

УДК 53.087

А.А. Бомбизов, А.Б. Петров, А.Г. Лоцилов

## Исследование электромагнитного и акустического излучения беспилотных летательных аппаратов в области низких частот

Анализируется проблема достоверного и заблаговременного обнаружения малозаметных беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих несанкционированный доступ к охраняемым объектам. Рассматривается направление, использующее только наблюдение за собственным электромагнитным излучением летательных аппаратов. В частности, выполнены регистрация и сравнение в частотной области собственного электромагнитного и акустического излучения. Определена связь спектральных характеристик сигнала с частотой вращения двигателей.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, идентификация, собственное электромагнитное излучение.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-57-61

Широкое развитие уровня техники и технологии позволило создать малогабаритные летательные аппараты, которые используются для доставки грузов, исследования местности и т.д. Но при всех своих достоинствах беспилотные летательные аппараты (БПЛА) могут представлять собой угрозу в руках злоумышленников. Это связано с тем, что ввиду своей малозаметности БПЛА можно использовать в террористических целях, транспортировке запрещенных предметов, промышленном шпионаже и др. В настоящее время существуют различные средства для обнаружения и нейтрализации БПЛА [1–4]. Работа существующих систем основана на следующих принципах: активное радиолокационное зондирование небесного купола, визуальное и/или акустическое сканирование. В данной статье показана возможность обнаружения БПЛА, которая основана на регистрации и анализе низкочастотного электромагнитного излучения (ЭМИ) летательного аппарата.

В работе решались следующие задачи:

- 1) регистрация электромагнитного и акустического излучений (АИ) от БПЛА и сравнение их интенсивностей между собой;
- 2) оценка амплитуд акустических и электромагнитных сигналов в зависимости от расстояния;
- 3) выявление связей спектров акустического и электромагнитного излучения с особенностями работы БПЛА и его составных частей.

В настоящее время наиболее распространены беспилотные летательные аппараты, работающие на бесколлекторных электродвигателях. Вращение двигателя осуществляется путем смены направления магнитного поля в обмотках ротора в определенной последовательности. При этом постоянные магниты взаимодействуют с магнитными полями ротора и приводят в движение подвижный статор (рис. 1). В основе этого движения лежит основное свойство магнитов, когда одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются [5–6]. Само по себе магнитное поле не замыкается полностью внутри двигателя и частично излучается во внешнюю среду ввиду неидеальности конструкции. В данной работе выполняется регистрация изменения

преимущественно магнитного поля в ближней зоне источника излучения (двигателя).

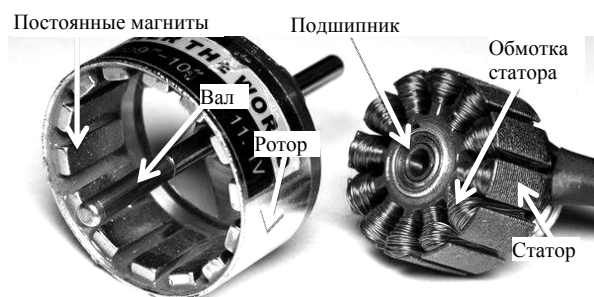


Рис. 1. Электродвигатель БПЛА [3]

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. В качестве первичного преобразователя использовался индукционный датчик (ИД). Для увеличения чувствительности в схеме применялся инструментальный усилитель. Результаты измерений записывались в реальном масштабе времени устройством записи сигнала. Параллельно с регистрацией ЭМИ выполнялась запись акустического сигнала.

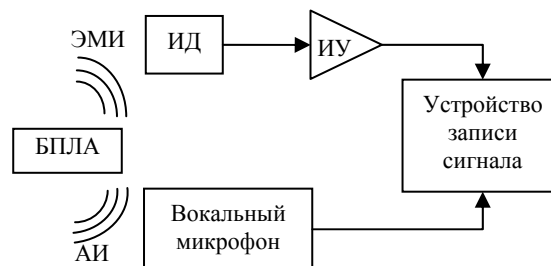


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:  
ЭМИ – электромагнитное излучение; АИ – акустическое излучение; ИД – индукционный датчик;  
ИУ – инструментальный усилитель

Источником излучения являлся беспилотный летательный аппарат Walkera runner 250 advance [7] с электродвигателем WK-WS-28-014 (KV2500). Сам БПЛА в рамках экспериментов был обездвижен и закреплен на штативе с использованием специально изготовленного держателя.

Магнитная составляющая излучения БПЛА регистрировалась с помощью индукционного датчика, представляющего собой катушку индуктивности (1000–1200 витков) на стержневом ферромагнитном сердечнике [8–9]. Электронная часть датчика размещена в пластиковом корпусе. Внешний вид датчика изображен на рис. 3. Сигналы датчика поступают на выполненный по инструментальной схеме усилитель, состоящий из двух каскадов: ДУ1 и ДУ2. Для минимальных искажений входного сигнала каскад усилителя ДУ1 размещён внутри корпуса датчиков. По витой паре усиленный в ДУ1 дифференциальный сигнал передавался на вход второго каскада ДУ2, в котором выполнялось ослабление наведенной при передаче синфазной помехи.

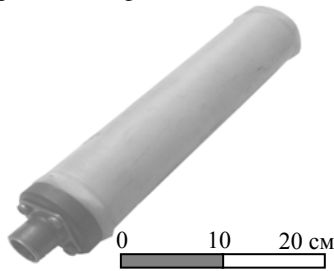


Рис. 3. Индукционный датчик

Фотография экспериментальной установки в работе представлена на рис. 4. На ней показано: А – БПЛА, закрепленный на штативе; Б – вокальный микрофон Sony F-V120; В – индукционный датчик; Г – дифференциальный усилитель ДУ2; Д – устройство записи (ноутбук с двумя звуковыми картами, полоса рабочих частот 20 Гц – 22 кГц).

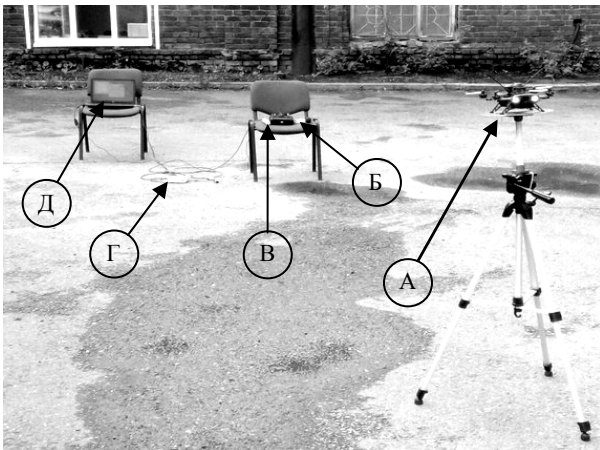


Рис. 4. Экспериментальная установка

Для уменьшения влияния промышленных и бытовых электромагнитных помех работа с экспериментальной установкой выполнялась за чертой города. В начальный момент времени датчики размещались на расстоянии 2 м от БПЛА. Затем на 4–6 с запускались двигатели БПЛА. После полной остановки двигателей штатив с БПЛА перемещался таким образом, чтобы увеличить расстояние на 2 м. После чего двигатели запускались заново. Всего было сделано 10 шагов (измерений), при этом рас-

стояние между датчиками и беспилотным летательным аппаратом изменилось от 2 до 20 м. Каждое стационарное состояние штатива с БПЛА выдерживалось в течение двух минут. Запись электромагнитного и акустического сигнала выполнялась непрерывно на протяжении всего эксперимента.

На рис. 5 изображена спектрограмма зарегистрированного акустического излучения БПЛА. Первые четыре шага указаны стрелками. На приведенном изображении можно проследить все 10 шагов.

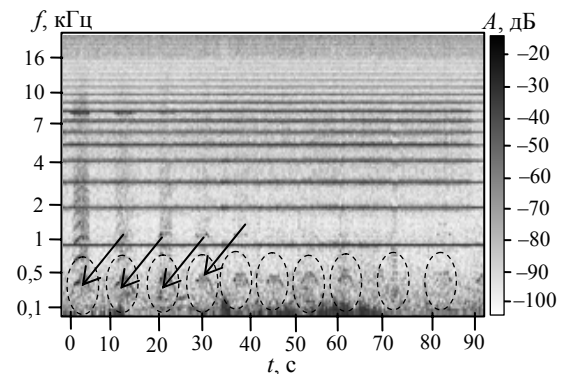


Рис. 5. Спектрограмма акустического излучения

На рис. 6 изображена спектрограмма зарегистрированного электромагнитного излучения БПЛА. Ввиду того, что интенсивность сигнала была низкой, на рисунке изображены только первые четыре шага (показаны стрелками). На спектрограмме можно проследить набор и сброс оборотов двигателей. Помимо этого, нужно отметить наличие высших гармоник (отмечено пунктиром).

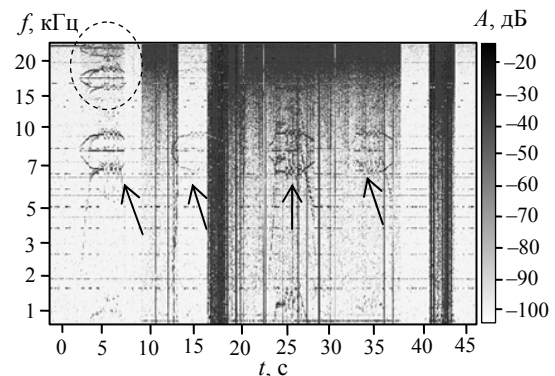


Рис. 6. Спектрограмма ЭМИ (шаг по частоте логарифмический)

Ниже рассмотрены формы электромагнитного и акустического сигналов в рамках одного шага (измерения). Начальные участки сигналов изображены на рис. 7. Из показанных фрагментов можно сделать вывод, что с использованием выбранного индукционного датчика амплитуда электромагнитного сигнала значительно (в 10–15 раз) ниже, чем у акустического, при этом отношение сигнал/шум – ниже.

Анализируя полученный график и сравнивая его со спектрограммой, изображенной на рис. 5, можно сделать вывод, что наибольшая энергия акустиче-

ского сигнала (исключая помеху) сосредоточена в спектральных составляющих в диапазоне до 2 кГц. Спектр сигнала в указанном диапазоне изображен на рис. 9.

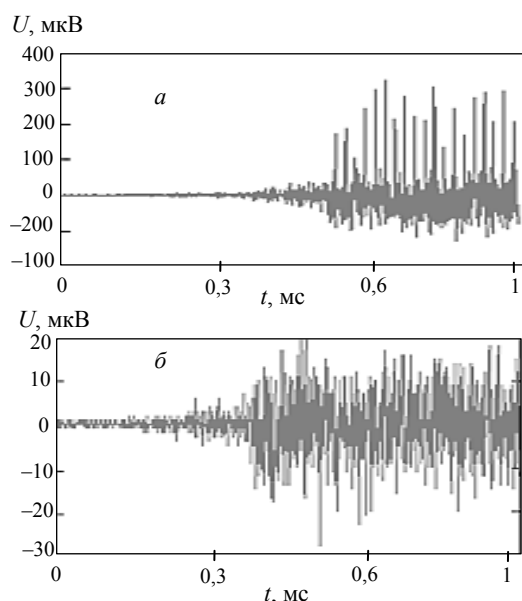


Рис. 7. График акустического (а) и электромагнитного (б) сигналов БПЛА

На рис. 8 изображен спектр акустического сигнала.

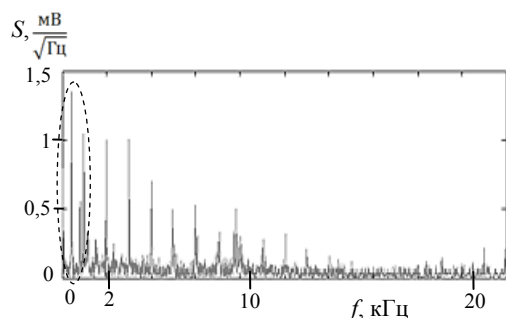


Рис. 8. График спектра акустического сигнала БПЛА в диапазоне частот от 0 до 20 кГц

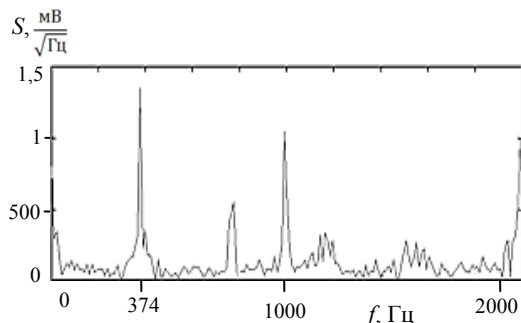


Рис. 9. График спектра акустического сигнала БПЛА в диапазоне частот от 0 до 2 кГц

Из представленного рис. 9 видно, что основная гармоника акустического сигнала ( $F_{ac}$ ) сосредоточена на частоте 374 Гц, следующая – на 774 Гц. Частота 374 Гц может быть обусловлена вращением

ротора двигателя с учетом винта с двумя лопастями предположительно с частотой  $F_{двигателя} = F_{ac} / 2 = 187$  Гц.

По аналогии с акустическим сигналом построен спектр электромагнитного сигнала (рис. 10) и выделена спектральная область с наибольшей концентрацией спектральных составляющих (рис. 11), при- сущих беспилотному летательному аппарату.

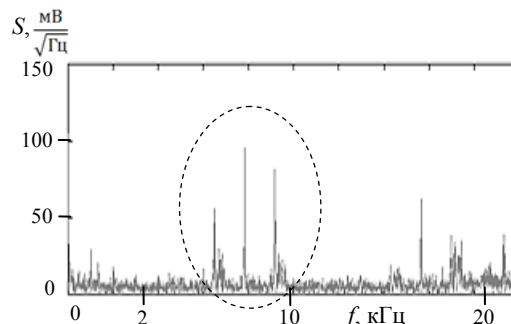


Рис. 10. График спектра электромагнитного сигнала БПЛА в диапазоне частот от 0 до 20 кГц

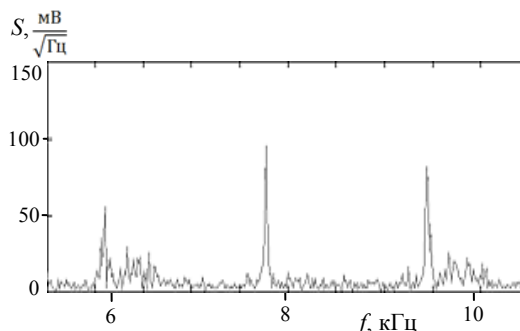


Рис. 11. График спектра электромагнитного сигнала БПЛА в диапазоне частот от 6 до 10 кГц

Анализируя спектр на рис. 11, можно предположить, что образование основной гармоники обусловлено движением постоянного магнита ротора относительно катушек статора с учетом изменения фаз на них. В составе электродвигателя БПЛА (см. рис. 1) имеется 14 постоянных магнитов ( $N_m$ ); 12 катушек индуктивности, соединенных последовательно по четыре для каждой из трех фаз обмотки. Отсюда можно предположить, что основная гармоника обусловлена следующим выражением:

$$F_{э/м} = F_{двигателя} N_m N_{\phi} = 187 \cdot 14 \cdot 3 = 7854 \text{ Гц.}$$

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы: а) низкочастотное электромагнитное излучение может служить одним из признаков для обнаружения и сопровождения БПЛА; б) для успешного практического применения предлагаемого способа обнаружения необходимо обеспечить чувствительность и избирательность электромагнитных приемников не хуже, чем акустических, при прочих равных условиях; в) по характеру спектров электромагнитного излучения возможно определить основные параметры движения БПЛА и режимы работы двигателей в его составе.

### Заключение

Проведенные наблюдения электромагнитного излучения беспилотного летательного аппарата показали, что на небольших расстояниях возможно обнаружение БПЛА с использованием индукционного датчика. Это исследование может способствовать созданию дополнительного средства обнаружения беспилотных летательных аппаратов для работы в гражданской и военной сфере деятельности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.577.21.0188 от 27.10.2015 г., идентификатор RFMEFI57715X0188.

### Литература

1. Профессиональная радиолокационная система для обнаружения и отслеживания любых типов беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteoss.com/ru/oborudovanie/poiskovyj-radar-dlya-obnaruzheniya-i-otslezhivaniya-dronov.-professionalnaya-radiolokacionnaya-sistema-anti-dron.html> (дата обращения: 02.09.2017).

2. A system for measurement of electromagnetic wave scattered by small UAVs /A.V. Khristenko, M.O. Konovalenko, M.E. Rovkin et al. // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings 31 July 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998472.

3. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small Quadcopter in X-Band / A.V. Khristenko, M.O. Konovalenko, M.E. Rovkin et al. // IEEE Eransactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, No. 4. – P. 1977–1984.

4. Защита от дронов вашего воздушного пространства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.drone-tracker.ru> (дата обращения: 04.09.2017).

5. Как выбрать двигатель для квадрокоптера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://hobmodels.ru/index.php?route=blog/blog&blog\\_id=68](https://hobmodels.ru/index.php?route=blog/blog&blog_id=68) (дата обращения: 04.09.2017).

6. Вентильный двигатель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный\\_двигатель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный_двигатель) (дата обращения: 05.09.2017).

7. Walkera runner 250 advance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://coptersworld.ru/kvadrokopter-walkera-runner-250-advance> (дата обращения: 02.09.2017).

8. Бомбизов А.А. Разработка прибора для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород по косвенным признакам электромагнитного и акустического излучения / А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лощилов, А.В. Филатов // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 26(2). – С. 141–143.

9. Bombizov A.A. Spectrum monitoring of electromagnetic signals from rocks to control geodynamic processes under working mine conditions / A.A. Bombizov, A.A. Bepalko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. Doi: 10.1088/1757-899X/81/1/012105.

---

### Бомбизов Александр Александрович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр. СКБ «Смена» ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-903-951-15-24  
Эл. почта: unclab@gmail.com

### Петров Алексей Борисович

Студент каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-864-97-87  
Эл. почта: petrov\_a\_b97@mail.ru

### Лощилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, начальник СКБ «Смена»  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-906-947-69-20  
Эл. почта: yogl@mail.ru

Bombizov A.A., Petrov A.B., Loshchilov A.G.

### Analysis of electromagnetic and acoustic radiation of unmanned aerial vehicles

This article is devoted to the problem of reliable and early detection of hardly noticeable unmanned aerial vehicles carrying out unauthorized access to protected objects. The article deals with a direction that uses only the observation of the intrinsic electromagnetic radiation of the aircraft. In particular, registration and comparison in the frequency domain of intrinsic electromagnetic and acoustic radiation has been performed. The relationship between the spectral characteristics of the signal and the frequency of rotation of the engines is determined.

**Keywords:** UAV, electromagnetic transducer, the amplifier, acoustics, motor.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-57-61

### References

1. Professional radar system for the detection and tracking of any type of unmanned aerial vehicles. (In Rus.). Available at: <http://meteoss.com/ru/oborudovanie/poiskovyj-radar-dlya-obnaruzheniya-i-otslezhivaniya-dronov.-professionalnaya-radiolokacionnaya-sistema-anti-dron.html> (accessed: 09 Sept. 2017).

2. Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E., Khlusov V.A., Marchenko A.V., Sutulin A.A., Malyutin N.D. A system for measurement of electromagnetic wave scattered by small UAVs. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings 31 July 2017. Doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998472.

3. Protection from the drones of your airspace. (In Rus.). Available at: <http://www.drone-tracker.ru> (accessed: 04 Sept. 2017).

4. Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E., Khlusov V.A., Marchenko A.V., Sutulin A.A., Malyutin N.D. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small Quadcopter in X-Band. IEEE Eransactions on Antennas and Propagation, 2018, vol. 66, no. 4, pp. 1977–1984.

5. Choose motor for quadcopter. (In Rus.). Available at: [https://hobmodels.ru/index.php?route=blog/blog&blog\\_id=68](https://hobmodels.ru/index.php?route=blog/blog&blog_id=68) (accessed: 04 September 2017).

6. Valve motor (in Rus.). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный\\_двигатель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный_двигатель) (accessed: 05 Sept. 2017).

7. Walkera runner 250 advance. (In Rus.). Available at: <http://coptersworld.ru/kvadrokopter-walkera-runner-250-advance> (accessed: 05 Sept. 2017).

8. Bombizov A.A., Bepalko A.A., Loshchilov A.G., Filatov A.V. Development of an instrument for monitoring the stress-strain state of rocks from indirect signs of electromagnetic and acoustic radiation. Reports of Tomsk State

*University of Control Systems and Radioelectronics* [Proceedings of TUSUR University], 2012, vol. 26, no. 2, pp. 141–143.

9. Bombizov A.A., Bepalko A.A. Spectrum monitoring of electromagnetic signals from rocks to control geodynamic processes under working mine conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 81. Doi: 10.1088/1757-899X/81/1/012105.

---

**Aleksandr A. Bombizov**

Candidate of technical sciences,  
Special design bureau «Smena», Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-903-951-15-24  
Email: uncllelab@gmail.com

**Aleksey B. Petrov**

Student, Department of designing of units and components  
for radioelectronic systems, Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-864-97-87  
Email: petrov\_a\_b97@mail.ru

**Anton G. Loshchilov**

Candidate of technical sciences,  
Special design bureau «Smena», Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-906-947-69-20  
Email: yogl@mail.ru