

УДК 534.2

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИНТОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2021 г. А. И. Корольков^{1, *}, Е. В. Медведева^{1, 2, 3}, А. С. Шуруп^{1, 2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: korolkov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Обсуждается метод активной акустической локации летательных аппаратов с винтом. Метод основан на анализе дополнительных максимумов функции взаимной корреляции линейно частотно модулированного сигнала, отраженного от вращающегося винта. Эти максимумы возникают в широком диапазоне временных задержек, что позволяет их использовать в качестве дополнительного информативного параметра при идентификации винтовых летательных средств.

DOI: 10.31857/S0367676521010191

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) находит все большее применение в различных сферах деятельности человека. Появление сравнительно дешевых моделей БПЛА привело к взрывному росту их использования для решения различных задач. Например, реализация планов создания “умных городов”, как одного из важнейших направлений современного развития социотических систем, требует решения целого комплекса задач, связанных с повсеместным внедрением беспилотных транспортных средств, обеспечивающих перемещение людей и грузов в пределах города и прилегающих к нему территорий и акваторий. Следует отметить и вопросы безопасности, возникающие при несанкционированном использовании БПЛА. Среди методов обнаружения БПЛА можно выделить радиолокационные, оптические, инфразвуковые и акустические [1]. В свою очередь, среди акустических методов выделяются активные системы, использующие источники, и пассивные, которые основаны на регистрации собственных шумов летательных аппаратов с последующей их локализацией и идентификацией. При этом для распознавания объектов могут привлекаться методы, основанные на сопоставлении записанных

сигналов с библиотекой характерных сигнатур (образцов сигналов), которые ранее были измерены или численно рассчитаны. Для подобного рода подходов требуется расчет шумов летательных аппаратов, что в случае винтовых средств может быть сделано известными способами [2, 3]. Основным преимуществом акустических методов является сравнительно низкая стоимость их реализации [4] и при этом достаточно высокая точность обнаружения и идентификации целей. К основным недостаткам акустических методов можно отнести небольшую дальность обнаружения (как правило, до 300 метров), которая определяется высокими уровнями шумов в исходных данных и чувствительностью результатов локации к вариациям характеристик среды распространения. Развитие новых акустических методов локации БПЛА является перспективным направлением исследований [5, 6].

В настоящей работе предлагается новый метод активной акустической локации летательных аппаратов с несущим винтом или тянущим/толкающим пропеллером. Метод заключается в облучении БПЛА линейно частотно модулированным акустическим сигналом (ЛЧМ-сигналом) в слышимом диапазоне, приеме отраженного сигнала, вычислении взаимной корреляционной функции

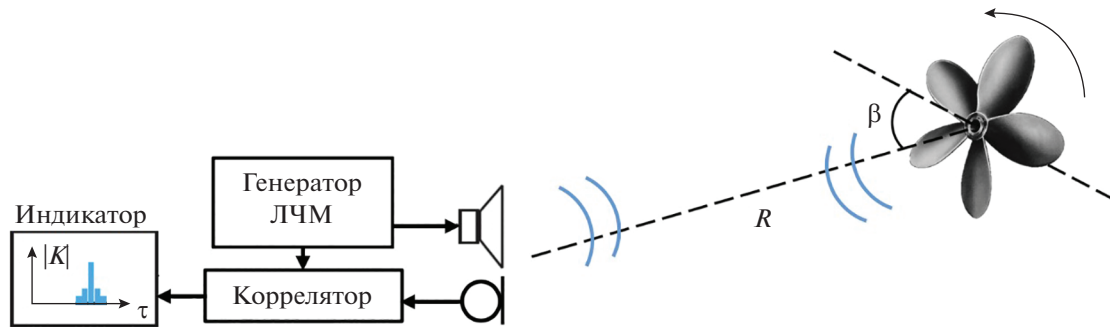


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению взаимной корреляционной функции ЛЧМ-сигнала, отраженного от вращающегося винта, с излученным сигналом.

принятого сигнала с посылкой и анализе полученной корреляционной структуры (рис. 1). В случае, когда облучение происходит с направления, отличного от оси вращения винта, получаемая локационная отметка будет иметь специфическую структуру (мультиплет), которая будет указывать на наличие винта. В этом случае удастся предложить новый метод идентификации, что важно в случаях, когда из-за небольших размеров БПЛА традиционные методы сталкиваются с трудностями. Например, в активном режиме обнаружения малогабаритные БПЛА оказывается сложно отличить от птиц [7]. Отличительной особенностью настоящей работы является использование согласованной обработки регистрируемых сигналов, что позволяет повысить выходное отношение сигнал/помеха. Это является принципиально важным в акустических задачах, когда в исходных данных зачастую преобладают шумы. В большинстве известных работ [4–7], при обнаружении и идентификации винтовых летательных аппаратов анализируются сами рассеянные сигналы, при этом их корреляционная обработка не используется.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ ЛЧМ-СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВИНТА

Основные эффекты, определяющие структуру сигналов, отраженных от вращающегося винта, связаны с доплеровским сдвигом частоты (отражение от движущихся лопастей винта), а также с модуляцией сигнала при отражении от периодически изменяющегося рассеивателя (коэффициент отражения винта с определенной точностью можно рассматривать в виде периодической функции с периодом $1/NF$, где F – частота вращения вала пропеллера, а N – число лопастей).

В случае моностатической локации, для монохроматического сигнала частоты f , отраженного от вращающегося винта с N одинаковыми лопастями, известно выражение [8], которое может быть представлено в виде:

$$s_{\Sigma}(t) \approx L \exp\{-2ikR\} \times \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc}\{\Phi_n(t)\} \exp\{-i\Phi_n(t)\}, \quad (1)$$

где фазовая функция $\Phi_n(t)$ имеет следующий вид:

$$\Phi_n(t) = \frac{4\pi L}{\lambda} \sin \beta \cos(2\pi Ft + \varphi_0 + 2\pi n/N), \quad (2) \\ n = 1, 2, \dots, N.$$

Здесь L – длина лопасти, β – угол между направлением распространения зондирующей волны и осью вращения винта (рис. 1), φ_0 – начальный угол поворота винта, R – расстояние от локатора до центра винта, $k = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны. Из (1), (2) следует [8, 9], что спектр отраженного сигнала будет искажен за счет доплеровского сдвига, определяемого множителем $2f \frac{v}{c} \sin \beta$, где v – скорость вращения винта, c – скорость звука (предполагается, что среда распространения является однородной и стационарной), а также за счет появления “комбинационных” частот вида $f \pm nNF$.

Пусть теперь излучаемый сигнал $u_{in}(t)$ представляет собой ЛЧМ-сигнал, с мгновенной частотой $f(t) = f_0 + bt$, которая изменяется медленно за время излучения T (здесь постоянная b определяет скорость изменения частоты $f(t)$, $t \in [0, T]$). В этом случае спектр отраженного сигнала $u_r(t)$ в каждый момент времени будет содержать частоту $f(t)$, сдвинутую за счет эффекта До-

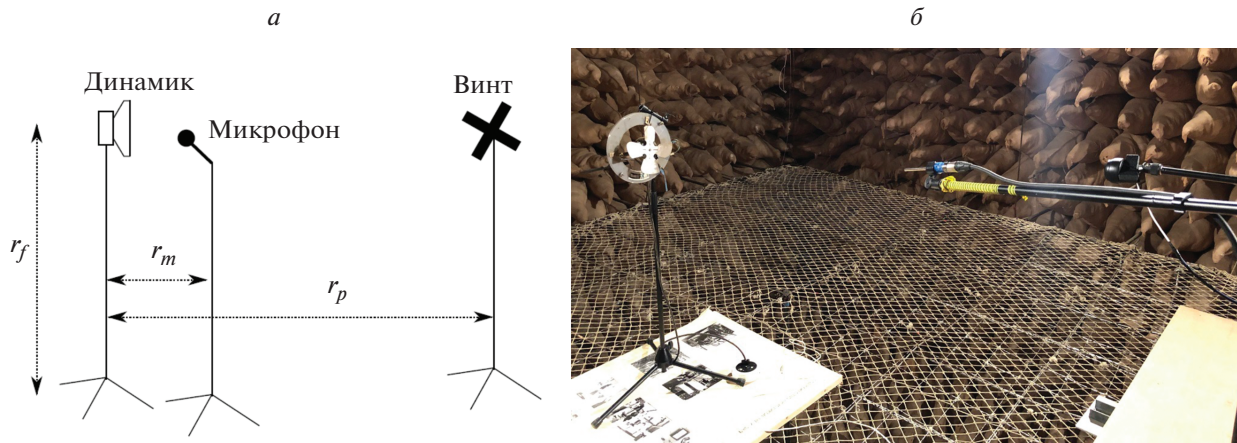


Рис. 2. Схематическое изображение (а) и фотография (б) эксперимента в звукозаглушенной камере.

плера, и комбинационные частоты $f(t) \pm mNF$. Рассмотрим функцию взаимной корреляции

$$K(\tau) = 1/T \int_{-T/2}^{T/2} u_{in}(t + \tau) u_r(t) dt. \quad (3)$$

В интеграл (3) входят произведения сигналов, близких к гармоническим (с медленно меняющимися частотами). Ненулевой вклад в интеграл дают фрагменты произведения, на которых мгновенные частоты совпадают. Поэтому сдвиг по частоте на δf в сигнале $u_r(t)$ соответствует сдвигу $\delta\tau$ по переменной τ на величину

$$\delta\tau = \frac{\delta f}{b}.$$

Например, сдвиг по частоте $\delta f_M = NF$ приведет к смещению корреляционного пика по дальности

$$L = c\tau/2 \text{ на величину } \delta L_M = \frac{c\delta\tau_M}{2} = \frac{c\delta f_M}{2b} = \frac{cNF}{2b}.$$

Если в каждый момент времени имеются сигналы с мгновенными частотами $f(t)$, $f(t) + \delta f$, $f(t) - \delta f$, то корреляционный пик будет представлять собой триплет. В рассматриваемом случае присутствия в сигнале $u_r(t)$ комбинационных частот вида $f(t) \pm mNF$ приводит к формированию в корреляционной функции не триплета, а мультиплета, причем этот мультиплет оказывается искаженным за счет доплеровского сдвига частоты.

Для практического применения следует отметить случай, когда дальность до цели L много больше смещения по дальности δL_M (предполагается, что этот режим зондирования может быть реализован при соответствующем выборе посылки $u_{in}(t)$). В этом случае в качестве критерия обнаружения может использоваться факт присутствия или отсутствия информативных пиков корреля-

ционной функции в области отрицательных временных задержек, т.е. там, где их быть не должно в случае отражения сигнала от рассеивателя без винта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ОТРАЖЕННОГО ЛЧМ-СИГНАЛА

Для экспериментальной проверки принципиальной работоспособности обсуждаемого подхода был проведен эксперимент в звукозаглушенной камере кафедры акустики физического факультета МГУ. Использовался источник звука с рабочей частотой 3–20 кГц, измерительный микрофон и закрепленный на штативе вентилятор. Вентилятор имел $N = 4$ лопасти и вращался с частотой $F \approx 50$ Гц. Частота вращения вентилятора определялась в ходе дополнительных измерений по основному тону в спектре шума, который регистрировался с помощью лабораторного шумомера, располагаемого в непосредственной близости от вращающегося винта. Ошибка оценки частоты вращения пропеллера F не превышала 8%.

Схема экспериментальной установки по измерению акустических сигналов, отраженных от вращающегося пропеллера, а также фотография, сделанная при проведении эксперимента, представлены на рис. 2. На динамик подавался ЛЧМ-сигнал, синтезированный цифровым способом. Принятый микрофоном сигнал оцифровывался звуковой картой и далее обрабатывался на ЭВМ. Частота дискретизации для ЦАП и АЦП составляла 44.1 кГц. В процессе обработки вычислялась взаимная корреляционная функция принятого сигнала с исходной ЛЧМ посылкой. Главной задачей эксперимента является наблюдение дополнительных пиков корреляционной функции. При-

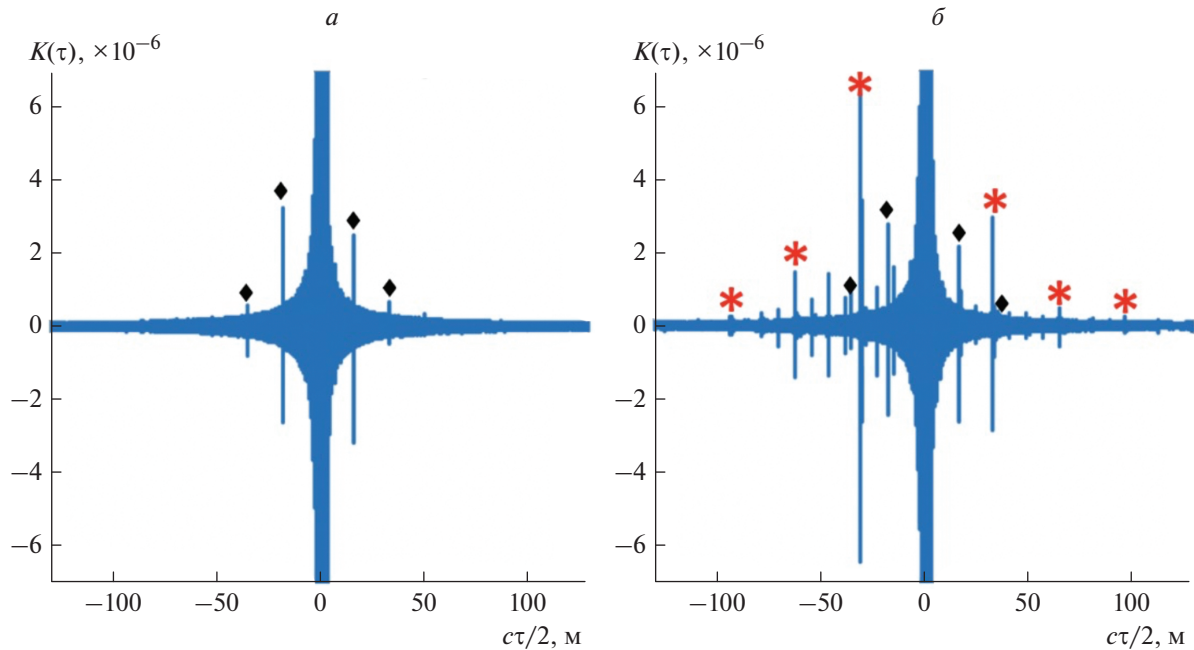


Рис. 3. Результат вычисления экспериментальной корреляционной функции при выключенном винте (а) и в случае, когда винт вращался (б). Звездочками на рисунке изображены информативные максимумы, ромбами – ложные пики.

чем в условиях эксперимента рассматривался случай, в котором дальность до цели L много меньше смещения по дальности δL_M , что позволило проверить наличие пиков в отрицательных и положительных временных задержках.

Вентилятор облучался с направления, значительно отличающегося от осевого ($\beta \approx 10^\circ$). В этом случае влияние доплеровского сдвига заметно уменьшается. При этом расположение источника и приемника выбирались таким образом, чтобы за счет сложной геометрии винта лопасти давали блик от источника на приемник в каком-то положении вентилятора. Модуляция коэффициента отражения достигается с помощью периодического попадания блика на приемник. При строго осевом падении зондирующего сигнала нельзя ожидать, что коэффициент отражения будет зависеть от угла поворота винта, в силу симметрии. В итоге, специальным выбором относительного расположения источника, приемника и вентилятора удалось добиться уменьшения влияния доплеровского сдвига, сохранив при этом эффекты, связанные с модуляцией рассеянного сигнала за счет отражения от периодически вращающегося винта.

Геометрические параметры установки приведены ниже в соответствии с обозначениями на рис. 2а:

$$r_f = 1 \text{ м}, \quad r_m = 0.4 \text{ м}, \quad r_p = 1.6 \text{ м}.$$

Характеристики изучаемого ЛЧМ-сигнала следующие. Начальная частота $f_0 = 5$ кГц, конечная частота $f_1 = 15$ кГц, длительность излучения сигнала $T = 10$ с. Это соответствует

$$b = \frac{f_1 - f_0}{T} = 1000 \text{ с}^{-2}.$$

На рис. 3 приведен результат вычисления взаимной корреляционной функции при неподвижном вентиляторе (слева) и при работающем вентиляторе (справа). Для удобства рассмотрения шкала временных задержек τ переведена в метры $\frac{c\tau}{2}$. На рис. 3б отчетливо виден пик, соответствующий сигналу, отраженному от пропеллера, а также несколько побочных пиков мультиплета. Для неподвижного вентилятора информативные побочные пики не наблюдаются (рис. 3а). Звездочками на рис. 3б отмечены пики, соответствующие теоретическим значениям дальностей $\delta L_M = c\delta\tau_M/2 = \pm cnNF/2b$, где $n = 1, 2, 3$. Экспериментально полученные значения положения пиков $\delta\hat{L}_M$ отличаются от теоретических не более чем на 7.5%, что соответствует точности определения частоты вращения винта F . Следует отметить и неидеальность условий проведения эксперимента. Так, на рис. 2а при отключенном вентиляторе в корреляционной функции наблюдаются симметричные пики как в положительных, так и отрицательных временных задержках (отмечены ромбами на рис. 3). Присутствие этих

ложных пиков связано с наличием в исходных данных наводки, а также нелинейными эффектами, проявляющимися в используемом приеме-излучаемом оборудовании. По-видимому, эти же причины приводят и к возникновению множества дополнительных пиков, расположенных между информативными максимумами корреляционной функции. В дальнейшем особое внимание будет уделено улучшению характеристик используемого оборудования. Вместе с тем следует отметить, что присутствие ложных пиков в проведенном эксперименте не совпадает с положениями информативных максимумов, что позволяет даже в такой сложной и неоднозначной помеховой обстановке однозначно идентифицировать обсуждаемые в работе эффекты, возникающие при корреляционной обработке ЛЧМ-сигналов, отраженных от вращающегося винта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе данные указывают на принципиальную возможность экспериментального наблюдения побочных пиков корреляционной функции сигналов, отраженных вращающимся винтом, в том числе в области отрицательных временных задержек, что может использоваться в качестве дополнительного информативного параметра при идентификации малогабаритных винтовых БПЛА. Взаимное расположение этих пиков вдоль оси временных задержек зависят от параметров излучаемого сигнала и характеристик винта. Важной отличительной особенностью рассматриваемого подхода является анализ не самих отраженных сигналов, а результатов их корреляционной обработки, что позволяет улучшить отношение сигнал/помеха, повысив тем самым достоверность получаемых оценок. Среди перспектив дальнейших исследований можно выделить применение к сигналам, отраженным вращающимся винтом, векторно-фазовых методов обработки [10–12]. Полученные в работе резуль-

таты требуют дальнейшего детально исследования, прежде чем можно будет говорить о возможности их применения к решению конкретных практических задач.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н.С. Виноградову за помощь в организации и проведении эксперимента в звукозаглушенной камере. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-06048-мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farlik J., Kratky M., Casar J. et al. // *Sensors*. 2019. V. 19. No 7. P. 1517.
2. Конев В.Ф., Зайцев М.Ю., Воронцов В.И. и др. // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 6. С. 651.
3. Воронцов В.И., Фараносов Г.А., Карабасов С.А. и др. // *Акуст. журн.* 2017. Т. 66. № 3. С. 308.
4. Sedunov A., Haddad D., Salloum H., Sutin A. et al. // 2019 IEEE Int. Symp. on Technol. for Homeland Security (Woburn, 2019).
5. Shi Zhiguo, Chang Xianyu, Yang Chaoqun et al. // *IEEE Trans. Vehicular Tech.* 2020. V. 69. No 3. P. 2731.
6. <http://drones.cnas.org>.
7. Coluccia A., Fascista A., Schumann A. et al. // *Proc. 16th IEEE Int. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance.* (Taipei, 2019).
8. Chen V.C. et al. *Micro-Doppler effect in radar.* Artech House, 2011. 309 p.
9. Martin J., Mulgrew B. // *Proc. IEEE International Radar Conference.* 1990. P. 569.
10. Гончаренко Б.И., Веденев А.И., Муханов П.Ю., Шуруп А.С. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 1. С. 96; *Goncharenko B.I., Vedenev A.I., Mukhanov P.Yu., Shurup A.S.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No 1. P. 82.
11. Медведева Е.В., Гончаренко Б.И., Шуруп А.С. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 2. С. 278; *Medvedeva E.V., Goncharenko B.I., Shurup A.S.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020. V. 82. No 2. P. 278.
12. Гончаренко Б.И., Дмитриев К.В., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 6. С. 777.

Acoustic method for localization and identification of aerial vehicles with propeller

A. I. Korolkov^{a, *}, E. V. Medvedeva^{a, b}, A. S. Shurup^{a, b, c}

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia

^bShirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, 117218 Russia

^cSchmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, 123995 Russia

*E-mail: korolkov@physics.msu.ru

Received July 20, 2020; revised August 28, 2020; accepted September 28, 2020

The method of active acoustic location of aircraft with a propeller is discussed. The method is based on the analysis of additional maxima of the cross-correlation function of a linearly frequency-modulated signal reflected from a rotating propeller. These maxima occur in a wide range of time delays, which allows them to be used as an additional informative parameter in the identification of helical aerial vehicles.