

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ВРАЩАЮЩИМСЯ ВИНТОМ

© 2020 г. А. И. Корольков<sup>a, \*</sup>, К. С. Князева<sup>a</sup>, А. С. Шуруп<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,  
ГСП-1, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,  
ул. Большая Грузинская 10, стр. 1, Москва, 123995 Россия

\*e-mail: korolkov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 30.06.2020 г.

После доработки 30.06.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2020 г.

Исследуются особенности функции взаимной корреляции линейно частотно-модулированного сигнала, отраженного от вращающегося винта, с излученной репликой сигнала. В получаемой корреляционной функции помимо основного пика, соответствующего времени распространения сигнала до рассеивателя и в обратном направлении, наблюдаются дополнительные информативные максимумы в виде мультиплетов, присутствие которых определяется рассеянием звука на вращающемся винте. Параметры дополнительных максимумов зависят от характеристик рассеивателя (дальности до винта, частоты его вращения, количества лопастей, ориентации относительно направления облучения). Приводятся результаты численного моделирования, а также обработки экспериментальных данных. Полученные результаты указывают на возможность использования дополнительных пиков корреляционной функции в качестве информативного параметра при идентификации вращающегося винта.

*Ключевые слова:* рассеяние звука, вращающийся винт, корреляционная обработка сигналов, линейно частотно-модулированный сигнал

DOI: 10.31857/S0320791920060052

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи, связанные с исследованием акустических свойств процессов, обусловленных вращением винта, хорошо известны из литературы [1]. Большинство работ посвящено задачам генерации звука вращающимся винтом [2, 3], а также использованию регистрируемых сигналов в задачах пассивного или активного обнаружения, идентификации и траекторного сопровождения различных аппаратов с несущим винтом или тянущим/толкающим пропеллером [4–7]. В последнее время подобного рода задачи стали особенно актуальны в связи с широким использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [8]. Повсеместное использование сравнительно недорогих БПЛА требует разработки методов их надежной идентификации, особенно в случаях, когда из-за небольших размеров БПЛА традиционные методы сталкиваются с трудностями. Например, в активном режиме обнаружения ма-

логабаритные БПЛА оказывается сложно отличить от птиц [9]. Среди развиваемых в настоящее время методов обнаружения БПЛА можно выделить пассивные подходы, основанные на применении искусственных нейронных сетей и машинного обучения [10, 11]. В тех задачах, когда входное отношение сигнал/помеха недостаточно для реализации пассивных методов, альтернативой им могут стать активные схемы, в которых осуществляется излучение и последующий прием отраженных сигналов [4]. Исследованию особенностей отражения электромагнитных волн от вращающегося винта посвящены работы [12, 13], где авторы наблюдают в спектре рассеянного сигнала характерные гармонические составляющие, связанные с частотой вращения винта. В акустических задачах аналогичное явление возникновения дополнительных гармоник в спектре сигнала, отраженного от вращающегося винта, экспериментально наблюдалось при измерениях в гидробассейне [14]. В качестве информативного парамет-

ра, демаскирующего присутствие вращающегося винта, авторы [14] рассматривают амплитудную модуляцию отраженного сигнала, которая в определенной мере аналогична амплитудной модуляции, возникающей при отражении гидроакустических сигналов от взволнованной поверхности [15]. При этом авторы [14] ограничиваются анализом экспериментальных результатов, без их детального теоретического обоснования. Рассмотрение ряда теоретических проблем формирования акустических сигналов, отраженных движущимся объектом, проведено в работе [16].

Следует отметить, что для практической реализации методов обнаружения, основанных на анализе отраженных сигналов, требуется достаточно высокое значение выходного отношения сигнал/помеха  $S/N$ . В акустических задачах это является принципиальным вопросом, т. к. в большинстве практических случаев приходится иметь дело с существенными уровнями шумов, маскирующих полезный сигнал. Для повышения значений  $S/N$  в условиях реального эксперимента в настоящей работе рассматривается корреляционная обработка излученного и принятого (отраженного от винта) сигналов. Использование не самих отраженных сигналов, а именно функции взаимной корреляции, является одной из особенностей настоящей работы, отличающей ее от результатов, аналогичных [12–14]. В качестве зондирующего сигнала используется зарекомендовавший себя в задачах обнаружения линейно частотно-модулированный сигнал (ЛЧМ) [17]. В функции взаимной корреляции (КФ) излученного и принятого ЛЧМ-сигналов помимо основного пика, соответствующего времени распространения до рассеивателя и в обратном направлении, наблюдаются дополнительные информативные максимумы, присутствие которых определяется рассеянием звука на вращающемся винте. Присутствие основного пика КФ указывает на наличие рассеивателя, т.е. решает задачу обнаружения; в свою очередь, наличие дополнительных максимумов КФ является информативным параметром для идентификации, указывающим на присутствие вращающегося винта.

Структура настоящей работы следующая. В разделе 2 приводится теоретическое объяснение наблюдаемых в эксперименте результатов, связанных с возникновением кратных (комбинационных) частот в спектре монохроматического сигнала, отраженного от вращающегося винта. Дается теоретическое обоснование наблюдаемым особенностям КФ в зависимости от параметров задачи. Далее, в разделе 3 приводятся результаты

численного моделирования. Обработке и обсуждению результатов лабораторного эксперимента посвящен раздел 4. Итоги работы подводятся в разделе 5.

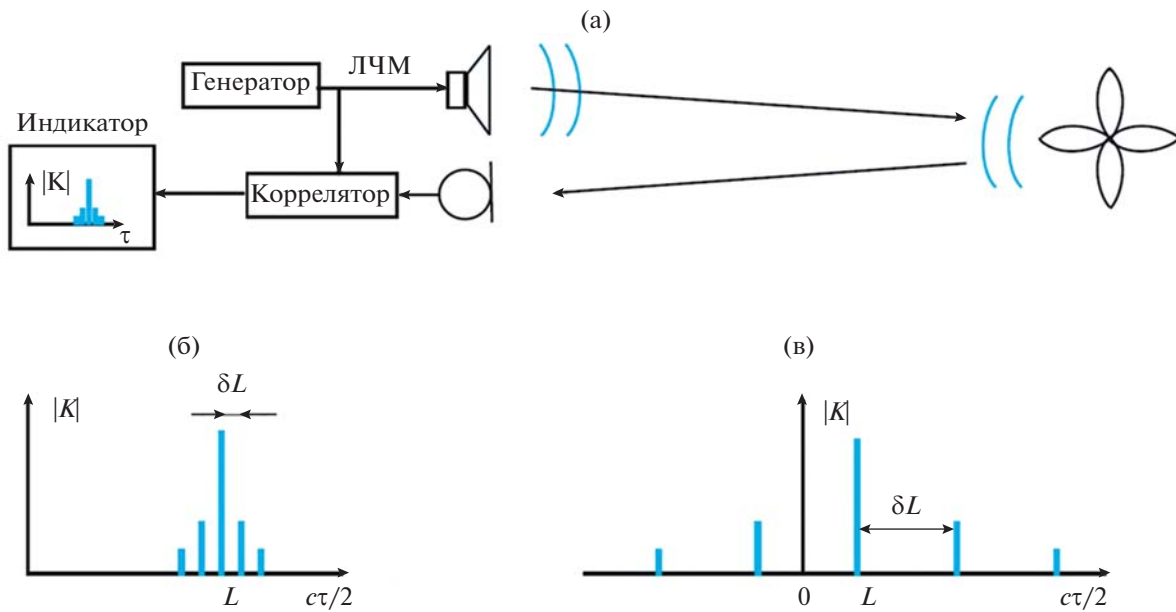
## 2. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИИ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЛЧМ-СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ВРАЩАЮЩИМСЯ ВИНТОМ

Схема эксперимента по измерению взаимной корреляции излученного и принятого сигналов изображена на рис. 1а. Вращающийся винт облучается ЛЧМ-сигналом, отраженный сигнал регистрируется, после чего вычисляется корреляция принятого сигнала с посылкой. Помимо основного пика, получаемая корреляционная функция будет иметь дополнительные пики, обладающие специфической структурой в виде мультиплета, которые будут указывать на наличие винта. Такая специфическая структура является информативным параметром, указывающим на наличие вращающегося винта, что, например, позволяет отличать малоразмерные БПЛА от птиц.

Поясним физическую причину возникновения дополнительных максимумов КФ. Будем считать, что при заданном положении оси вращения винта амплитуда рассеянного поля зависит от угла поворота лопастей относительно направления распространения зондирующего сигнала. Например, если винт содержит две лопасти, а звук распространяется перпендикулярно оси вращения, то наибольшая амплитуда рассеянного сигнала будет наблюдаться в то время, когда лопасти расположены перпендикулярно направлению распространения звука; соответственно, рассеяние будет наименьшим, когда лопасти будут располагаться вдоль направления распространения падающей волны. Таким образом, на частоте  $f$  посылки для заданного положения оси винта и заданного положения источника коэффициент отражения сигнала от винта есть функция времени  $R(t)$ . Зависимость от времени  $t$  вызвана вращением винта. Пусть  $F$  — частота вращения вала пропеллера (винта), а  $N$  — число лопастей (будем считать, что лопасти одинаковые). В этом случае можно предположить, что  $R(t)$  — периодическая функция времени  $t$  с периодом  $1/(NF)$ . Представим  $R(t)$  в виде ряда Фурье:

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

с некоторыми коэффициентами  $R_0$ ,  $R_m$ ,  $\phi_m$ . Если посылка представляет собой гармонический сигнал



**Рис. 1.** (а) – Схема эксперимента по измерению функции взаимной корреляции ЛЧМ сигнала при облучении вращающегося винта. Характерный вид КФ  $K(\tau)$  при отражении ЛЧМ-сигнала от вращающегося винта: (б) – при  $L \geq \delta L$ , (в) – при  $L \ll \delta L$ .

$$u_{in}(t) = A \cos(2\pi ft),$$

то отраженный сигнал  $u_r(t) \equiv u_{in}(t)R(t)$  содержит вклады на комбинационных частотах  $f \pm mNF$ :

$$u_r(t) = AR_0 \cos(2\pi ft) + \frac{A}{2} \sum_{m=1}^{\infty} R_m [\cos(2\pi(f + mNF)t + \phi_m) + \cos(2\pi(f - mNF)t - \phi_m)].$$

Теперь пусть посылка  $u_{in}(t)$  представляет собой ЛЧМ-сигнал с медленно меняющейся мгновенной частотой  $f(t) = f_0 + bt$ :

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

где постоянная  $b$  определяет скорость изменения мгновенной частоты.

Рассеяние  $u_{in}(t)$  на периодически вращающемся винте приводит к тому, что в каждый момент времени  $t$  спектр отраженного сигнала  $u_r(t)$  содержит частоту  $f(t)$  и комбинационные частоты  $f(t) \pm mNF$ .

Рассмотрим функцию взаимной корреляции излученного  $u_{in}(t)$  и отраженного (зарегистрированного микрофоном)  $u_r(t)$  сигналов

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

где  $T$  – время записи сигналов. В отсутствие вращения винта функция  $K(\tau)$  будет иметь единственный пик на временной задержке  $\tau_*$ , соответствующей дальности  $L$  до отражающей поверхности:  $L = c\tau_*/2$ , где  $c$  – скорость звука в среде (предполагается, что среда распространения представляет собой однородную, стационарную среду со скоростью  $c$ ). Вращение винта приводит к возникновению в спектре принятого сигнала дополнительных частот вида  $f(t) \pm m\delta f$ ,  $\delta f = NF$ . В этом случае в интеграле (3) появятся дополнительные пики на временных задержках  $\tau_* \pm \delta\tau$ , соответствующие тем фрагментам произведения подынтегрального выражения в (3), для которых мгновенные частоты совпадают. Фактически, это означает, что сдвиг по частоте на  $\delta f$  в принятом сигнале  $u_r(t)$  соответствует сдвигу в КФ по переменной  $\tau$  на  $\delta\tau = \delta f/b$ . В итоге, если основной пик КФ  $K(\tau)$  соответствует дальности до цели  $L$ , то вращение винта приведет к формированию дополнительных пиков, смещенных друг относительно друга по дальности на величину

$$\delta L = \frac{c\delta\tau}{2} = \frac{c\delta f}{2b} = \frac{cNF}{2b}.$$

Если в каждый момент времени наблюдаются 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  $u_r(t)$  кратных частот  $f(t) \pm mNF$  будет наблюдаться мультиплет.

В зависимости от параметров излучаемого сигнала можно выделить два режима зондирования (предполагается, что можно реализовать и тот, и другой путем подбора соответствующей посылки  $u_{in}(t)$ ):

1. Дальность до цели  $L$  много больше смещения по дальности  $\delta L$ :  $L \gg cNF/2b$ . При этом КФ ЛЧМ-сигнала, отраженного от пропеллера, имеет характерный вид, показанный на рис. 1б. Дополнительные пики КФ в этом случае локализованы вблизи основного максимума, что может благоприятно сказываться на его обнаружении на фоне шумов.

2. Дальность до цели  $L$  много меньше смещения по дальности  $\delta L$ . Характерный для этого случая вид КФ изображен на рис. 1в. Признаком работы винта при таком режиме зондирования является появление множества дополнительных максимумов КФ в области отрицательных временных задержек (см. рис. 1в), причем при абсолютных значениях этих задержек, существенно превышающих  $\tau_*$ . В случае покоящегося винта пики КФ на отрицательных дальностях, т.е. расстояниях, соответствующих отрицательным временным задержкам, не наблюдаются.

Следует отметить, что область локализации пиков КФ  $K(\tau)$  вдоль шкалы временных задержек  $\tau$  будет также определяться эффектом Доплера, связанным с отражением сигнала как от вращающихся лопастей винта, так и от корпуса движущегося БПЛА. Аналитическое выражение для монохроматического сигнала, отраженного от вращающегося винта, можно найти в работах [18, 19]. Основной целью настоящей работы является исследование структуры дополнительных пиков КФ, вызванных присутствием в отраженном сигнале комбинационных частот вида  $\pm mNF$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ . В связи с этим, при проведении натурального эксперимента условия выбирались так, чтобы уменьшить влияние эффекта Доплера. При численном моделировании этот эффект также не рассматривается. Учет эффекта Доплера повышает объем исходных данных, что может использоваться для решения задач обнаружения и идентификации БПЛА [18], но рассмотрение этого вопроса с точки зрения акустических эффектов при корреляционной обработке ЛЧМ-сигналов выходит за рамки настоящей работы.

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На первом этапе численного моделирования полагается, что все лопасти винта полностью идентичные. В этом случае коэффициент отражения  $R(t)$  аппроксимируется периодической функцией:

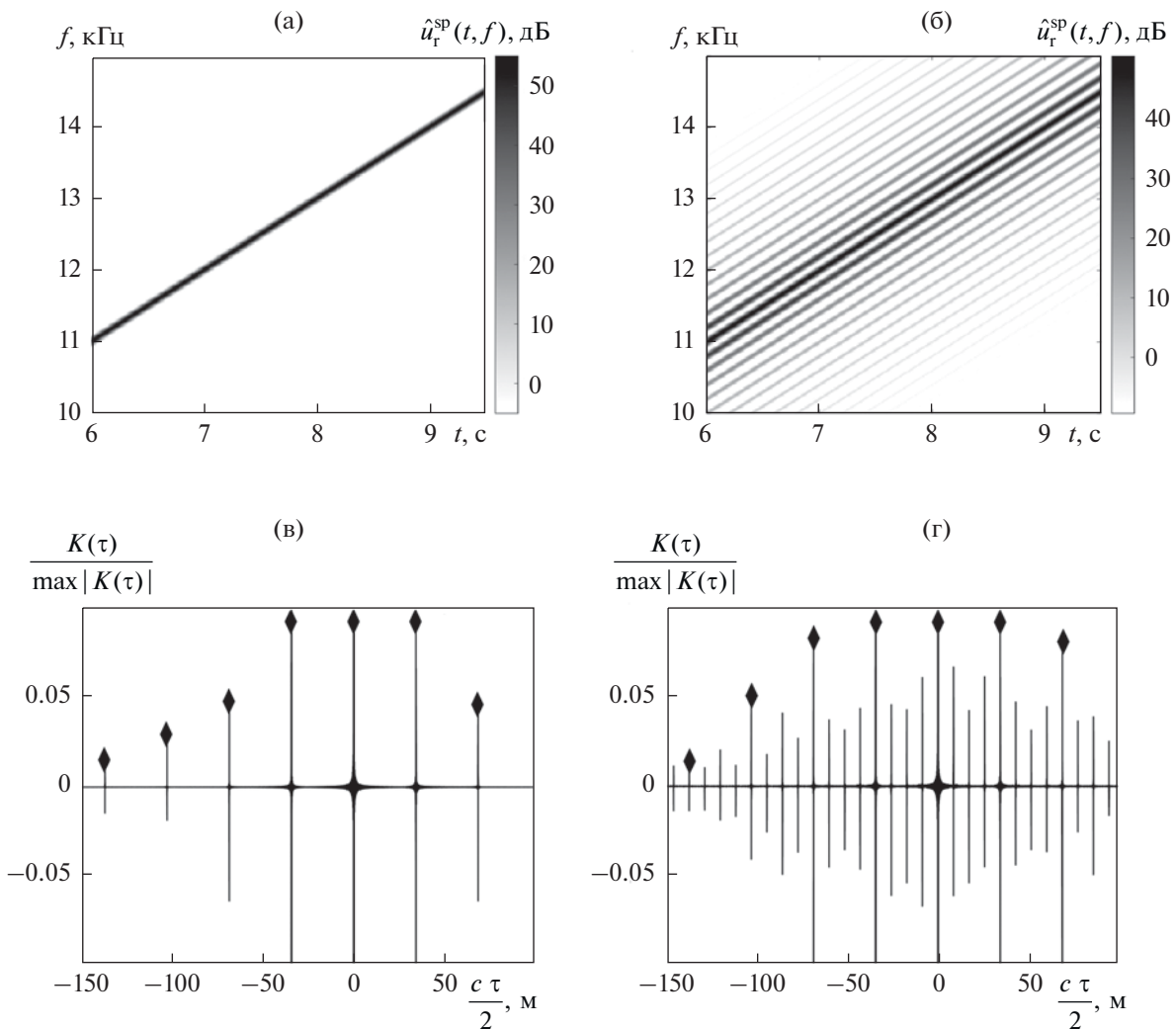
$$R(t) = \left| \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right|, \quad \omega = 2\pi NF. \quad (4)$$

Рассматривается ЛЧМ-сигнал со следующими характеристиками, которые в дальнейшем будут использоваться в эксперименте. Начальная частота  $f_0 = 5$  кГц, конечная частота  $f_1 = 15$  кГц, длительность излучения сигнала  $T = 10$  с. Это соответствует

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

В этом случае  $\delta L = 34$  м, и для расстояний между источником и винтом  $L \approx 1$  м (такие расстояния рассматриваются далее в эксперименте) реализуется вариант  $L \ll \delta L$ , при котором КФ должна содержать последовательность дополнительных пиков в области отрицательных временных задержек.

При анализе полученных результатов рассматривались фрагменты спектрограммы  $u_{in}^{sp}(t, f)$  исходного ЛЧМ-сигнала  $u_{in}(t)$  (2), а также спектрограммы  $u_r^{sp}(t, f)$  отраженного сигнала  $u_r(t) \equiv u_{in}(t)R(t)$ , где  $R(t)$  определено в (4). Спектрограммы вычислялись стандартным образом (см., например, [20]), как оконное фурье-преобразование исходных функций. Для повышения контрастности изображения на рис. 2а и 2б приведены значения рассматриваемых функций в дБ, которые рассчитывались как  $\hat{u}_{in}^{sp}(t, f) = 10 \lg |u_{in}^{sp}(t, f)|^2$  и  $\hat{u}_r^{sp}(t, f) = 10 \lg |u_r^{sp}(t, f)|^2$ . На рис. 2б отчетливо видны кратные частоты  $f(t) \pm mNF$ . Нормированная функция взаимной корреляции  $K(\tau)$  (3) для рассматриваемых параметров сигналов изображена на рис. 2в, где дополнительный фазовый сдвиг за счет распространения сигнала от источника до винта и обратно предполагается скомпенсированным (основной максимум КФ  $K(\tau)$  соответствует нулевой временной задержке  $\tau_* = 0$  с). Для удобства анализа получаемых данных шкала временных задержек  $\tau$  на рис. 2в и далее переведена в дальности  $c\tau/2$ . На рис. 2в видна последовательность дополнительных пиков КФ, расстояния между которыми для рассматриваемых параметров в точности равны  $\delta L = cNF/2b = 34$  м. Следует обратить внимание



**Рис. 2.** Фрагменты спектрограмм модельных сигналов: (а) – исходного ЛЧМ-сигнала  $\hat{u}_{in}^{sp}(t, f) = 10 \lg |u_{in}^{sp}(t, f)|^2$  и (б) – сигнала  $\hat{u}_r^{sp}(t, f) = 10 \lg |u_r^{sp}(t, f)|^2$ , отраженного от вращающегося винта. Нормированные корреляционные функции  $K(\tau) / \max |K(\tau)|$  модельных сигналов, отраженных от винта с (в) – одинаковыми и (г) – отличающимися лопастями (ромбами обозначены пики КФ, расположенные на одних и тех же дальностях).

на наличие пиков на значительных отрицательных дальностях, существенно превышающих ожидаемые значения  $L \approx 1$  м. В случае, когда винт не вращается, эти пики отсутствуют.

В реальной ситуации отражение сигнала от различных лопастей винта может отличаться, например, в силу того, что звук падает на лопасти под разными углами, а геометрия самих лопастей может быть различной. В этом случае коэффициент отражения сигнала от винта  $R(t)$  будет периодической функцией с периодом  $1/F$ , т.е. с периодом в  $N$  раз большим по сравнению со случаем

$1/(NF)$  абсолютно идентичных лопастей (1). В итоге в КФ появятся дополнительные промежуточные пики, расположенные друг от друга на расстояниях  $\delta L' = \delta L/N = cF/2b$ , для рассматриваемого случая равных  $\delta L' = 8.5$  м. Анализ таких промежуточных пиков позволяет оценить число лопастей винта по отношению  $\delta L$  к  $\delta L'$ .

Чтобы промоделировать случай отличающихся лопастей, требуется задать зависимость  $R(t)$  в виде некоторой функции, имеющей период  $1/F$ . В качестве примера был рассмотрен следующий

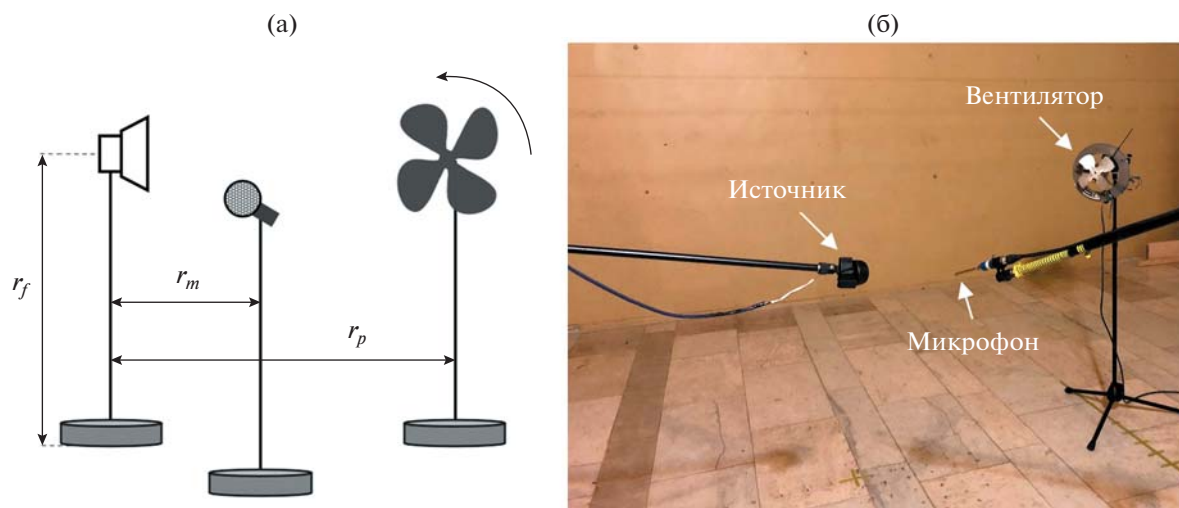


Рис. 3. (а) – Схема и (б) – фотография экспериментальной установки.

вид  $R(t)$ , условно соответствующий случаю, когда одна лопасть отличается от других:

$$R(t) = \begin{cases} \cos\left(0.75\frac{\omega t}{2}\right), & \frac{\omega t}{2} \in \Omega_1, \\ \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right), & \frac{\omega t}{2} \in \Omega_2, \\ 0, & \frac{\omega t}{2} \notin \Omega_1 \cup \Omega_2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Omega_1 = \left(2\pi n; \frac{3\pi}{8} + 2\pi n\right]$ ,  $\Omega_2 = \left[\frac{\pi}{2} + 2\pi n; 2\pi(n+1)\right]$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Следует отметить, что описанный способ моделирования разных лопастей винта является лишь одним из возможных вариантов; использование аналогичных моделей приводит к похожему результату. Результаты моделирования КФ для случая разных лопастей представлены на рис. 2г, где видны дополнительные промежуточные пики, расположенные друг от друга на расстояниях  $\delta L' = 8.5$  м. Для удобства сравнения полученных результатов пики КФ, расположенные на рис. 2в и 2г на одинаковых дальностях, обозначены ромбами. Похожие промежуточные пики КФ наблюдаются и в натурном эксперименте.

#### 4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения проводились в реверберационной камере кафедры акустики физического факультета МГУ. Экспериментальный стенд (рис. 3) состоял из электродинамического источника звука, излучающего в диапазоне 3–20 кГц, измерительного микрофона и закрепленного на штативе вентилятора. Использовался вентилятор с  $N = 4$  лопастями, которые вращаются с частотой  $F \approx 50$  Гц. Частота вращения винта  $F$  определялась по ос-

новному тону в спектре шума, который регистрировался с помощью шумомера, располагаемого в непосредственной близости от вращающегося винта. Ошибка оценки частоты вращения пропеллера  $F$  не превышала 5–8%.

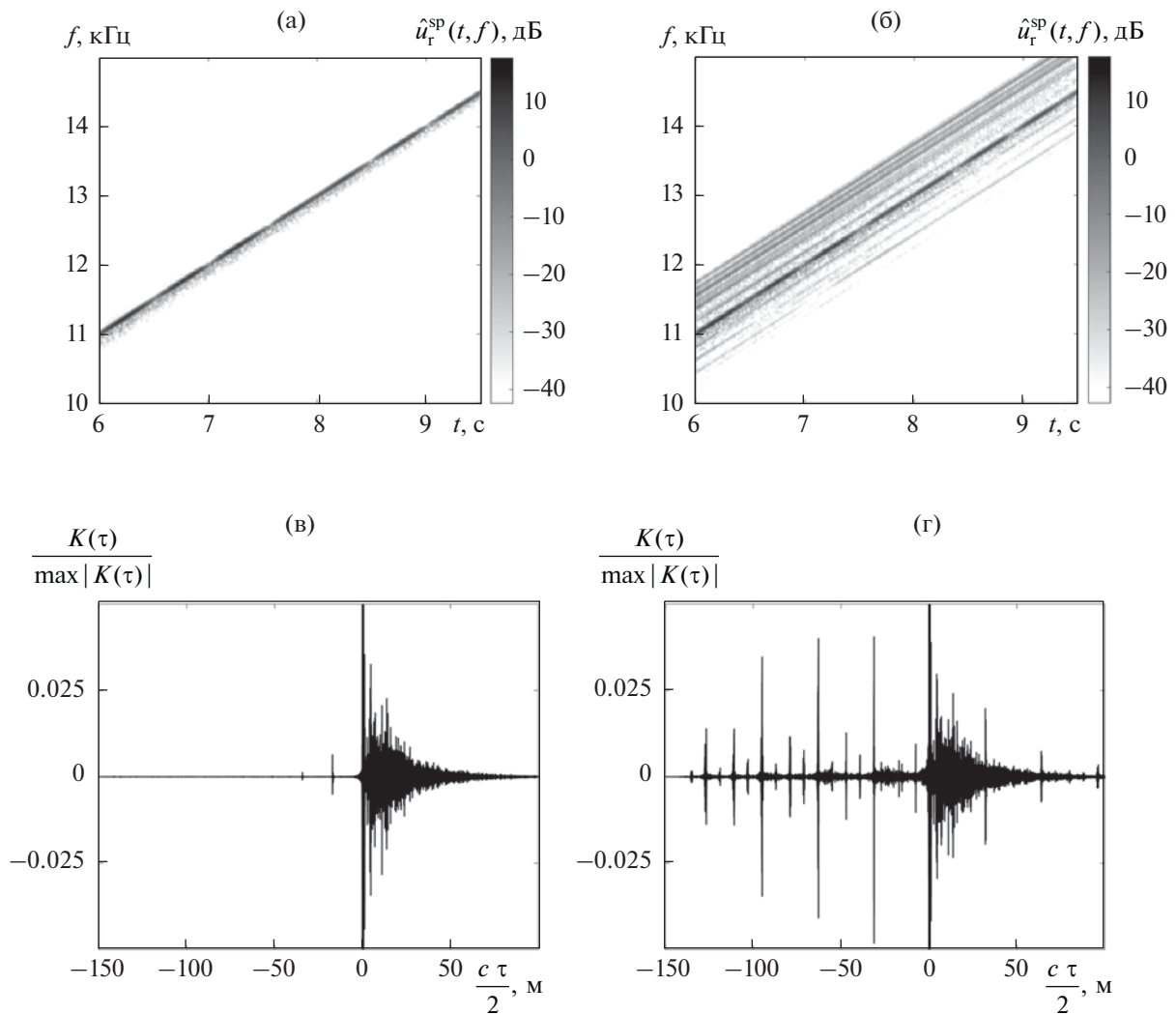
На динамик подавался ЛЧМ-сигнал, синтезированный цифровым способом. Принятый микрофоном сигнал оцифровывался звуковой картой и обрабатывался на ЭВМ. Частота дискретизации для ЦАП и АЦП составляла 44.1 кГц. В процессе обработки вычислялась КФ принятого сигнала с исходной ЛЧМ-посылкой. Схема экспериментальной установки и фотография, сделанная при проведении эксперимента, представлены на рис. 3.

При проведении эксперимента взаимное расположение источника, микрофона и вентилятора выбирались таким образом, чтобы вентилятор облучался в направлении, незначительно отличающемся от оси вращения, для уменьшения влияния эффекта Доплера, но, при этом, чтобы одна из лопастей давала блик от источника на приемнике в каком-то положении вентилятора. Модуляция коэффициента отражения в этом случае достигается с помощью периодического попадания блика на приемник.

Геометрические параметры установки были следующими (в соответствии с обозначениями на рис. 3):

$$r_f = 1 \text{ м}, \quad r_m = 0.1 \text{ м}, \quad r_p = 1.2 \text{ м}.$$

Характеристики излучаемого ЛЧМ-сигнала выбирались такими же, как и при численном моделировании. Основной задачей эксперимента являлось наблюдение дополнительных пиков КФ в



**Рис. 4.** Фрагменты спектрограмм  $\hat{u}_r^{sp}(t, f) = 10 \lg |u_r^{sp}(t, f)|^2$  экспериментально измеренных сигналов, отраженных от (а) – неподвижного и (б) – вращающегося винта; (в) и (г) – соответствующие этим сигналам нормированные КФ.

области отрицательных временных задержек (на отрицательных дальностях).

На рис. 4а, 4б приведены результаты вычисления спектрограмм сигналов, отраженных от неподвижного вентилятора и от вращающегося вентилятора, соответственно. На рис. 4б отчетливо видны кратные частоты, возникающие в спектре сигнала, отраженного от вращающегося винта. Функции взаимной корреляции  $K(\tau)$ , вычисленные для неподвижного и вращающегося винта, представлены на рис. 4в, 4г, соответственно. Обсуждаемый эффект – возникновение множества пиков КФ в области отрицательных дальностей – отчетливо наблюдается на рис. 4г. Экспериментально полученные значения положения пиков отличаются

от теоретических не более чем на 7.5%, что соответствует точности определения частоты вращения винта. Стоит отметить, что пики на отрицательных расстояниях видны более отчетливо, так как в этой области отсутствуют шумы реверберации, вызванные многократными отражениями излучаемого сигнала от стенок реверберационной камеры. Для неподвижного вентилятора (рис. 4в) информативные дополнительные пики в КФ не наблюдаются. Вместе с тем на рис. 4в видны паразитные всплески в КФ, которые повторяются и при включенном вентиляторе (рис. 4г). Присутствие этих ложных пиков связано с наличием в обрабатываемых данных различных помех, вызванных, например, нелинейными эффектами, проявляющимися при излучении и

приеме сигналов на этапе их цифровой обработки. В дальнейшем особое внимание будет уделено улучшению характеристик используемого оборудования. Вместе с тем следует отметить, что расположение ложных пиков в КФ не совпадает с положением информативных максимумов. Это позволяет даже в такой сложной помеховой обстановке однозначно идентифицировать обсуждаемые в работе эффекты, возникающие при корреляционной обработке ЛЧМ-сигналов, отраженных от вращающегося винта.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение стандартной корреляционной обработки к сигналам, отраженным от вращающегося винта, приводит к возникновению в функции взаимной корреляции излученного и принятого сигналов особенностей в виде дополнительных максимумов КФ. Взаимное расположение этих пиков на оси временных задержек зависит от параметров излучаемого сигнала и характеристик винта. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в работе, указывают на возможность использования этой информации в качестве дополнительного информативного параметра, указывающего на наличие вращающегося винта у летательного аппарата, что может быть полезным в задачах идентификации малогабаритных БПЛА. Возможный вариант алгоритма идентификации может основываться на наличии максимумов КФ в области отрицательных временных задержек, т.е. там, где максимумов КФ быть не должно в случае отражения от неподвижного 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 в условиях реального эксперимента.

Полученные в работе результаты требуют дальнейшего детального исследования с целью оценки возможности их применения к решению конкретных практических задач. Так, представляет интерес задача выбора оптимальной посылки  $u_{in}(t)$ , обеспечивающей максимальное соотношение сигнал/помеха для дополнительных пиков КФ, при этом максимизирующей (или минимизирующей, в зависимости от решаемой задачи) расстояния между этими пиками. Сравнительная простота практической реализации рассматриваемого подхода открывает перспективы на следующем этапе исследований перейти к созданию

экспериментального стенда для осуществления натуральных измерений с малогабаритными БПЛА.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06048 мк.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джонсон У.* Теория вертолета: в 2-х книгах. Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
2. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Воронцов В.И., Карабасов С.А., Аникин В.А.* Расчет шума несущего винта вертолета и его экспериментальная проверка на режиме висения // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 651–664.
3. *Воронцов В.И., Фараносов Г.А., Карабасов С.А., Зайцев М.Ю.* Сравнение направленности шума несущего вертолетного винта для режимов полета и висения // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 3. С. 308–318.
4. *Farlik J., Kratky M., Casar J. et al.* Multispectral detection of commercial unmanned aerial vehicles // Sensors. 2019. V. 19. № 7. P. 1517.
5. *Sedunov A., Haddad D., Salloum H., Sutin A., Sedunov N., Yakubovskiy A.* Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking // IEEE Int. Symp. on Technologies for Homeland Security (HST). 2019. <https://doi.org/10.1109/HST47167.2019.9032916>
6. *Faraji M.M., Shouraki S.B., Iranmehr E., Linares-Baranco B.* Sound Source Localization in Wide-Range Outdoor Environment Using Distributed Sensor Network // IEEE Sensors J. 2020. V. 20. № 4. P. 2234–2246.
7. *Shi Z., Chang X., Yang C. et al.* An Acoustic-Based Surveillance System for Amateur Drones Detection and Localization // IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2020. V. 69. № 3. P. 2731–2739.
8. <http://drones.cnas.org>
9. *Coluccia A., Fascista A., Schumann A. et al.* Drone-vs-bird detection challenge // 16th IEEE Int. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). 2019. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2019.8909876>
10. *Kim B.K., Kang H., Park S.* Drone classification using convolutional neural networks with merged doppler images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. V. 14. № 1. P. 38–42.
11. *Nguyen L., Valls M.J., Qiu X.* Multilevel B-Splines-Based Learning Approach for Sound Source Localization // IEEE Sensors J. 2019. V. 19. № 10. P. 3871–3881.
12. *Marak K., Peto T., Bilicz S., Gyimothy S., Pavo J.* Electromagnetic simulation of rotating propeller blades for radar detection purposes // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. V. 54. № 3. P. 7203504.
13. *Marak K., Peto T., Bilicz S. et al.* Bistatic RCS calculation for propellers at near-resonant frequencies // Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. V. 59. № 1. P. 19–26.



14. Колмогоров В.С., Шнак С.А. О возникновении демаскирующего спектрального вально-лопастного ряда при реализации интерференционного обнаружителя подводного объекта // Специальная техника. 2014. Т. 20. № 6. С. 8–12.
15. Колмогоров В.С., Крючков А.Н. Амплитудная модуляция в параметрических антеннах реверберационного типа // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 388–394.
16. Руденко О.В., Гусев В.А. Движущийся объект: спектры сигналов пассивной, активной локации и переходное излучение // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 6. С. 599–609.
17. Klauder J.R., Price A.C., Darlington S., Albersheim W.J. The theory and design of chirp radars // Bell System Technical J. 1960. V. 39. № 4. P. 745–808.
18. Chen V.C. Micro-Doppler effect in radar. Boston, London, Artech House, 2011. 309 p.
19. Martin J., Mulgrew B. Analysis of the theoretical radar return signal from aircraft propeller blades // IEEE Int. Radar Conf. 1990. P. 569–572.
20. Oppenheim A.V., Ronald W.S., John R.B. Discrete-Time Signal Processing. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall, 1999. 870 p.