

УДК 550.341+550.834  
OECD 01.03.AA

## Акустический шум низколетящего квадрокоптера

Заславский Ю.М.<sup>1</sup>, Заславский В.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>В.н.с., ИПФ РАН, Н.Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>1,2</sup>с.н.с., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород, пр. Гагарина, 23

### Аннотация

Выполнен спектральный анализ акустического шума, создаваемого квадрокоптером, барражирующим с невысокой полетной скоростью на высоте "птичьего полета" над обширным участком равнинной местности, лишенной растительности и строений. Исследованы характерные особенности спектрального состава шума, создаваемого в режимах взлета, горизонтального полета с маршевой скоростью, спуска и приземления, полученные по результатам регистрации на незначительных дистанциях до источника. Материалы обработки и анализа акустических сигналов представляют интерес для удаленного контроля движения БПЛА легкого класса.

**Ключевые слова:** воздушно-акустический шум, амплитудный спектр, малые беспилотные летные средства.

### *Acoustic noise of a low flying quadrocopter*

Zaslavsky Yu.M.<sup>1</sup>, Zaslavsky V.Yu.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Leader scientific researcher, Institute of applied physics, Russian academy of science, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>1,2</sup>Senior scientific researcher, Institute of applied physics, Russian academy of science, Nizhny Novgorod, Russia

### Abstract

A spectral analysis of the acoustic noise created by a quadrocopter, bartering at a low flight speed at a bird's-eye height over a vast area of flat terrain devoid of vegetation and buildings, was performed. The characteristic features of the spectral composition of noise generated in take-off, horizontal flight with marching speed, descent and landing, obtained from the results of recording at small distances to the source, are investigated. Acoustic signal processing and analysis materials are of interest for remote control of the movement of light class UAVs.

**Key words:** air-acoustic noise, amplitude spectrum, small unmanned aerial vehicles.

### Введение

Удаленный контроль с помощью телекамер наблюдения, устанавливаемых на воздушных движущихся носителях – дронах и квадрокоптерах, востребован во многих сферах деятельности. К ним относится контроль за движением наземного авто и железнодорожного транспорта, съемка посевных площадей и сельскохозяйственных угодий, выявление пожаров в лесных массивах. Пилотирование выполняется оператором с пункта управления по радиоканалу, по которому передается также видеоинформация. Вместе с тем, в ряде случаев оказывается необходимым независимый контроль за

местоположением самого квадрокоптера и его параметрами, в связи с чем, представляет интерес анализ спектрального состава, уровня и особенностей собственного акустического шума, сопровождающего его полет. Акустический шум беспилотных летательных средств подробно и широко исследуется рядом авторов [1-10]. Актуальность проблемы объясняется, в частности тем, что квадрокоптер – малозаметный объект с малым по величине сечением рассеяния при радиолокационной пеленгации. По сравнению с обширными и известными исследованиями акустического шума полномасштабных "винтокрылых" летательных аппаратов и дронов исследования шума квадрокоптера вертолетного типа, проведенные к настоящему времени, представляются далеко не полными.

## 1. Исследование акустического шума квадрокоптера

Характерным признаком акустического шума, порождаемого его винтомоторной группой, является стрекочущий, жужжащий звук низкой интенсивности, обнаруживаемый и регистрируемый на земной поверхности в ограниченной десятками метров окрестности от летящего на незначительной высоте квадрокоптера. По результатам обработки акустического сигнала, регистрируемого микрофоном, вообще говоря, представляет интерес получение данных, обеспечивающих возможность идентификации летательного аппарата данного класса, диагностики выполняемого им маневра, извлечения информации, полезной для контроля за его местоположением и параметрами движения, такими как текущая скорость и ее направление.

В натурном эксперименте по регистрации шума апробирован зарубежный образец квадрокоптера, предлагаемый фирмами-посредниками в коммерческих целях для обслуживания сельскохозяйственных угодий и хозяйств лесничества – для контроля противопожарной обстановки. Его масса имеет порядок 3 кг, маршевая скорость при горизонтальном полете находится в пределах 16-23 м/с, достижимая высота (потолок) – 500 м. Квадрокоптер снабжен четырьмя электромоторами постоянного тока, автономно запитываемыми от аккумуляторов через цепь питания, регулирующую по радиоканалу. Электродвигатели расположены в углах четырехугольника с максимальным габаритом ~ 0,55 м, при этом каждый двигатель приводит во вращение закрепленный на его оси двухлопастной винт с вращением лопастей в горизонтальной плоскости (полный размах лопастей ~ 0,25 м). Для поступательного движения квадрокоптера и выполнения им маневренного движения по вертикали, азимуту и тангажу предусмотрено регулирование скорости вращения каждого винта, которое осуществляется оператором с пульта управления.

Запись звукового сигнала выполнена при неблагоприятных метеоусловиях, не сопутствующих высокому ее качеству, т.е. в зимний период при температуре воздуха 0° – 5°С, скорости порывов ветра, достигающей ~ 6 м/с. Акустический фон в моменты спада "вихревых атмосферных потоков" зафиксирован на уровне ~ 60 – 65 дБ. Следует также отметить некоторые подробности, характеризующие условия регистрации. Так, при старте с поверхности земли и приземлении использовался близко расположенный к пультам участок территории (на удалении не более десятка метров), хорошо обозреваемый как внешней телекамерой, предназначенной для съемки полета и наблюдения за дроном, так и камерой, "встроенной" в дрон-носитель. Регистрация акустического шума выполнена с помощью конденсаторного измерительного микрофона, входящего в комплект внешней видеокамеры наблюдения.

Ниже излагаются характерные или специфические особенности спектра акустического излучения, зарегистрированного экспериментально. Они представляют интерес для пассивной шумопеленгации, т.е. целеуказания, а также могут быть полезны

в исследованиях различных физических механизмов шумоизлучения, проявляющихся, например, при вращении вертолетного винта.

## 2. Результаты спектральной обработки акустического шума

Спектральный анализ акустического шума квадрокоптера выполнен в случаях его регистрации в следующих основных, "предполетных" и "послеполетных" режимах: старт – отрыв от земли и взлет, зависание над местом старта, полет с маршевой скоростью (на удалениях в несколько десятков метров), посадка и приземление. Для анализа, как правило, используются выборки сигнала длительностью  $T = 7...9$  с. Необходимо подчеркнуть, что полезный сигнал лишь незначительно превышает уровень фона в моменты его спада при затихающих порывах ветра.

### 2.1. Старт

На рис. 1 представлена амплитудная спектрограмма акустического шума в полосе частот 0 – 2000 Гц, когда квадрокоптер начинает отрыв от поверхности грунта. В спектре присутствует набор дискретных компонент, которые образуют эквидистантный частотный ряд, характерный для шума, создаваемого каждым винтом. Независимая "запитка" мотора каждого винта, необходимая для маневрирования, обуславливает некоторое различие в скорости их вращения. Поэтому дискретные компоненты одинакового номера, порождаемые разными винтами, несколько сдвинуты по частоте, что приводит к уширению или размытию линий в спектре суммарного акустического поля. Дискретные компоненты спектра следуют с интервалом  $\Delta f \sim 200 - 214$  Гц и соответствуют ряду лопастных частот. Известно, что основная (первая) лопастная частота равна оборотной частоте, умноженной на число лопастей и, поскольку лопастей две, она в два раза выше нее. Оборотная частота, таким образом, близка к  $f_{об} = 100$  Гц. Такое значение удовлетворительно согласуется с таким показателем как номинальная скорость вращения ротора в пределах  $\sim 5000 - 6000$  об/мин, стандартно используемая в миниатюрных электродвигателях (с постоянным напряжением на обмотках).

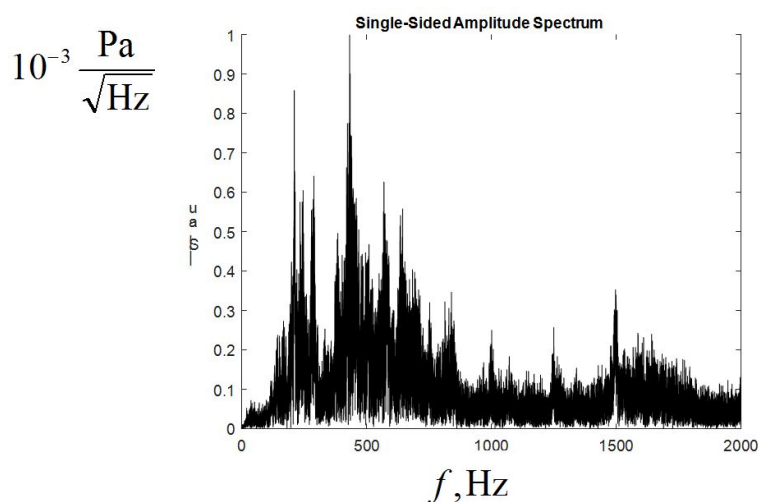


Рис. 1. Амплитудный спектр шума в режиме старта

### 2.2. Режим зависания над местом старта

Последующие секунды после стартового включения винтов квадрокоптера сопровождаются его быстрым отрывом от поверхности, набором незначительной высоты

и некоторым горизонтальным смещением относительно места старта, так что от точки зависания источника до микрофона образуется дистанция порядка двух десятков метров. Несколько опережая изложение, можно отметить, что та же дистанция характерна для режима торможения и зависания при возвращении квадрокоптера оператором в исходный квадрат территории после выполнения полетной программы.

На рис. 2 представлена спектрограмма шума в условиях зависания квадрокоптера. Нетрудно видеть качественное сходство с предыдущим случаем в характере спектра. Вместе с тем, шаг по частоте в последовательности дискрет, оказывается ниже прежнего и составляет  $\Delta f \cong 143$  Гц. Имеет место понижение скорости вращения винтов.

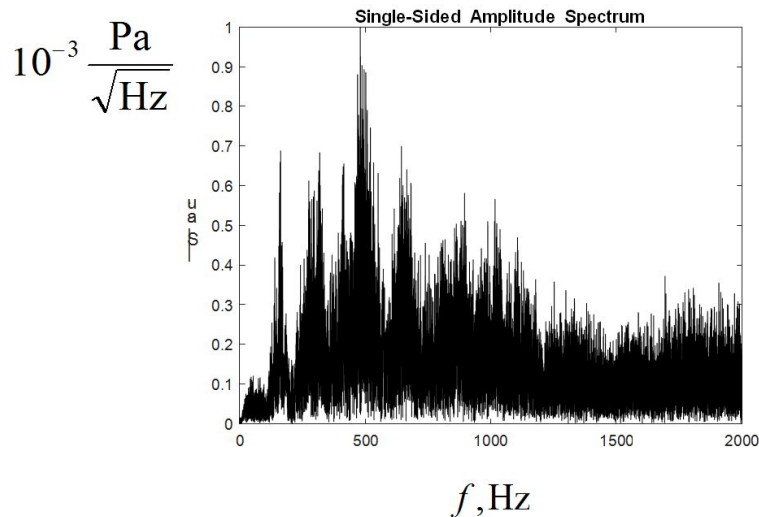


Рис. 2. Амплитудный спектр шума в режиме зависания

### 2.3. Полет с маршевой скоростью

На основном измерительном этапе эксперимента выполнена регистрация полезного сигнала – акустического шума, возникающего при полете квадрокоптера с маршевой скоростью  $\sim 20$  м/с. В процессе проведения нескольких сеансов реализован горизонтальный полет с разными направлениями движения, при этом минимальные удаления квадрокоптера от микрофона на траверзе составляют десятки метров при значении высоты полета того же порядка. Этот этап приходится на завершение демонстрационного пилотирования квадрокоптера по коммерческой программе, в которой выполняется сложное барражирование в высотном коридоре 50...150 м с последующим движением обратным курсом к месту старта.

На рис. 3 демонстрируется соответствующий частотный спектр акустического шума, регистрируемого при горизонтальном полете квадрокоптера с вышеуказанной маршевой скоростью. Шаг периодичности в дискретном спектре составляет  $\Delta f \cong 172$  Гц. Следовательно, скорость вращения винтов несколько выше, чем в предыдущем режиме. Теперь во всей полосе анализа наблюдается достаточно регулярная периодическая модуляция амплитудного спектра с ростом частоты, обусловленная ранее указанной причиной. Заметно повышается вклад более высокочастотных компонент в общий уровень шума. Переход к рассматриваемому режиму движения дрона отличается некоторой вариабельностью, т.е. сопровождается более значительными, чем ранее качественными, а также количественными изменениями, характеризующими спектр шума.

В дальнейших исследованиях рассматриваемого режима, проведение которых

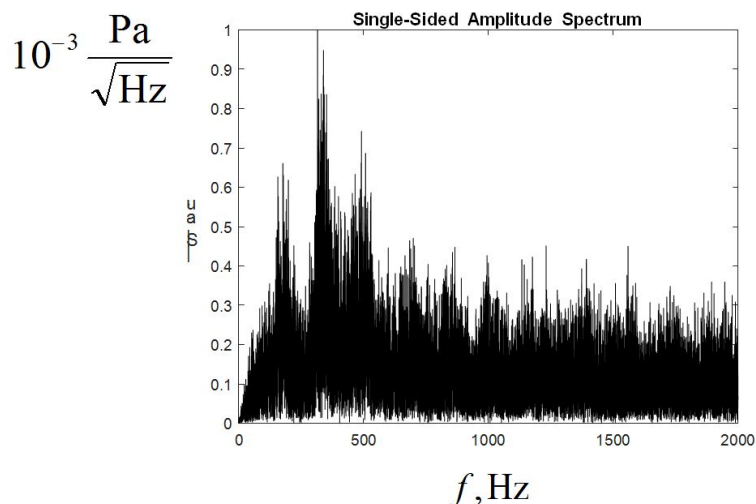


Рис. 3. Амплитудный спектр шума в режиме полета с маршевой скоростью

предполагается при более благоприятных метеоусловиях, т.е. при более низком уровне атмосферного акустического фона, наряду со спектром шума интересно также построить кривые спада общего уровня шума с ростом дистанции от квадрокоптера до места регистрации.

#### 2.4. Приземление – посадка

На заключительном этапе полета, т.е. перед контактом или касанием поверхности посадочными стойками квадрокоптера, оператором с пульта управления обеспечивается режим зависания примерно над исходной стартовой точкой на высоте, не превышающей десятка метров, а затем и его плавное приземление. На рис. 4 представлен амплитудный спектр шума, характерный для режима, соответствующего заключительному этапу. Шаг периодичности спектральных максимумов (дискретных компонент) на оси частот возвращается к исходным значениям  $\Delta f \cong 216$  Гц.

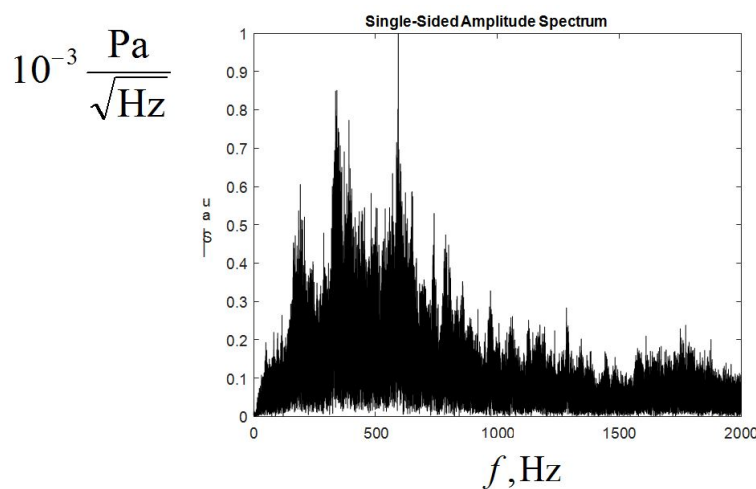


Рис. 4. Амплитудный спектр шума в режиме приземления

#### Заключение

Выполнены обработка и спектральный анализ акустического шума квадрокоптера

при различных режимах движения, включая старт и приземление. Демонстрируется возможность интерпретации специфического вида спектра шума в соответствии с режимами старта, горизонтального полета и приземления. Показано, что для данного типа квадрокоптера характер амплитудного спектра, расположение амплитудных максимумов на оси частот следует рассматривать как информативные признаки, которые целесообразно принять в качестве основы для идентификации или классификации летательного аппарата по данным шумопеленгации. Указанные признаки при всех режимах работы сохраняют подобие, оказываются устойчивыми или слабо переменными.

Таким образом, результаты анализа спектра акустического шума квадрокоптера указывают на принципиальную возможность локализации и идентификации беспилотного летательного аппарата (самого легкого класса) и предварительного прогноза параметров движения при пассивной шумопеленгации с использованием данных о его собственном акустическом шуме, зарегистрированном на поверхности земли. Дальнейшие исследования акустических шумов квадрокоптеров с иными конструктивными особенностями и с другой комплектацией винтомоторной группы безусловно расширят представление об их акустических характеристиках и будут способствовать развитию удаленного контроля за миниатюрными беспилотными летательными аппаратами с вертолетными винтами.

### Список литературы

1. Карташов В.М., Шейко С.А., Олейников В.Н., Бабкин С.И., Корытцев И.В. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов - [oreparchive.nure.ua](http://oreparchive.nure.ua) - 2017
2. Даник Ю.Г., Бугаёв Н.В., Поздняков П.В. Распознавание беспилотных летательных аппаратов по характеру акустического излучения. / Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Физика (Гродно) ISSN: 2076-4847 Т. 7, № 1, 2017.
3. Мошков П.А. Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101-106
4. Глазков В.В. Реализация устройства распознавания наземных и воздушных объектов по акустическому сигналу. - Наука и Мир, 2017 - [elibrary.ru](http://elibrary.ru)
5. Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В.Ф. Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (дата обращения 25.07.2015).
6. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. – М.: Физматлит, 2014. – 328 с.
7. Луценко В.И., Луценко И.В., Соболяк А.В. Пассивные акустические системы разведки, дальность их действия и разрешающая способность. 2014 - [repository.kpi.kharkov.ua](http://repository.kpi.kharkov.ua)
8. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. К анализу воздушно-акустического поля катера на воздушной подушке. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского 2009, №3, с.61-68.
9. Джанакирам Д.С., Скраггс Б.В. Характеристики обнаруживаемости и шума маломасштабных воздушных винтов беспилотных летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника. 1983. Т. 1. № 10. С. 108-117.

10. Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers // Air Force Aero Propulsion Laboratory (AFAPL). Wright-Patterson AFB. Ohio. Technical Report AFAPL-TR-71-31, June 1971. 192 p.

### References

1. Kartashov V.M., Sheiko S.A., Oleinikov V.N., Babkin S.I., Koryttsev I.V. Information Characteristics of the Sound Emission of Small Unmanned Aerial Vehicles - openarchive.nure.ua - 2017

2. Danik Yu.G., Bugaev N.V., Pozdnyakov P.V. Recognition of unmanned aerial vehicles by the nature of acoustic radiation. / Bulletin of the Grodno State University named after Yanka Kupala. Series 2. Physics (Grodno) ISSN: 2076-4847 T. 7, No. 1, 2017.

3. Moshkov P.A. Classification of noise sources of light propeller-driven aircraft on the ground // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2015. No 4. S. 101-106

4. Glazkov V.V. Implementation of a recognition device for ground and air objects by an acoustic signal. - Science and the World, 2017 - elibrary.ru

5. Kazhan V.G., Moshkov P.A., Samokhin V.F. The natural background when conducting acoustic tests of aircraft at the airfield based on small aircraft // Science and Education: Scientific Edition of MSTU. N.E. Bauman. 2015. No 7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (accessed July 25, 2015).

6. Ostroukhov S.P. Aerodynamics of propellers and propellers. - M.: Fizmatlit, 2014 . - 328 p.

7. Lutsenko V.I., Lutsenko I.V., Sobolyak A.V. Passive acoustic intelligence systems, their range and resolution. 2014 - repository.kpi.kharkov.ua

8. Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu. On the analysis of the air-acoustic field of a hovercraft. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky 2009, No. 3, p. 61-68.

9. Janakiram D.S., Scruggs B.V. Detectability and noise characteristics of small-scale propellers of unmanned aerial vehicles // Aerospace Engineering. 1983. T. 1. No. 10. S. 108-117.

10. Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers // Air Force Aero Propulsion Laboratory (AFAPL). Wright-Patterson AFB. Ohio. Technical Report AFAPL-TR-71-31, June 1971. 192 p.