

УДК: 534.83:629.735.33

OECD: 01.03.AA

Экспериментальное исследование особенностей формирования спектра шумов беспилотного летательного аппарата

Гончаренко Б.И.¹, Кузьменков В.Ю.², Котов А.Н.^{3*}

¹ К.ф-м.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры «Акустика», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, РФ

² К.т.н., старший научный сотрудник, начальник отдела ОКБ «ЛЭМЗ» ПАО

«Научно-производственное объединение «Алмаз» им. А.А. Расплетина, г. Москва, РФ

³ Научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, РФ

Аннотация

Представлены результаты натурных экспериментов с целью изучения акустических и электромагнитных шумов четырёхмоторного беспилотного летательного аппарата («квадрокоптера») на этапе взлёта, висения и полёта с маневрированием в различных условиях. Отмечено существенное изменение собственной частоты магнитного шума излучения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на взлёте с одновременным обогащением спектра в низкочастотной области. Аналогичный эффект не наблюдается в режиме висения, при этом характерный спектр шумов БПЛА естественно зависит от высоты полёта и обусловлен в основном турбулентностью в зоне аэродинамического контакта вращающегося винта с вмещающей средой. Проанализированы изменения частотного состава шумов малогабаритного БПЛА в различных режимах горизонтального полёта с маневрированием, а также явление интерференции с образованием «зон тени» в результате отражения звука от дневной поверхности, в том числе и в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, резонансные частоты, шум электромагнитного происхождения, режим полёта, спектры излучаемых и фоновых шумов, городские условия.

Experimental study of the peculiarities of the formation of the noise spectrum of the unmanned aircraft

Goncharenko B.I.¹, Kuzmenkov V.Yu.², Kotov A.N.^{3*}

¹ PhD, senior researcher, associate professor of the department of Acoustics,
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

² PhD, senior researcher, head of department OKB 'LEMZ' Public Society Almaz Scientific
and Production Association named after A.A. Raspletin, Moscow, Russia

³ Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physics of the Earth
O.Yu. Schmidt of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The results of field experiments aimed at studying the acoustic and electromagnetic noise of a four-engine unmanned aerial vehicle ("quadcopter") at the stage of take-off, hovering and flight with maneuvering under various conditions are presented. A significant change in the natural frequency of the magnetic noise of the

radiation of an unmanned aerial vehicle (UAV) during takeoff was noted with a simultaneous enrichment of the spectrum in the low-frequency region. A similar effect is not observed in the hover mode, while the characteristic noise spectrum of the UAV naturally depends on the flight altitude and is mainly due to turbulence in the zone of aerodynamic contact of the rotating propeller with the enclosing medium. Changes in the frequency composition of the noise of a small-sized UAV in various modes of horizontal flight with maneuvering, as well as the phenomenon of interference with the formation of "shadow zones" as a result of sound reflection from the day surface, including in dense urban areas, are analyzed.

Keywords: unmanned aerial vehicle, resonant frequencies, electromagnetic noise, flight mode, spectra of radiated and background noise, urban conditions.

Введение

Широкое применение малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в различных сферах человеческой деятельности, в том числе – на территории крупных городских агломераций, определяет необходимость решения комплекса проблем идентификации, контроля географической позиции и состояния воздушного объекта, а также безопасной навигации и оперативной оценки потенциальных рисков эксплуатации технического средства повышенной опасности особенно в городских условиях.

Многообразие конструкций беспилотных летательных аппаратов предполагает различные механизмы возбуждения, уровни и спектральный состав генерируемого акустического шума. Основным источником излучаемого шума является его силовая установка, состоящая из различного рода двигателей и воздушных винтов, количество, конструкция и компоновка которых также может различаться. В работе [1] приведены основные результаты акустических испытаний силовой установки малоразмерного БПЛА в аэродинамической трубе для нескольких режимов работы силовой установки летательного аппарата при изменении скорости воздушного потока. Показано, что для БПЛА с двухтактным поршневым двигателем и воздушными винтами в режиме малого газа интенсивность гармонического излучения от выхлопа двигателя и от воздушного винта примерно одинакова в области частот ниже 2,5 кГц. Для первых пяти гармоник вклад шума винта в суммарную интенсивность акустического излучения составляет примерно 38 %. На крейсерской скорости вклад шума винта в суммарную интенсивность акустического излучения составляет около 23 %, а в режиме полного газа – лишь 3 %.

Исследования акустических характеристик летательных аппаратов вертолетного типа (мультикоптеров), оборудованных бесколлекторными двигателями постоянного тока, показали, что основной шум обусловлен вращающимися винтами пропеллеров, при этом в спектральных характеристиках в диапазоне частот до 5 кГц наблюдаются периодические гармоники, уровень амплитуды которых зависит от типа БПЛА[2]. Были исследованы в натурных и лабораторных условиях закономерности распределения амплитуды звукового давления для различных высот полёта квадрокоптера, в целом соответствующие сферическому закону, а незначительные отклонения обусловлены наличием диаграммы направленности излучаемого шума в вертикальной плоскости, что также было подтверждено на испытательном стенде[3]. Выполнено обобщение экспериментальных данных о направленности акустического излучения поршневых силовых установок, применяемых на летательных аппаратах самолетного типа, в том числе и в заглушенной камере[4, 5, 10].

Практический интерес представляют измерения акустического и магнитного полей БПЛА при различных режимах полета в естественных и городских условиях с целью определения наиболее характерных вариаций спектра его собственных шумов,

доминантных частот и их субгармоник, которые могут быть использованы в решении задач идентификации и контроля состояния воздушного объекта повышенной опасности.

1. Постановка натурных экспериментов

В качестве основного объекта исследования был выбран четырёхмоторный беспилотный летательный аппарат вертолётного типа («квадрокоптер»). Основной эксперимент проводился в летний период на полигоне близ г. Ногинска. Температура воздуха на полигоне составляла около 20 °С, влажность – 55 %, ветер преимущественно южный, не более 3 м/с. Для измерения акустических сигналов использовался шумомер первого класса точности и микрофон со сферической диаграммой направленности и рабочей полосой частот от 2 Гц до 20 кГц. Шумомер был закреплён на треноге, в метре от земной поверхности. Земная поверхность в районе проведения эксперимента представляла собой пространство поросшей травой и местами небольшими кустарниками. С целью снижения влияния вибраций дневной поверхности тренога размещалась на демпфирующей прослойке из резиноподобного материала, а для борьбы с ветровой помехой использовалась штатная ветрозашита. Информационно-измерительный тракт, включающий также и систему цифровой регистрации, перед началом эксперимента был откалиброван с помощью калибратора уровня звука на частоте 1000 Гц при двух уровнях 94 дБ и 114 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Дополнительный эксперимент также был проведен в летний период на территории Координационно-прогностического центра ИФЗ РАН в поселении Мосрентген (территория новой Москвы), расположенной в непосредственной близости от кольцевой автодороги и плотной городской застройки. Помимо микрофона со сферической диаграммой направленности и чувствительностью 50 мВ/Па в полосе 6,3 Гц – 20 кГц, одновременно индукционной катушкой регистрировались вариации магнитного поля. Синхронная регистрация обоих измерительных каналов обеспечивалась при помощи автономный многофункциональной системы сбора данных Brüel & Kjaer. Последующая обработка данных включала проведение спектрально-временного анализа для получения различных амплитудных спектров и спектрограмм.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Первые измерения шумов квадрокоптера были проведены при нахождении летательного аппарата на дневной поверхности в предполетном режиме (рис.1). Рассмотрим особенности спектрального состава шума квадрокоптера в полосе частот 100 – 20000 Гц. В низкочастотной области наблюдаются тональные составляющие частоты ≈ 185 Гц (вторая и третья гармоники), обусловленные конструкцией лопастей несущих винтов. Значения лопастных частот удовлетворительно согласуется с номинальной скоростью вращения ротора ≈ 6000 об/мин для используемого электродвигателя постоянного тока.

В спектре наблюдается максимальное значение сигнала на частоте ≈ 3800 Гц и ее вторая гармоника.

Проясним природу возникновения этой частоты. В квадрокоптере используется электродвигатели постоянного тока. Известно, что существуют источники шума электромагнитного происхождения. В различных электрических машинах причиной появления колебаний могут быть силы не только механического, но и электромагнитного происхождения, связанные с наличием переменных магнитных полей. Силы и моменты сил магнитного происхождения возникают обычно в воздушных зазорах электрических машин при относительном движении ротора и статора, поэтому порождаемый ими шум существенным образом зависит от геометрии изменяющегося во времени зазора. Показано, что собственная частота магнитного шума определяется произведением

частоты вращения на число зубцов (пазов) якоря и на $i=1,2,3$, [6]. В нашем случае при скорости вращения ротора ≈ 6000 об/мин и, если учесть, что число пазов якоря в миниатюрных электродвигателях не превосходит 15-20, получается первая гармоника собственной частоты магнитного шума расположена в диапазоне частот 3000 – 4000 Гц. Именно исследование этой частоты магнитного шума будет проанализировано в экспериментально зарегистрированном шуме квадрокоптера.

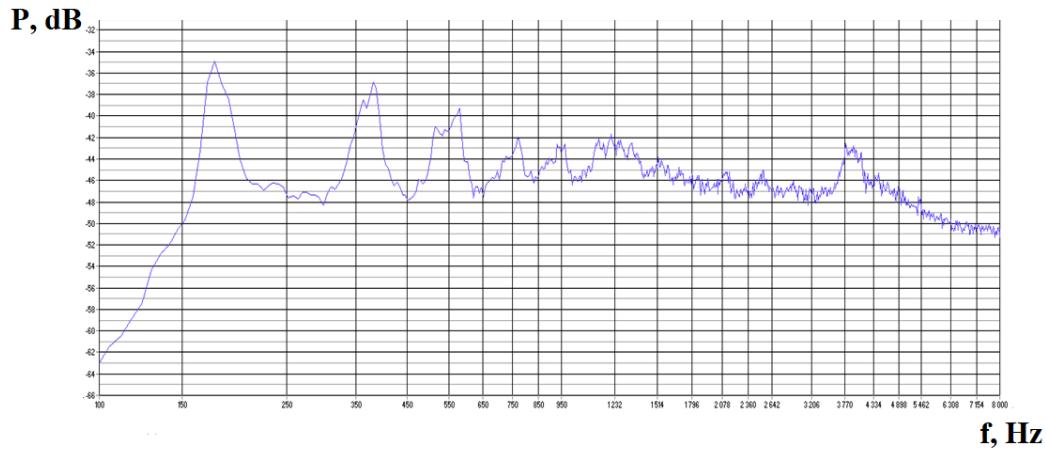


Рис. 1. Спектр шума квадрокоптера на поверхности земли в предполётном режиме

В этом эксперименте скорость вращения винтов не контролировалась, однако её изменение отчасти прослеживается на спектрограмме (рис. 2). Отметим обогащение спектра шумов с ростом скорости вращения винтов в диапазоне частот ниже 1 кГц, что естественно может быть связано с явлением резонанса отдельных конструктивных элементов БПЛА.

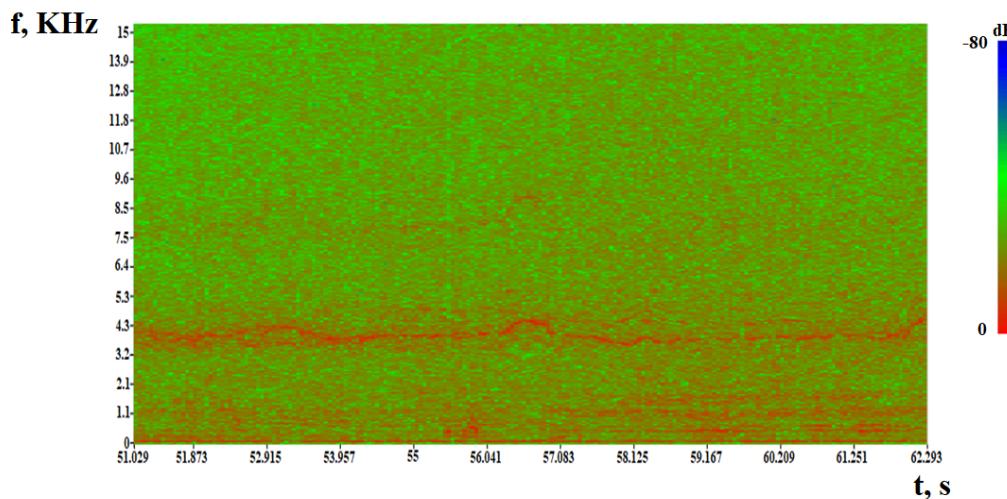


Рис. 2. Спектрограмма шума квадрокоптера в предполётном режиме при нарастании скорости вращения винтов

Далее БПЛА выполнил взлёт и набрал высоту около четырёх метров. На рис. 3 приведена соответствующая спектрограмма длительностью 9 с.

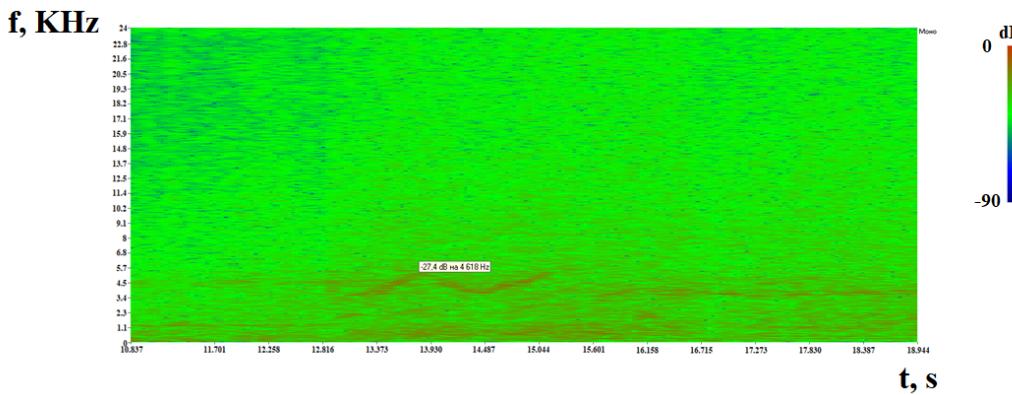


Рис. 3. Спектрограмма шумов квадрокоптера на этапе взлёта и висения на высоте 4 м.
Красный цвет соответствует максимальной амплитуде сигнала,
синий цвет – минимальной

Видно, что значение собственной частоты магнитного шума при взлёте претерпевает существенные изменения: в интервале времени от 13 до 16 с они охватывают диапазон от 3300 до 4600 Гц с одновременной выраженностью низкочастотных спектральных компонент. В режиме висения (16 – 19 с) значение этой частоты закономерно стабилизируется.

Следующие эксперименты предполагали пролёты БПЛА на различных высотах с максимальным удалением 300 м, как по направлению ветра, так и встречным курсом. Скорость полета квадрокоптера при этом составляла 17 и 8 м/с соответственно. Отметим, что порывы ветра могут существенно влиять на распространение звука [6, 7] с перепадами уровней шума до 20 дБ. На рис. 4 представлены спектры шумов полигона и полёта квадрокоптера на высоте 30 м.

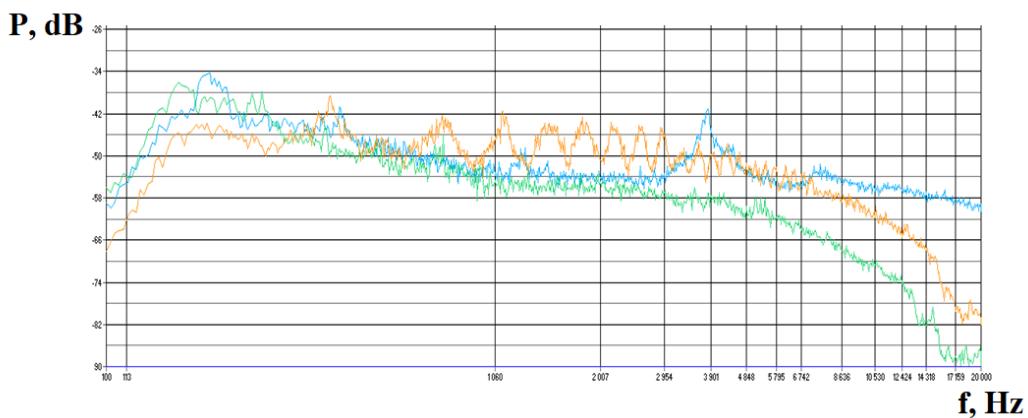


Рис. 4. Спектры шумов полигона (зелёный), начала горизонтального полёта квадрокоптера (синий) и спустя 25 с (оранжевый)

В начале движения в спектре наблюдается собственная частота магнитного шума квадрокоптера (3800 Гц) и её гармоника. Также присутствует низкочастотная составляющая ~1240 Гц. Превышение сигнала над уровнем естественных помех в диапазоне частот 2400 – 20000 Гц обусловлено в основном турбулентностью в зоне аэродинамического контакта вращающихся винтов со средой. При удалении БПЛА от измерительной системы спектр шумов квадрокоптера обогащается компонентами в диапазоне от 750 до 4700 Гц, собственная частота магнитного шума отсутствует.

Спектрограмма (рис. 5) охватывает временной промежуток от начала полета квадрокоптера до момента, когда спектр излучаемых им шумов совпадает с фоновыми значениями (38 с). В начале полёта (первые 5 – 10 с) значение собственной частоты магнитного шума БПЛА меняется от 3300 до 3800 Гц и далее остаётся практически постоянным до 22-й секунды полета, после чего происходит обогащение спектра низкочастотными компонентами. Примерно через 40 секунд полёта шум квадрокоптера практически не регистрируется.

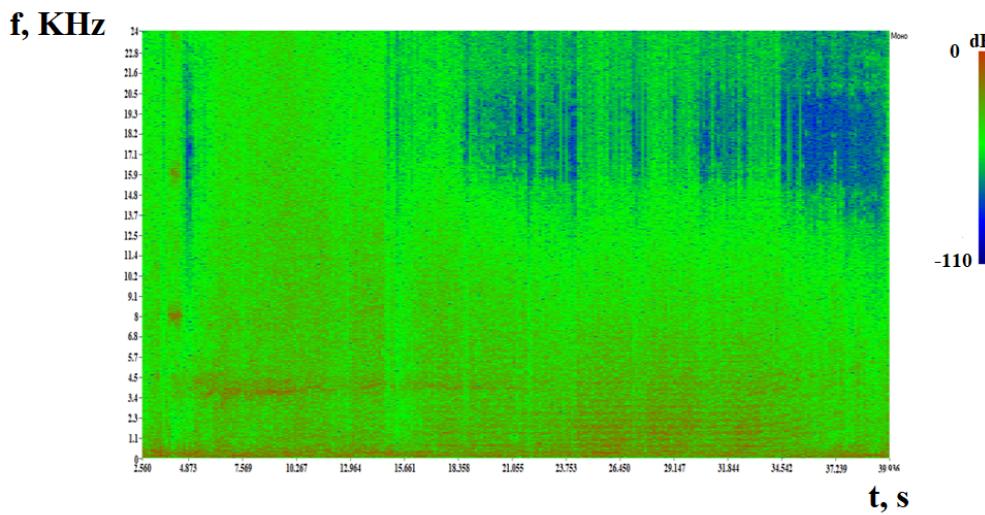


Рис. 5. Спектрограмма горизонтального полёта квадрокоптера, удаление от микрофона шумомера

На обратном пути полёт квадрокоптера проходил уже при встречном ветре, соответствующая спектрограмма показана на рис. 6.

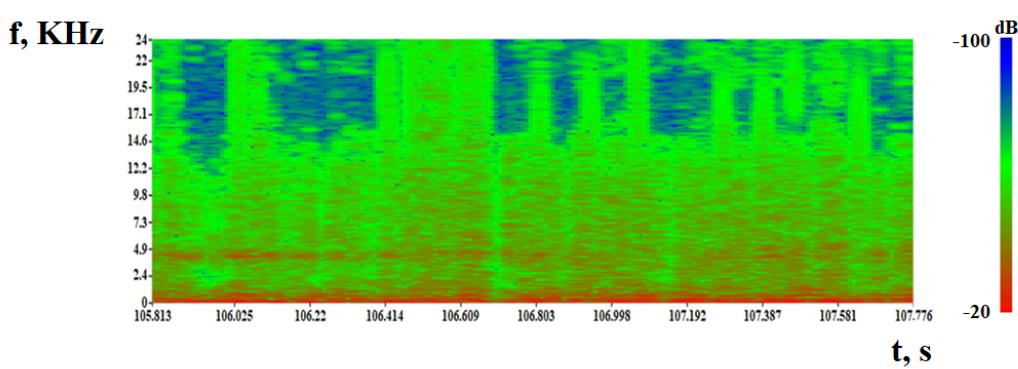


Рис. 6. Спектрограмма полета квадрокоптера в момент траверса

Наблюдается собственная частота создаваемого им магнитного шума (3800 Гц), значение которой практически не изменяется по мере удаления квадрокоптера от приемной системы. Следует отметить, что в некоторых промежутках времени наблюдается отсутствие сигнала на этой частоте, что связано с наличием интерференции звука при переотражении от поверхности земли и образованием зон акустической тени.

Далее высота полёта была увеличена до 50 м. На рис. 7 показаны спектры естественных шумов полигона и БПЛА, а на рис. 8 – соответствующая спектрограмма длительностью около 3 с. В диапазоне частот от 1700 до 14000 Гц наблюдается

существенное превышение шумов БПЛА над фоновыми значениями, собственная частота магнитного шума квадрокоптера не выражена.

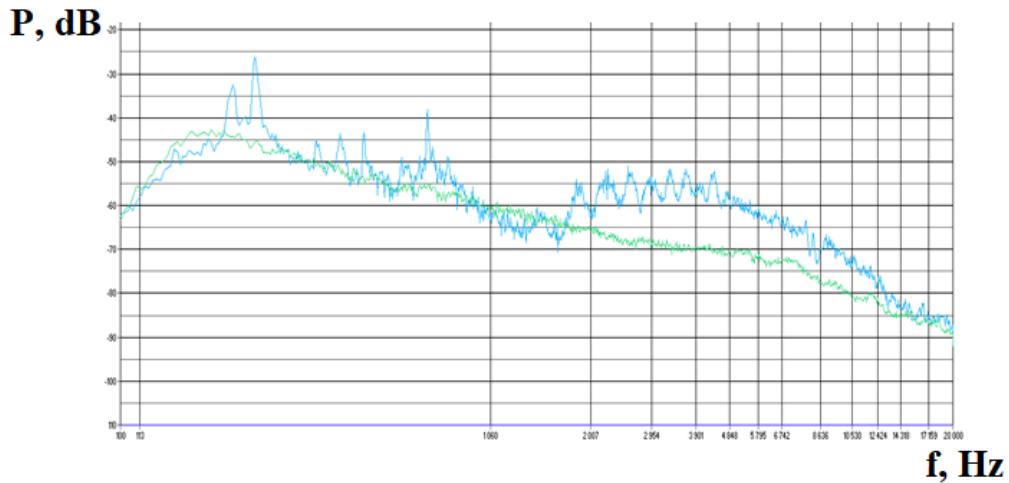


Рис. 7. Превышение шумов квадрокоптера (синий) над фоном полигона (зеленый) при полёте на высоте 50 м

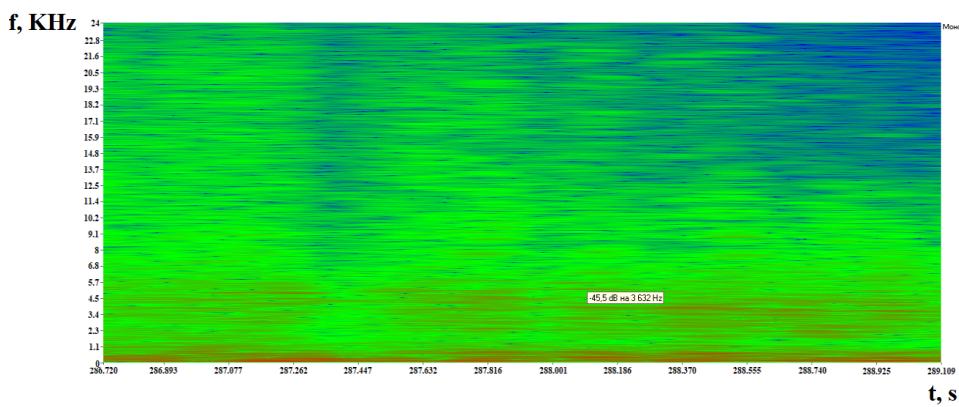


Рис. 8. Изменение спектрального состава шума квадрокоптера в момент траверса

На подлёте квадрокоптера к точке измерений наблюдается ряд спектральных компонент, как выше, так и ниже значения собственной частоты магнитного шума, отмеченной на рис. 8. Непосредственно над приемной системой в спектре наблюдается отсутствие шумового сигнала по причине интерференции звука за счёт переотражения от поверхности земли.

Вполне закономерно, что диапазон частот, для которого наблюдается превышение сигнала над фоном для высоты 30 м существенно шире (300 – 17000 Гц), чем для 50 м (1400 – 13500 Гц). При этом значения доминантных частот в диапазоне 1300 – 5000 Гц не зависят от высоты полета (рис. 9).

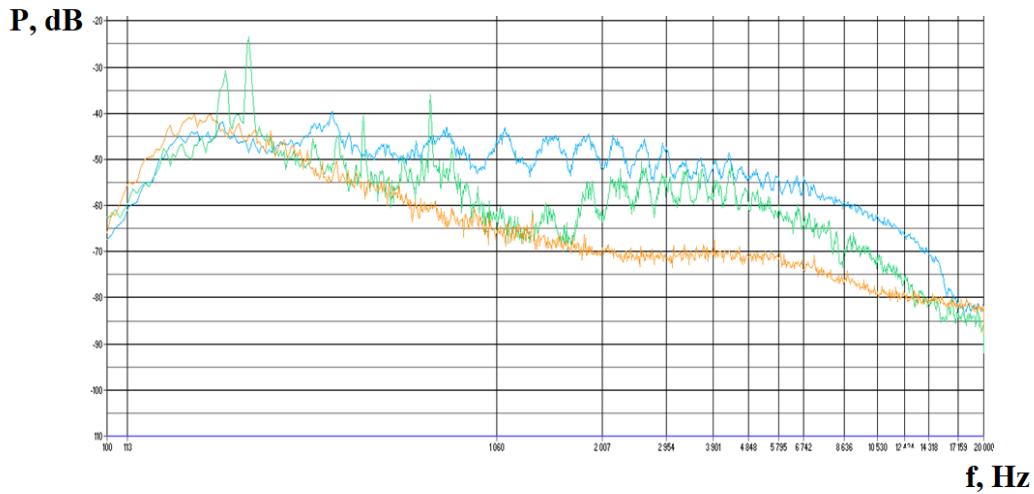


Рис. 9. Сравнение спектральных уровней при полете на высоте 30 м (синяя кривая)
 и высоте 50 м (зеленая кривая) на фоне естественных шумов полигона
 (оранжевая кривая)

Для удержания БПЛА на курсе, движение против ветра сопровождается маневрированием, что сопровождается незначительными изменениями собственной частоты магнитного шума и это отражено на спектрограмме (рис. 10).

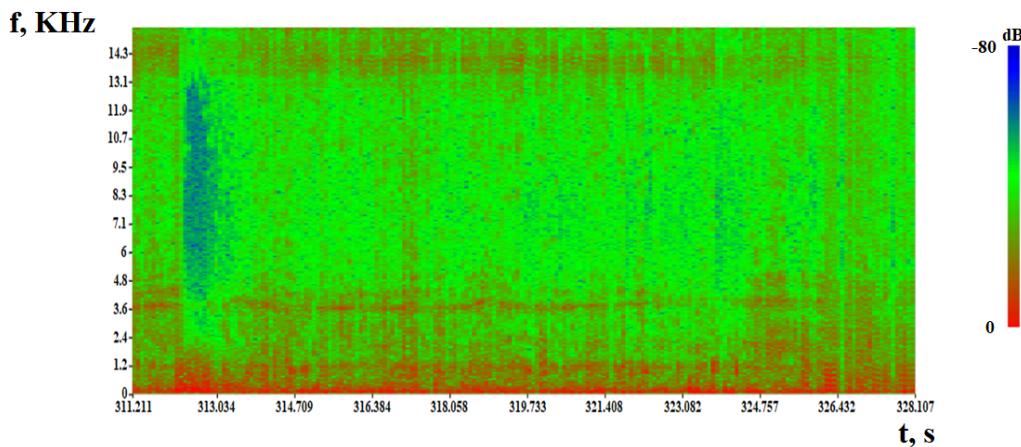


Рис. 10. Спектрограмма полёта квадрокоптера с маневрированием на высоте 30 м,
 длительность записи – 17 с

В дополнительном эксперименте использовался легкий дрон Dji Mavic Mini с четырьмя двухлопастными движителями (рис. 11). Проанализируем фрагмент измерения акустического и магнитного полей вблизи квадрокоптера, на высоте не более 1 метра в условиях городской застройки. На рис. 12 представлена спектрограмма, полученная с обоих датчиков с одинаковой временной осью. Момент взлета квадрокоптера четко фиксируется на микрофоне (около 1,2 мин), в течение 7 минут квадрокоптер совершил разнообразные перемещения на заданной высоте. Видно, что лопастная частота акустического сигнала, генерируемого квадрокоптером, находится вблизи 300 - 400 Гц. Индукционный магнитометр, применявшийся в настоящей работе, предназначен для измерения фоновых геомагнитных полей на низких частотах вплоть до 30 Гц, и таким образом, магнитные сигналы, связанные с вращением винта в настоящем

исследовании, не ожидались. Однако предоставляет интерес слабый магнитный сигнал, зарегистрированный на частоте 12,5 Гц в момент работы дрона. Это наблюдение требует дальнейших исследований.



Рис. 11. Общий вид измерительного оборудования и квадрокоптера в условиях городской застройки

Во время проведения эксперимента в момент времени около 9 минут, над местом проведения измерений на высоте около 100 метров пролетел двухлопастной вертолет модели Ансат (дрон в этот момент был посажен на землю). В акустическом поле этот сигнал обнаруживается явно с доплеровским сдвигом частоты. Что позволяет оценить частоту оборотов двигателя ~ 720 об/мин (12 Гц) и скорость движения вертолета 252 км/ч.

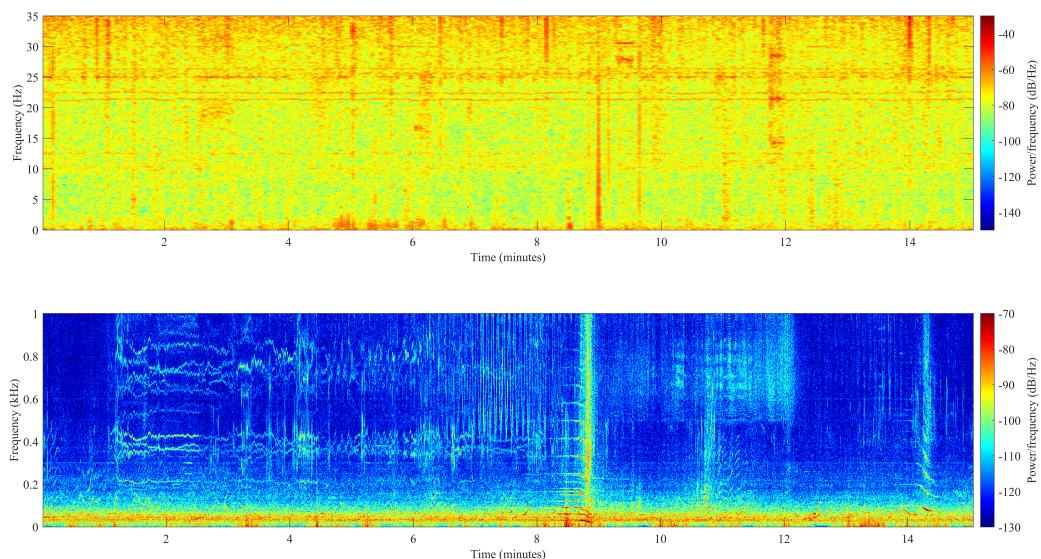


Рис. 12. Синхронизированная спектrogramма индукционного магнитометра (сверху) и измерительного микрофона (снизу) в относительных единицах, выраженных в дБ

Таким образом, основываясь на результатах работы [9], была поставлена задача обнаружения вертолета в магнитном поле на частотах 12 и 24 Гц. Отметим, что

сигнал, регистрируемый индукционным магнитометром, имеет значительные помехи вблизи частоты 25 Гц, обусловленные, по-видимому, наводками из бытовой электросети расположенного по близости здания. Общее отношение сигнал/шум не позволяет достоверно выделить ожидаемые гармоники в магнитном поле, но широкополосное магнитное возмущение было записано как непосредственно в момент траперса, так и спустя 20 сек. Вероятно, такое возмущение связано с изменением режима работы силового агрегата при маневрировании летательного аппарата.

Заключение

В результате проведения серии натурных экспериментов с целью изучения акустических и электромагнитных шумов БПЛА установлено, что значение собственной частоты магнитного шума для данной модели (3800 Гц) при взлете существенно изменяется, а в низкочастотной области появляются гармоники, обусловленные конструкцией и скоростью вращения несущих винтов. Аналогичный эффект не наблюдается в режиме висения, при этом характерный спектр шумов БПЛА естественно зависит от высоты полёта и обусловлен в основном турбулентностью в зоне аэродинамического контакта вращающегося винта с вмещающей средой.

Проанализированы изменения частотного состава шумов малогабаритного БПЛА в различных режимах горизонтального полёта с маневрированием, а также явление интерференции с образованием «зон тени» в результате отражения звука от дневной поверхности, в том числе и в условиях плотной городской застройки. Также, на полученной записи, на временной отметке 9 минут зафиксирован пролетавший над зданием КПЦ ИФЗ РАН вертолёт. На основе эффекта Доплера была рассчитана скорость его полёта.

Авторы выражают признательность сотрудникам ОКБ «ЛЭМЗ», а также сотруднику кафедры акустики Шурупу А.С. за помощь при проведении экспериментальных работ.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-29-06062.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-06062.

Список литературы

1. Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке // Труды МАИ. – 2013. – № 70.
2. Nathan Alexander W† et. al. Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2016. – p. 2873.
3. Kloet N et. al. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems // International Journal of Micro Air Vehicles. – 2017. – Vol. 9(1) pp. 3–14.
4. Мошков П.А. О направленности акустического излучения винтомоторных силовых установок // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2017. – Т. 21.№ 1 (75). – с. 118-127.

5. Мошков П.А., Беляев И.В., Остриков Н.Н. Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2 // XI Международная научная конференция по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиа-салон-2016». – 2016. М.: ЦАГИ. – С. 45.
6. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах // Л., изд. «Судостроение». – 1971. – С. 353-355.
7. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. – 1973. – С. 496
8. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 2 (28).
9. Руденко О.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Электромагнитное поле вращающегося воздушного винта // Доклады Академии наук. 1996. – Т. 351. № 2. – с.260 – 263.
10. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Акустический шум низколетящего квадрокоптера // Noise Theory and Practice. – 2019. – № 3. – с. 21 – 27.

References

1. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. Experimental study of noise sources of an unmanned aerial vehicle with a propeller-driven propeller in a pushing arrangement // Trudy MAI. – 2013. – No. 70.
2. Nathan Alexander W† et. al. Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2016. – p. 2873.
3. Kloet N et. al. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems//International Journal of Micro Air Vehicles. – 2017. – Vol. 9(1) pp. 3-14.
4. Moshkov P.A. On the direction of acoustic radiation of propeller-driven power plants // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. – 2017. – T. 21. No. 1 (75). – pp.118-127.
5. Moshkov P.A., Belyaev I.V., Ostrikov N.N. Experimental study of the acoustic characteristics of an unmanned aerial vehicle in a damped chamber AK-2 // XI International Scientific Conference on Amphibious and Aerodromeless Aviation "Hydroavia-Salon-2016". – 2016. M .: TsAGI. – p. 45.
6. Klyukin I.I. The fight against noise and sound vibration on ships // L., ed. "Shipbuilding". – 1971. – pp. 353-355.
7. Isakovich M.A. General acoustics. M .: Science. – 1973 . – p. 496
8. Krasnenko N.P. Surface distribution of sound waves in the atmosphere // Doklady TUSUR. – 2013. – No. 2 (28).
9. Rudenko O.V., Sobisevich L.E., Sobisevich A.L. Electromagnetic field of a rotating propeller // Reports of the Academy of Sciences. 1996. – T. 351. No. 2. – pp. 260 - 263.
10. Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu. Acoustic noise of a low-flying quadrocopter // Noise Theory and Practice. – 2019. – No. 3. – pp. 21 - 27.