

23 - 28 августа 2020 г.

XVII Всероссийская школа-семинар



*“Волновые явления
в неоднородных средах”
имени профессора А.П. Сухорукова*

*Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова
Физический факультет*

СБОРНИК ТРУДОВ

XVII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова

под общей редакцией канд. физ.-мат. наук А.Н. Калиша

23-28 августа 2020 года

Информация о школе-семинаре «Волны-2020», включая сборник трудов школы-семинара, представлена на сайте <http://waves.phys.msu.ru/>.

Адрес электронной почты организационного комитета: orgwaves@physics.msu.ru.

ISBN 978-5-6045125-0-0

Новый акустический метод обнаружения беспилотных летательных аппаратов с винтом

А.И. Корольков¹, Е.В. Медведева^{1,2}, А.С. Шуруп^{1,2,3}

¹Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
medvedeva.ev15@physics.msu.ru

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]. Основным преимуществом акустических методов является сравнительно низкая стоимость их реализации [2] 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 достаточно 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 [3, 4].

В настоящей работе предлагается новый метод активной акустической моностатической локации летательных аппаратов с несущим винтом или тянущим/толкающим пропеллером. Метод заключается в облучении БПЛА линейно частотно модулированным акустическим сигналом в слышимом диапазоне, приеме отраженного сигнала, выполнении кросс-корреляции принятого сигнала с посылкой и изучении полученной корреляции (рис. 1). Получаемая локационная отметка будет иметь специфическую структуру (триплет или мультиплет), которая будет указывать на наличие винта (рис. 2). 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 [5].

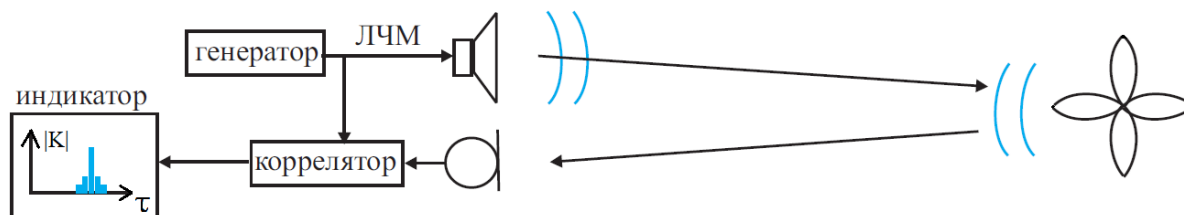


Рис. 1. Схема эксперимента.



Рис. 2. Характерный вид кросс-корреляционной функции при отражении ЛЧМ сигнала от вращающегося винта а) при $L \gg \delta L$, б) при $L \ll \delta L$.

Поясним природу искажения локационной отметки. Будем считать, что на частоте f посылки для заданного положения оси пропеллера и заданного положения источника коэффициент отражения пропеллера $R(t)$ является периодической функцией времени t с периодом $1/(NF)$, где F – частота вращения вала пропеллера, а N – число лопастей:

$$R(t) = R_0 + \sum_{m=1}^{\infty} R_m \cos(2\pi m N F t + \phi_m)$$

для некоторых значений R_0 , R_m , ϕ_m . Пусть посылка $u_{in}(t)$ представляет собой ЛЧМ-сигнал, мгновенная частота которого $f(t) = f_0 + bt$ меняется достаточно медленно:

$$u_{in}(t) = A \cos(2\pi (f_0 + bt) t), \quad (1)$$

где постоянная b определяет скорость изменения мгновенной частоты, $t \in [0, T]$, где T – время излучения посылки. В этом случае спектр отраженного сигнала $u_r(t) \equiv u_{in}(t)R(t)$ в каждый момент времени будет содержать частоту $f(t)$ и комбинационные частоты $f(t) \pm mNF$. Рассмотрим функцию взаимной корреляции

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

В интеграл (2) 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 $\delta f = NF$ в сигнале $u_r(t)$ соответствует сдвигу по переменной τ на $\delta\tau = \delta f/b$. сдвиг по частоте δf приведет к смещению корреляционного пика по дальности $L = c\tau/2$ на величину

$$\delta L = \frac{c \delta f}{2b} = \frac{c N F}{2b},$$

где c – скорость звука в среде (предполагается, что среда распространения представляет собой однородную, стационарную среду со скоростью c). 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 $f(t) \pm mNF$ приводит к формированию не триплета, а мультиплета (рис. 2). Для практического применения можно предложить два режима зондирования в зависимости от выбора соответствующей посылки $u_{in}(t)$:

- 1). Дальность до цели L много больше смещения по дальности δL (рис. 2а).
- 2). Дальность до цели L много меньше смещения по дальности δL (рис. 2б).

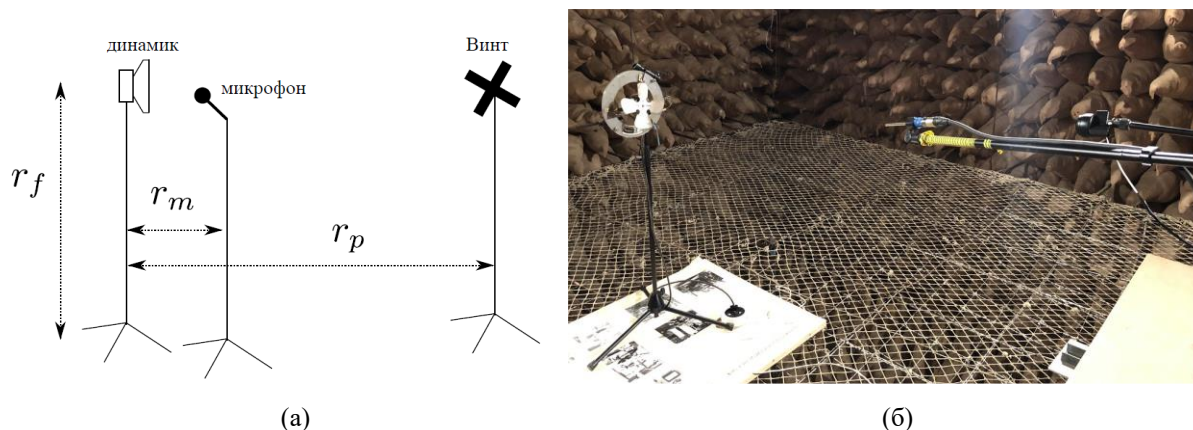


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки.

Интересно отметить, что в случае 2) в качестве критерия обнаружения может использоваться факт присутствия или отсутствия информативных пиков корреляционной функции в области отрицательных временных задержке. т.е. там, где их быть не должно в случае отражения сигнала от неподвижного рассеивателя.

Для экспериментальной проверки принципиальной работоспособности обсуждаемого подхода был проведен эксперимент в звукозаглушенной камере кафедры акустики физического факультета МГУ. Использовался источника звука с рабочей частотой 3-20 кГц, измерительный микрофон и закрепленный на штативе вентилятор. Вентилятор имеет $N = 4$ лопасти и вращается с частотой $f = 50$ Гц. Схема экспериментальной установки и фотография, сделанная при проведении эксперимента, представлены на рис. 3. На динамик подается ЛЧМ сигнал, синтезированный цифровым способом. Принятый микрофоном сигнал оцифровывается звуковой картой и обрабатывается ЭВМ. Частота дискретизации для ЦАП и АЦП равняется 44.1 кГц. В процессе обработки вычисляется КФ принятого сигнала с исходной ЛЧМ посылкой. Главной задачей эксперимента является наблюдение побочных пиков КФ.

Вентилятор облучался с направления, отличающегося от осевого. При строго осевом падении звука нельзя ожидать, что коэффициент отражения будет зависеть от угла поворота винта в силу симметрии. Наилучших результатов можно ожидать, когда одна из лопастей дает блик от источника на приемника в каком-то положении вентилятора. Модуляция коэффициента отражения достигается с помощью периодического попадания блика на приемник.

В условиях эксперимента рассматривается случай, в котором дальность до цели L много меньше смещения по дальности δL , проверяется наличие пиков в отрицательных и положительных временных задержках.

Геометрические параметры установки приведены ниже (в соответствии с обозначениями на рис. 3):

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

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. 4 приведен результат вычисления КФ при неподвижном вентиляторе (слева) и при работающем вентиляторе (справа). Отчетливо виден пик,

соответствующий сигналу, отраженному от пропеллера, и несколько побочных пиков мультиплета. Стоит отметить, что пики на отрицательных расстояниях видны более отчетливо так как менее зашумлены. Для неподвижного вентилятора побочные пики не наблюдаются.

Полученные 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. Полученные в работе результаты требуют дальнейшего детально исследования с целью оценки 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 в рамках научного проекта № 19-29-06048 мк.

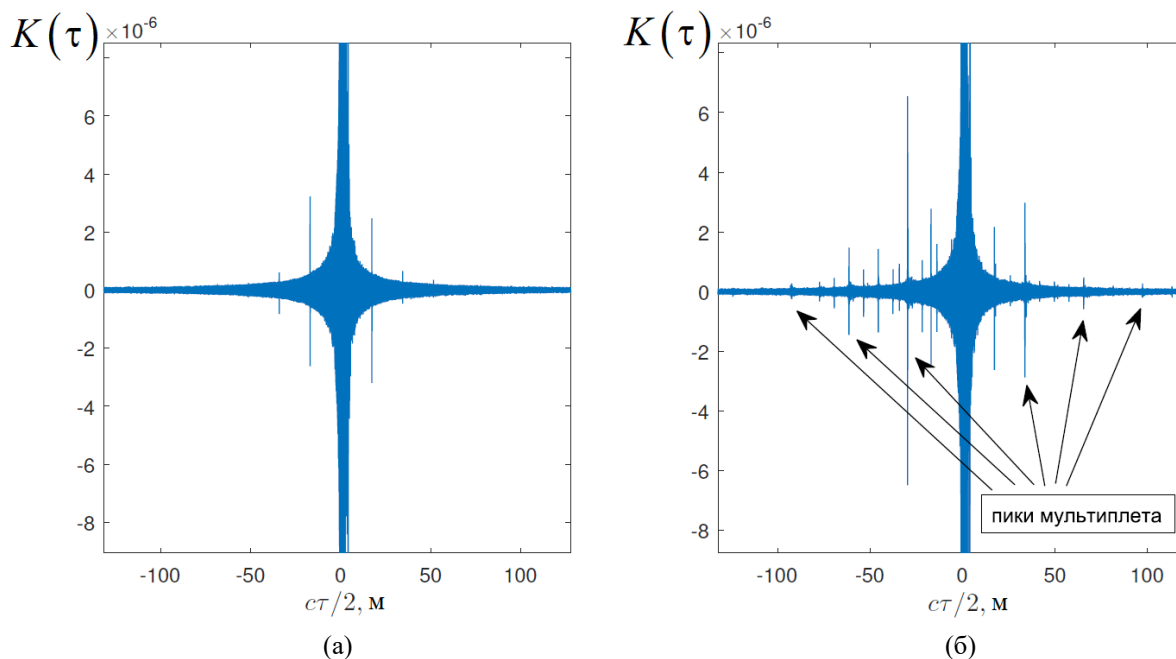


Рис. 4. Результат вычисления экспериментальной кросс-корреляционной функции при измерениях в заглушенной камере: при выключенном винте (а), и в случае, когда винт вращался (б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Farlik J. et. al. // Sensors. 2019. V.19. No 7. P. 1517.
2. Sedunov A. et. al. // IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). 2019. DOI: 10.1109/HST47167.2019.9032916
3. Shi Zhiguo et. al. // IEEE Trans. on Vehicular Tech. 2020. V.69. No 3. P. 2731.
4. <http://drones.cnas.org>
5. Coluccia A. et. al. // 16th IEEE Int. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). 2019. DOI: 10.1109/AVSS.2019.8909876