує, що і за інших величин часової затримки (відмінних від T , близьких до першого мінімуму СВІ і до першого нуля АКФ) вони також значно відрізняються між собою. Так, у випадку зондування двох роторів фазова траєкторія відвідує три характерні області на ПФП, на більшій відстані від центра ФП (обумовленого високочастотною складовою ДС), ніж це спостерігалось при зондуванні одного ротора (рис. 11, *в*). Така форма ФП спостерігається протягом проміжку часових затримок $\Delta T \approx 15$ точок (наприклад, при $T = 85$, $T = 90$ і $T = 55$), а потім протягом проміжку часових затримок $\Delta T \approx 15$ точок (наприклад, при $T = 105$, $T = 110$ і $T = 115$) спостерігається кільцеподібна форма ФП. Це обумовлено, швидше за все, розділенням максимумів на дві складові з періодами між ними приблизно 30 точок часового ряду. Така зміна форм ФП повторюється тричі протягом проміжку часових затримок $\Delta T \approx 80$ точок, а потім упродовж проміжку часових затримок $\Delta T \approx 30$ форма ФП змінюється, має дві характерні області і витягується по діагоналі. Цей процес відбувається з періодом приблизно 130 точок.

Під час зондування трьох обертових роторів БПЛА форма ДС стає більш складною і відповідно стає більш складною форма ФП (рис. 15, *б*). Центральна частина ФП має форму «клубка ниток», а на краях ФП у трьох областях відбувається відокремлення фазової траєк-

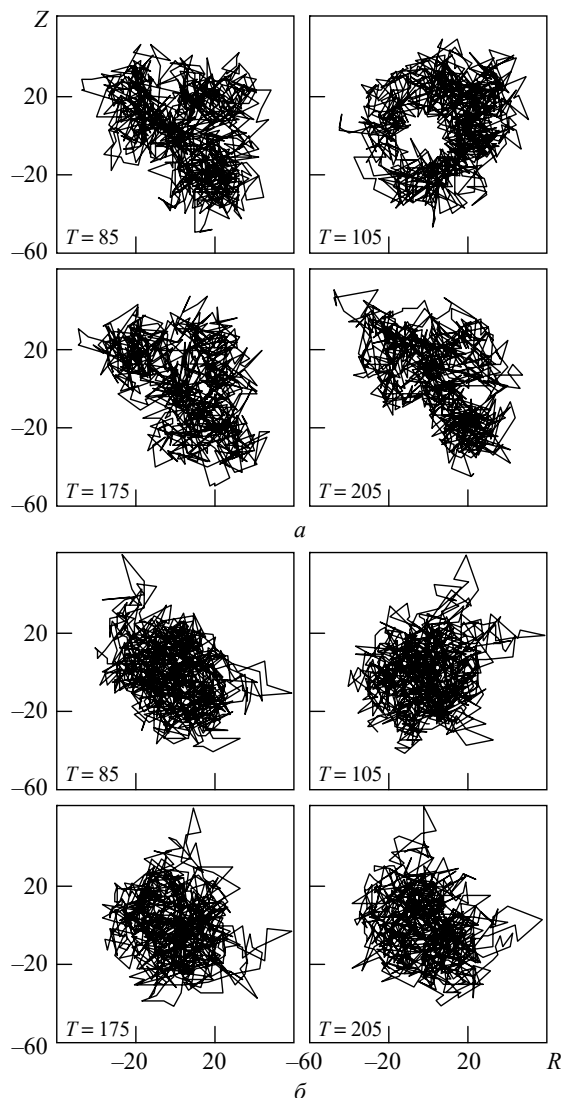


Рис. 15. Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів (*а*) і трьох роторів (*б*)

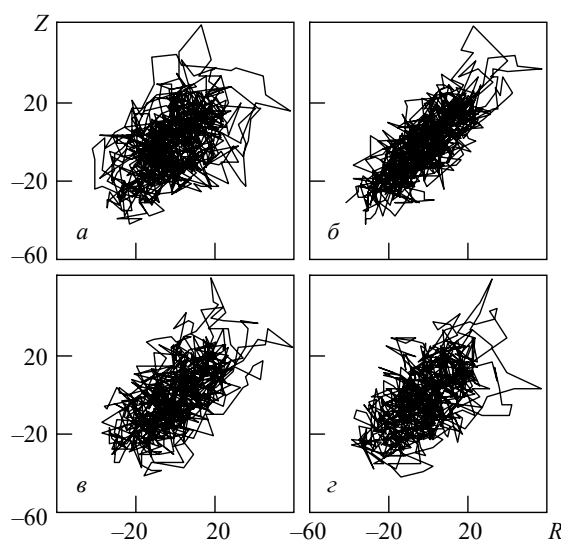


Рис. 16. Фазові портрети ДС під час обертання трьох роторів при $T = 125$ (*а*), $T = 130$ (*б*), $T = 260$ (*в*) $T = 265$ (*г*)

торії від центра. Як видно на рис. 13, в, з, 14, в, з і 15, б, при зміні часової затримки форма ФП практично не змінюється. Однак за часових затримок, кратних періоду ДС ($T \approx 130$, $T \approx 260$ і т. д.), форма ФП починає витягуватися по діагоналі, а відокремлення фазової траєкторії відбувається у двох областях (див. рис. 16).

Таким чином, появу характерних форм ФП при зміні часової затримки під час зондування БПЛА з різною кількістю обертових роторів може бути використано для розпізнавання типу БПЛА.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати метод аналізу ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням ФП. Метод передбачає декілька етапів. На першому етапі з використанням доплерівської РЛС і АЦП звукової карти комп'ютера одержують цифрові ДС, відбиті від фону і від обертових роторів БПЛА. На другому здійснюється попередня обробка ДС – нормування і «віконна» обробка довгого часового ряду (з використанням «стрибаючого вікна»). На третьому етапі розраховується АКФ ДС і обирається часова затримка, яка використовується для побудови ФП. Величина T обирається близькою до першого нуля АКФ, тому що вибір T , близьких до першого мінімуму СВІ, є менш інформативним. На четвертому етапі будуються ФП фонового ДС і ДС під час зондування БПЛА з різною кількістю роторів при T , близькому до першого нуля АКФ сигналів. На п'ятому етапі здійснюється якісний аналіз форм ФП і за характерними формами ФП визначається відповідність ДС фону або БПЛА, а також кількість обертових роторів БПЛА. Для визначення швидкості обертання роторів переходять до шостого етапу – створення серії ФП, побудованих з часовими затримками, що перевищують T , близьке до першого нуля АКФ. На сьомому етапі здійснюється якісний аналіз зміни форм серії ФП, і за періодичністю появи схожих ФП, а також ди-

намікою зміни форм ФП оцінюється швидкість обертання роторів БПЛА.

Таким чином, запропонований метод дозволяє розділити ДС, відбиті від фону і від БПЛА, а також визначити тип БПЛА та оцінити швидкість обертання роторів.

Висновки. Для аналізу ФП ДС доцільно обирати часові затримки, близькі до першого нуля АКФ ДС і більше. Вибір часових затримок, близьких до першого мінімуму СВІ, є менш інформативним. Форма ФП фонового сигналу при часових затримках більше першого нуля АКФ практично не змінюється і може бути охарактеризована як випадковий рух зображувальної точки по фазовій траєкторії в центрі ФП. Поява на краях ФП характерних областей дозволяє розділити фоновий сигнал і сигнал при зондуванні обертового ротора, а фонові складова проявляється в центрі ФП. У випадку зондування обертового ротора БПЛА форма ФП ДС залежить від величини часової затримки. При її збільшенні схожі форми ФП проявляються з періодом, який дорівнює періоду ДС. Із збільшенням швидкості обертання ротора періодичність появи схожих ФП зменшується. Періодичний характер змін форм ФП ДС при збільшенні кількості зондованих роторів БПЛА зберігається. У цьому випадку форми ФП ДС значно відрізняються для різної кількості роторів на БПЛА. Також форма ФП залежить від величини часової затримки, яка використовувалася для їх побудови.

Запропоновано метод аналізу ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням ФП, який дозволяє розділити фоновий ДС і ДС, відбитий від БПЛА, а також визначити кількість роторів на БПЛА і оцінити швидкість їх обертання. У процесі подальших досліджень доцільно оцінити можливість аналізу складності ФП ДС, побудованих при різних часових затримках з використанням величини фрактальної розмірності.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Радиоуправляемые мультикоптеры. Различные виды мультикоптеров. *LIVEJOURNAL*. URL: <https://rcdrone.livejournal.com/5115.html>
2. Асмаков С. Современные мультикоптеры: многообразие моделей и проблема выбора. *КомпьютерПресс*. URL: <https://compress.ru/post/20160601-m-copters-choice>
3. Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Левадный Ю.В. Частотно-временной анализ радиолокационных отражений от мультироторного БПЛА. *Радиофизика та електроніка*. 2019. Т. 24, № 4. С. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.04.035>.

4. Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности*. Пер. с франц. Москва: Мир, 1991. 368 с.
5. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. *Современные проблемы нелинейной динамики*. Москва: Едиториал УРСС, 2002. 360 с.
6. Мун Ф. *Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров*. Пер. с англ. Москва: Мир, 1990. 312 с.
7. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. by D.A. Rand L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. P. 366–381.
8. Пашченко Р.Э., Кортунов В.И., Цюпак Д.О., Барданова О.А. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2013. № 4(13). С. 68–72.
9. Пашченко Р.Э., Цюпак Д.О., Ратайчук И.А., Барданова О.А. Анализ формы фазовых портретов при изменении времени задержки для распознавания БПЛА мультироторного типа. *Системи обробки інформації: зб. наук. праць*. Харків. Нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. Харків, 2015. Вип. 1(126). С. 44–49.
10. *K-Band CW Transceiver IPS-154*. URL: <https://www.innosent.de/en/radar-systems/product-finder/>
11. *FRACTAN*. Программа для вычисления корреляционной размерности и корреляционной энтропии по временному ряду данных. URL: <http://www.iki.rssi.ru/magbase/RESULT/APPENDIX/fractan.boom.ru/soft.htm>

Стаття надійшла 13.07.2020

REFERENCES

1. RC multicopters. Different types of multicopters. *LIVEJOURNAL*. Available at: <https://rcdrone.livejournal.com/5115.html> (in Russian).
2. Asmakov, S. Modern multicopters: variety of models and problem of choice. *KomputerPress* (in Russian). Available at: <https://compress.ru/post/20160601-m-copters-choice>
3. Pashchenko, R.E., Ivanov, V.K., Tsyupak, D.O., Levadny, U.V., 2019. Frequency-temporal analysis radar reflections from multicopter drone. *Radiofiz. Elektron.*, 24(4), pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.04.035> (in Russian).
4. Berge, P., Помо, I., Vidal, K., 1991. *Order in chaos. About deterministic approach to turbulence*. Translated from French. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
5. Malineckij, G.G., Potapov, A.B., 2002. *Modern problems of nonlinear dynamics*. Moscow: Editorial URSS Publ. (in Russian).
6. Mun, F., 1990. *Chaotic vibrations: Introductory course for researches workers and engineers*. Translated from English. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
7. Takens, F., 1981. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. by D.A. Rand L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 366–381.
8. Paschenko, R.E., Kortunov, V.I., Tsyupak, D.O., Bardanova, O.A., 2013. Recognition Drone of multi-rotor type with the use phase portraits. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 4(13), pp. 68–72 (in Russian).
9. Pashchenko, R.E., Tsyupak, D.O., Ratajchuk, I.A., Bardanova, O.A., 2015. Analysis form of phase portraits at a change time delay for recognition Drone of multi-rotor type. In: Yu.V. Stasev, ed. 2015. *Information Processing Systems*. Kharkiv: Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University (KNAFU) Publ. 1(126), pp. 44–49 (in Russian).
10. *K-Band CW Transceiver IPS-154*. Available at: <https://www.innosent.de/en/radar-systems/product-finder/>
11. *FRACTAN*. Program for the calculation of cross-correlation dimension and cross-correlation entropy on the temporal information row. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/magbase/RESULT/APPENDIX/fractan.boom.ru/soft.htm>

Received 13.07.2020

R.E. Pashchenko, V.K. Ivanov, D.O. Tsyupak

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

USAGE OF PHASE PORTRAITS IN ANALYSIS OF DOPPLER SIGNALS REFLECTED FROM DRONE ROTORS

Subject and Purpose. Comparative analysis of the shapes of phase portraits of Doppler signals (DS) reflected from drone rotating rotors is given with regard to different time delays. The shapes of DS phase portraits are examined for various rotational velocities and numbers of the rotating rotors.

Methods and Methodology. A method using phase portraits is suggested for analysis of Doppler signals reflected from drone rotating rotors. The method determines the number of the rotors and estimates their rotational velocities.

Results. It has been found that the shape of the phase portrait of the baseline signal is practically independent of the time delay and can be described as an occasional movement of the image point following the phase trajectory in the center of the phase portrait. The appearance of characteristic regions on the periphery of the phase portrait allows separating baseline and sounding signals. It has been shown that the shape of the DS phase portrait of the rotating rotor during the flight movement of the drone depends on the time delay value. With a larger delay, phase portraits similar in shape appear at regular intervals equal to the Doppler signal period. With a larger rotational velocity of the rotor, the rate of similar phase portrait appearance diminishes.

Conclusion. During the sounding of drone rotating rotors, the shapes of DS phase portraits depend on the value of time delay. With a larger number of rotors in the drone flight, the periodic change character as to the DS phase portrait shape remains unchanged. In this case, DS phase portrait shapes differ substantially for different numbers of drone rotors.

Key words: Doppler signal, drone, pseudophase plane, phase portrait.