

*В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук,
В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук,
С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, С.А. ШЕЙКО, канд. техн. наук, И.С. СЕЛЕЗНЕВ*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПЕЛЕНГОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Введение

В ряде работ [1 – 9] выполнен обзор способов пеленгации воздушных целей и анализ пригодности известных алгоритмов для пеленгования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по их акустическому излучению.

Беспилотные летательные аппараты получили широкое распространение и применение во многих областях человеческой деятельности. Они могут выполнять широкий набор полезных функций, но при этом они могут нести также значительную физическую или информационную угрозу в военной области, хозяйственной деятельности, частной жизни людей [10].

В статье [1] показано, что при использовании классических методов пеленгации в силу их особенностей и относительно малых размеров апертуры антенной системы затруднительным оказывается разрешение близко расположенных источников акустического излучения. Решение же задачи разрешения и пеленгации объектов с необходимой точностью обеспечивают сверхразрешающие методы. Кроме того, выбор метода пеленгования БПЛА при разработке локационной акустической системы должен осуществляться с учетом наличия априорной информации об исследуемых объектах, имеющихся сигнальной и помеховой обстановках, а также с учетом конфигурации микрофонной решетки (МР), ее геометрических параметров, количества микрофонов

Данная работа посвящена экспериментальной оценке эффективности некоторых алгоритмов пеленгования малоразмерных и малозаметных БПЛА по их акустическому излучению.

1. Задача экспериментов

Задача проведенных экспериментов – исследование эффективности использования некоторых алгоритмов определения пеленга на БПЛА по пространственному спектру акустического излучения методом Бартлетта (МБ), методом Кейпона (МК) [1], а также с использованием метода взаимной корреляционной функции (МВКФ).

Экспериментальная проверка эффективности алгоритмов определения пеленга на БПЛА по акустическому излучению была проведена в ходе выполнения нескольких натуральных исследований:

- проверки перечисленных алгоритмов с использованием гармонического сигнала и акустического излучения (АИ) макета винтомоторной группы БПЛА в закрытом помещении в условиях сильных отражений;
- проверки этих алгоритмов с использованием гармонического сигнала и АИ макета винтомоторной группы БПЛА в открытом пространстве с минимальным влиянием отражений от местных предметов;
- проверки алгоритмов Бартлетта, Кейпона и МВКФ в реальных условиях режимов полета и зависания БПЛА.

2. Средства измерений

Запись сигналов акустического излучения БПЛА осуществлялась с применением МР из четырех измерительных конденсаторных микрофонов Superlux ЕСМ – 999, имеющих круго-

вую диаграмму направленности. Микрофоны имели ветрозащиту и размещены на рейке с шагом 180 мм. Выходы микрофонов подключены к входу внешней четырехканальной звуковой карты Behringer U – Phoria UMC404HD, с помощью которой звуковые электрические сигналы усиливаются малошумящими микрофонными усилителями и преобразуются в цифровую форму с частотой дискретизации $F_s = 48$ кГц и разрядностью 24 бита. Микрофон Superlux ECM999 имеет следующие технические характеристики: диапазон частот – 20 ... 20000 Гц, чувствительность – 37 дБВ/Па, диаграмма направленности – круговая. Четырёхэлементная МР смонтирована на поворотном устройстве с отсчетной угломерной шкалой.

В качестве источника узкополосного акустического сигнала использована Bluetooth-колонка JBL MINI Xtreme. Выходная мощность – 20 Вт, диапазон воспроизводимых частот – 20...20000 Гц.

В качестве источника широкополосного акустического сигнала используется макет винтомоторной группы БПЛА, рис. 1, или квадрокоптер DJI Phantom 3. В состав макета входят электродвигатель A2212 930KV 3.17 мм, пропеллер 8'x4.5, регулятор хода Mystery 30A и контроллер оборотов. Контроллер оборотов позволял регулировать скорость вращения двигателя в широком диапазоне значений. При необходимости использовался макет с четырьмя винтомоторными группами. Такой макет, в отличие от квадрокоптера, при лабораторных исследованиях позволял устанавливать его в любое положение в пространстве и задавать необходимые режимы работы двигателей без вмешательства бортового оборудования БПЛА в процесс управления двигателями.

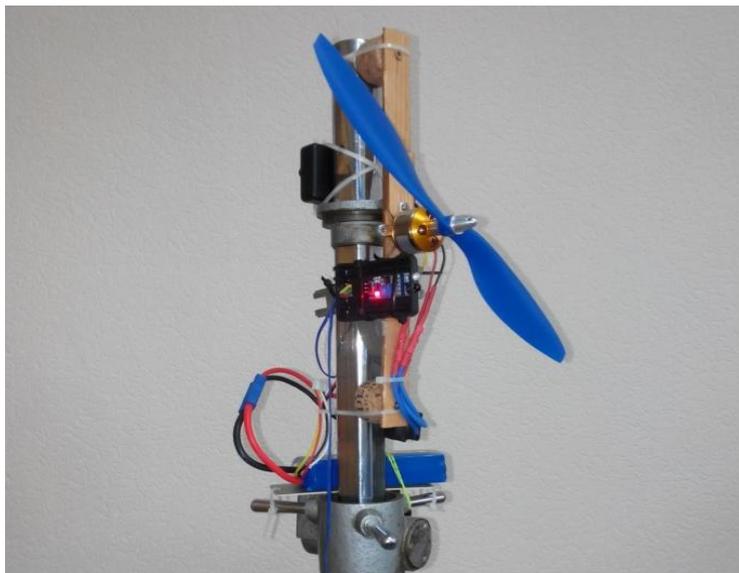


Рис. 1

3. Метод взаимной корреляционной функции

В спектре акустического излучения электрической винтомоторной группы современных БПЛА присутствуют узкополосные тональные и широкополосные шумоподобные составляющие с преобладающим излучением воздушного винта [11 – 15], рис. 2. Применение алгоритмов определения направления прихода АИ по пространственному спектру методами Бартлетта и Кейпона предполагает использование узкополосных сигналов. Поэтому использование широкополосного излучения винтомоторной группы БПЛА требует некоторой адаптации рассмотренных алгоритмов обработки акустических сигналов.

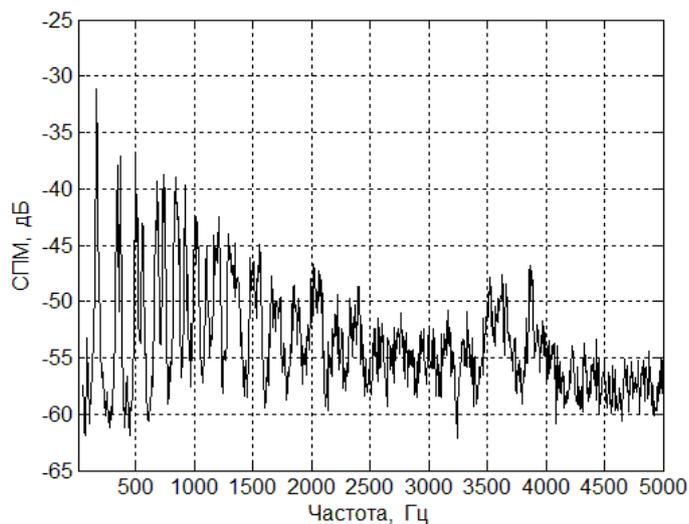


Рис. 2

$$r_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(t) S_j(t + \tau) dt,$$

где $S_i(t)$, $S_j(t)$ – широкополосные акустические сигналы на входе i -го и j -го микрофонов, T – время анализа.

Согласно теореме Винера – Хинчина энергетический спектр стационарного случайного процесса и его ковариационная функция связаны прямым и обратным преобразованием Фурье, и чем шире полоса частот, занимаемая сигналом, тем уже корреляционная функция.

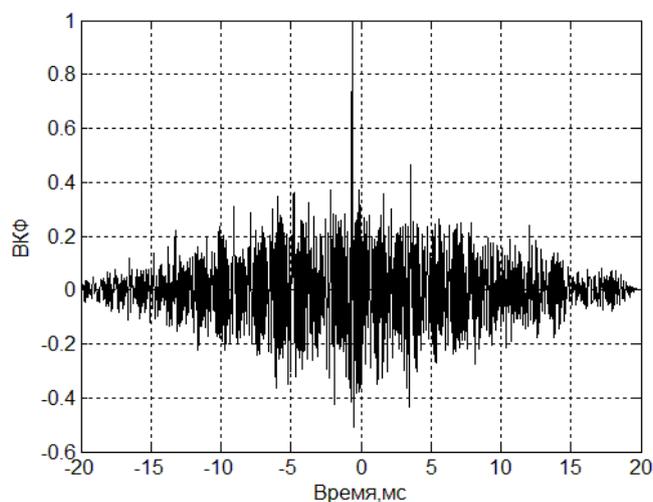


Рис. 3

Для определения направления прихода АИ широкополосных сигналов широко используется метод взаимной корреляционной функции (ВКФ). Сдвиг времени прихода широкополосного акустического сигнала τ к отдельным микрофонам МР измеряется путем вычисления положения максимумов ВКФ сигналов, принимаемых соответствующими микрофонами. Вычисление ВКФ сигналов БПЛА полученных с микрофонов МР выполняется по формуле:

Из рис. 3 видно, что ВКФ акустических сигналов квадрокоптера DJI Phantom 3, полученных с микрофонов МР, имеет вид близкий к δ -функции. Это позволяет при больших соотношениях сигнал/шум определять величину сдвига времени прихода широкополосного акустического сигнала между микрофонами МР с точностью до шага дискретизации сигналов.

При известном расстоянии между i -м и j -ми микрофонами d и задержки времени прихода τ можно определить угловое положение источника излучения:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\tau c_{зв}}{d}\right),$$

где $c_{зв}$ – скорость распространения звука.

4. Результаты натуральных измерений

4.1. Исследование эффективности алгоритмов определения пеленга на БПЛА по акустическому излучению в помещении

Исследование влияния отражений от местных предметов на эффективность работы алгоритмов определения пеленга на БПЛА по акустическому излучению проводилось в помещении с размерами $6 \times 6 \times 3$ м³. Источник акустического излучения и четырехэлементная МР были установлены на дистанции 5 м на высоте 1,5 м над уровнем пола. В качестве источника акустического излучения использовался гармонический сигнала с частотой 800 Гц и макет винтомоторной группы БПЛА.

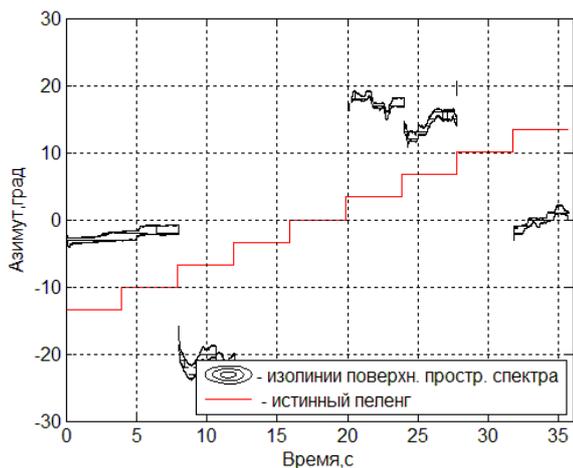


Рис. 4

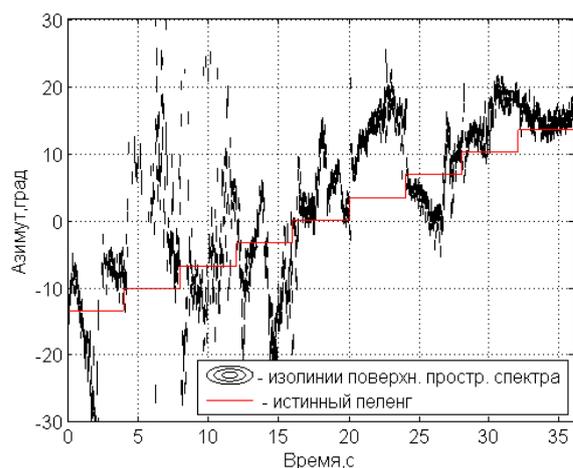


Рис. 5

Источник акустического сигнала последовательно устанавливался в 9 позициях в диапазоне пеленгов $-14^{\circ} \dots 14^{\circ}$ и включался на 4 с. На рис. 4 представлены изолинии (уровень $-0,02$) поверхности, образованной перемещением по оси времени с интервалом 100 мс нормированных, представленных в логарифмической форме, пространственных спектров (поверхности пространственных спектров), полученные МБ для гармонического сигнала. Изолинии соответствуют контурам вершины поверхности пространственного спектра, истинное значение пеленгов представлено ступенчатой линией. Наличие сильных переотражений в помещении приводит к появлению аномальных оценок пеленга на источник гармонического сигнала. Аналогичные результаты получены для МК и МВКФ.

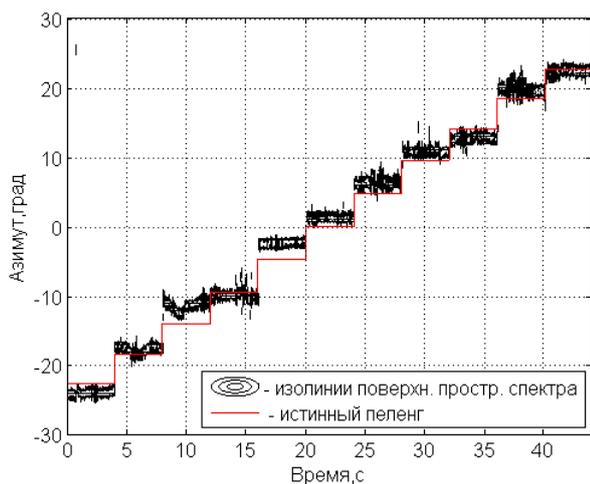
Использование алгоритмов определения пеленга на БПЛА по пространственному спектру акустического излучения методами Бартлетта и Кейпона предполагает применение узкополосных сигналов. Чтобы при обработке акустических широкополосных сигналов БПЛА обойти это ограничение, выделяют узкополосную составляющую сигнала с высокой спектральной плотностью. При обработке применен полосно-пропускающий фильтр с центральной частотой $F = 900 \text{ Гц}$ и относительной полосой пропускания $0,1$.

На рис. 5 представлены изолинии (уровень $-0,02$) поверхности пространственных спектров, полученные МБ для АИ винтомоторной группы БПЛА для 9 позиций в диапазоне пеленгов $-14^{\circ} \dots 14^{\circ}$. Так же, как и для гармонического сигнала, наличие переотражений приводит к появлению аномальных оценок пеленга на источник акустического сигнала винтомоторной группы БПЛА. Аналогичные результаты получены для МК и МВКФ.

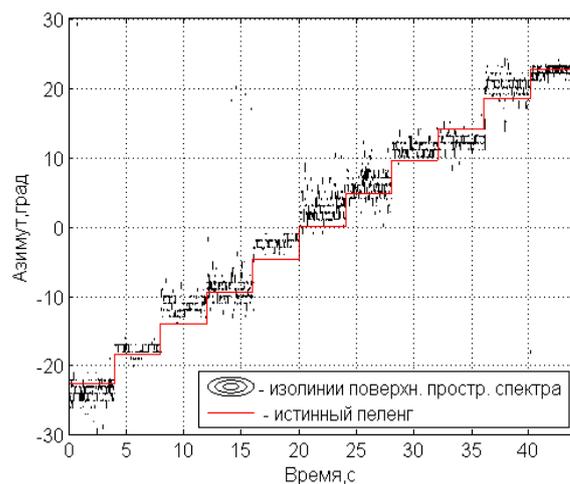
4.2. Исследование эффективности алгоритмов определения пеленга на источник акустического излучения в открытом пространстве

Для минимизации влияния отражений от местных предметов натурный эксперимент проводился на плоской поверхности крыши пятиэтажного корпуса с источниками гармонического и широкополосных сигналов. Высота МР над уровнем крыши составляла $h_1 = 1,5 \text{ м}$, высота установки источника гармонических колебаний $-0,2 \text{ м}$, дистанция 5 м . Источник гармонического сигнала последовательно устанавливался в 11 позициях в диапазоне пеленгов $-22^{\circ} \dots 22^{\circ}$ и включался на 4 с.

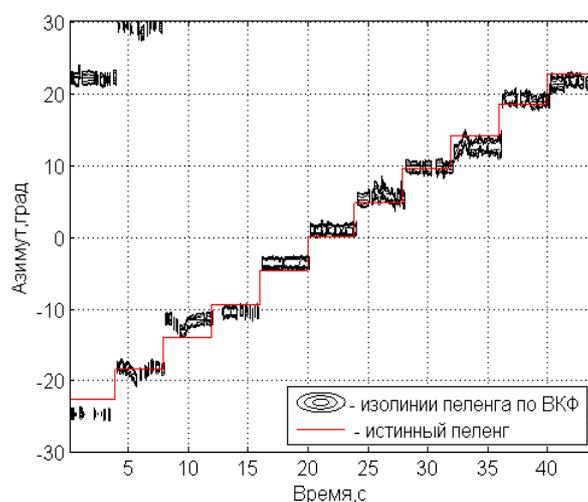
В результате обработки записей от источника гармонического сигнала частотой 800 Гц в открытом пространстве выполнено построение изолиний поверхности пространственного спектра методами Бартлетта, Кейпона и поверхности ВКФ, рис. 6. Изолинии соответствуют контурам вершины поверхности пространственного спектра и поверхности ВКФ, истинное значение пеленгов представлено ступенчатой линией. Метод Кейпона для гармонического сигнала даёт несколько большую дисперсию оценок пеленга по сравнению с методом Бартлетта.



а



б



в

Рис. 6

В эксперименте с винтомоторной группой БПЛА пеленг на источник сигнала изменялся путем поворота МР в секторе углов $-90^{\circ} \dots 90^{\circ}$ степенями через 15° ; результаты эксперимента отражены на рис. 7. При работе по акустическим сигналам от винтомоторной группы БПЛА метод Кейпона имеет значительно большую разрешающую способность, чем классический метод Бартлетта, и меньший уровень боковых лепестков.

Для рассмотренных методов (МБ, МК, МВКФ) оценки измерений пеленга на винтомоторную группу БПЛА по акустическому сигналу в открытом пространстве показывают хорошее соответствие заданным значениям пеленга. Надо отметить, что при использовании МБ и МК существенно растёт дисперсия оценок пеленга при азимутах более 60° . Для МВКФ дисперсия оценок пеленга существенно меньше, чем для МБ и МК.

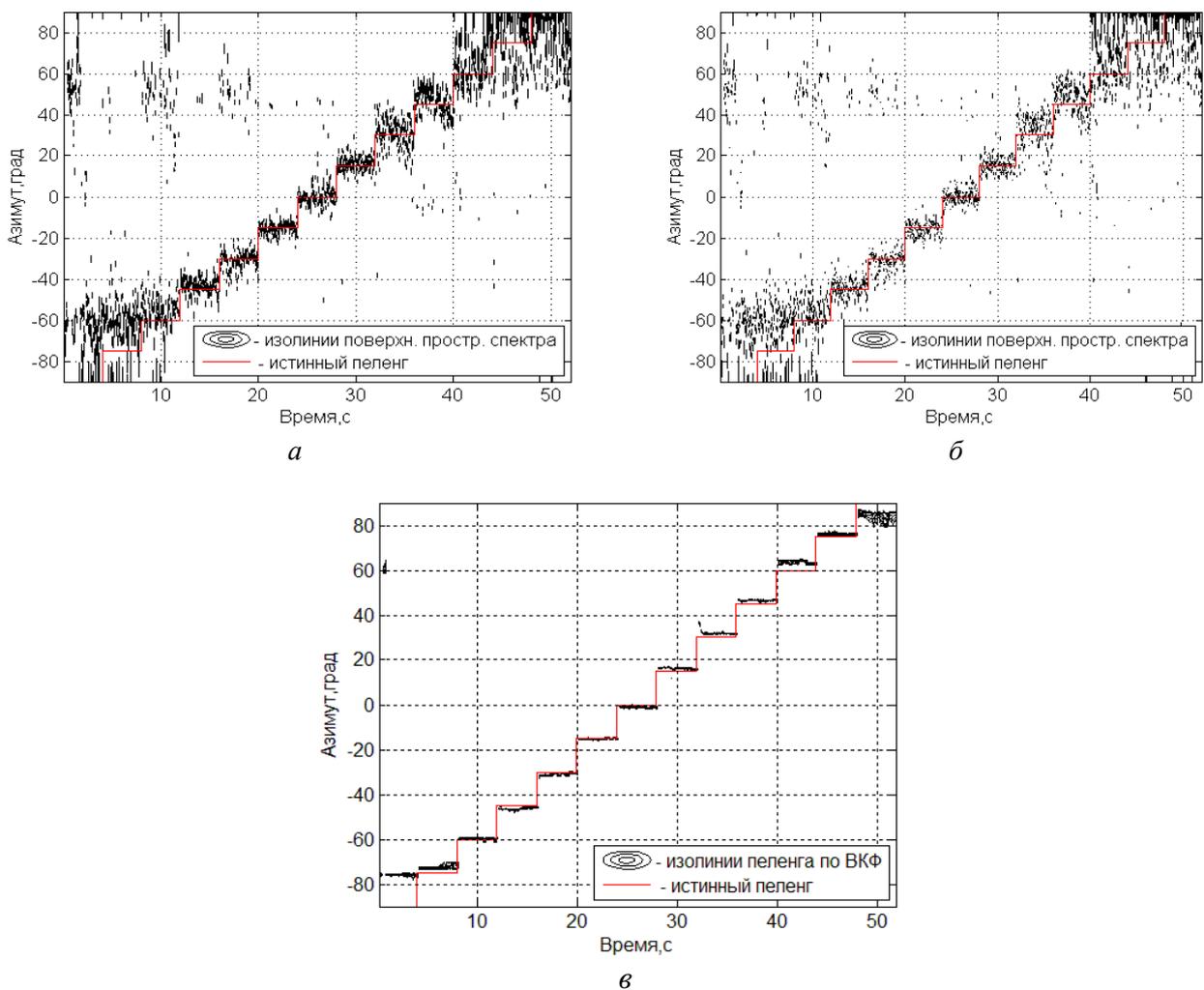


Рис. 7

4.3. Исследование эффективности алгоритмов определения пеленга на БПЛА по акустическому излучению в реальных условиях

При проведении натурных экспериментов по исследованию эффективности алгоритмов определения пеленга на БПЛА по акустическому излучению в реальных условиях в качестве источника акустического излучения использовался квадрокоптер DJI Phantom 3. На рис. 8, а представлен момент зависания квадрокоптера, во время проведения эксперимента по измерению пеленгационной характеристики.

Четырёхэлементная МР (рис. 8, б) размещалась на плоской поверхности крыши пятиэтажного здания. Высота крыши над поверхностью земли 20 м. Во время сеансов измерений квадрокоптер зависал в стороне от здания, расстояние квадрокоптера от МР составляло – 10...30 м, высота над уровнем крыши – 4 м, высота МР над уровнем крыши – 1,5 м. Направление диаграммы направленности МР на квадрокоптер по угломерному устройству устанавливалось на 0°. Амплитуда рыскания квадрокоптера относительно точки зависания, обусловленная порывами ветра, не превышала 0,5 м. Неопределенность пеленга, вызванная рысканием, при удалении БПЛА на 10 м, не превышала 3°, на 30 м – 1°. Уровень шума окружающей среды в месте проведения измерений 50...52 дБА.

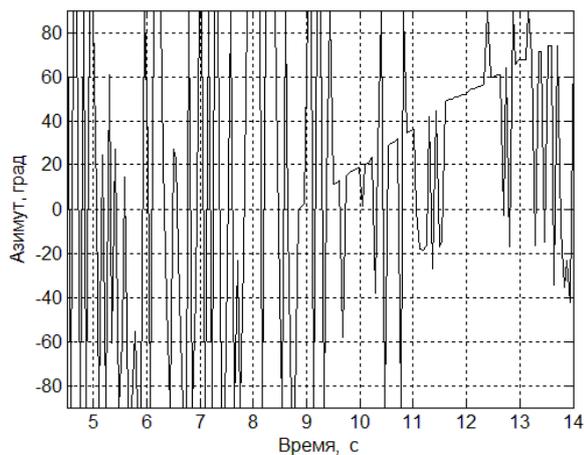


а

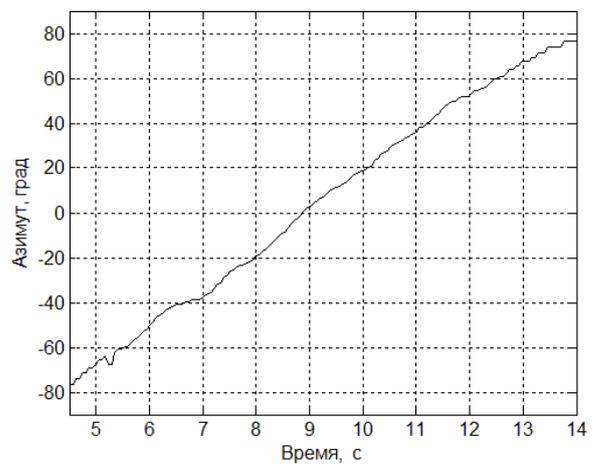


б

Рис. 8



а



б

Рис. 9

После выведения квадрокоптера на позицию зависания измерялась пеленгационная характеристика путем поворота МР в секторе углов $90^\circ \dots 90^\circ$. Результат оценки пеленга на БПЛА в коротком сеансе поворота МР (время поворота около 10 с) по алгоритму МВКФ на расстоянии 30 м представлен на рис. 9, *а*. Для уменьшения влияния низкочастотных помех [1], обусловленных природными атмосферными и антропогенными шумами, применяется цифровой фильтр верхних частот (ФВЧ). Результат оценки пеленга после подавления низкочастотных шумов ФВЧ с частотой среза 700 Гц представлен на рис. 9, *б*.

Для измерения пеленгационной характеристики проводилась запись сигнала при повороте МР в секторе углов $-90^\circ \dots 90^\circ$ степенями через 15° . Длительность записи сигнала в каждой угловой позиции составляет 4 с, применялось подавление низкочастотных шумов ФВЧ с частотой среза 700 Гц. Пеленгационные характеристики, полученные при удалении БПЛА на 10 и 30 м, представлены на рис. 10.

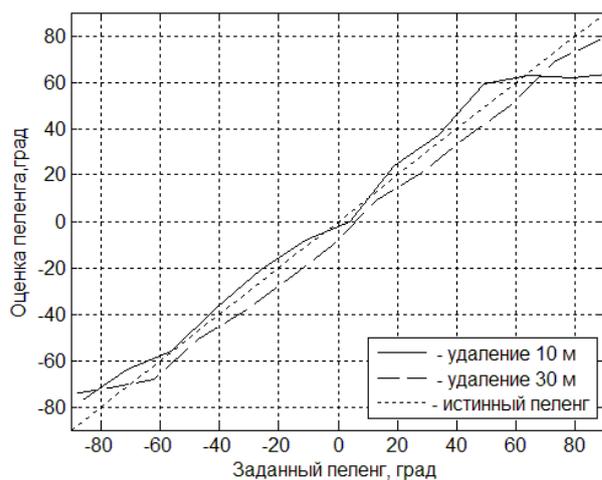


Рис. 10

Сдвиг пеленгационных характеристик, полученных при удалении 10 м и 30 м, относительно положения истинного пеленга, вызван неточностью выведения БПЛА в точку зависания при проведении измерений. Значительное отклонение пеленгационной характеристики при пеленгах более 60° обусловлено влиянием отражений от надстроек на крыше здания.

Выводы

1. Для работы с акустическим излучением БПЛА алгоритмы МБ, МК и МВКФ требуют определенной адаптации (в том числе и применения ВЧ фильтров).

2. Пеленги источника гармонического сигнала и акустического сигнала винтомоторной группы БПЛА в помещении ни одним из использованных методов (МБ, МК, МВКФ) определить невозможно из-за переотражений от стен и предметов, что свидетельствует о существенном влиянии помех при обработке полезных акустических сигналов в микрофонных решетках.

3. Метод Кейпона имеет значительно большую разрешающую способность, чем классический метод Бартлетта, и меньший уровень боковых лепестков.

4. Результаты определения пеленга источника акустического излучения в широкой полосе частот в открытом пространстве показывают хорошее соответствие заданным значениям пеленга при применении метода МВКФ.

5. Для повышения эффективности работы алгоритма МВКФ при обработке акустических сигналов необходимо уменьшать влияние низкочастотных помех, обусловленных природными акустическими шумами.

Список литературы:

1. Карташов В.М., Коротцев И.В., Олейников В.Н. и др. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып.196. С. 22-31.
2. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. // Proceedings of the IEEE, vol. 57, No. 8, pp. 1408-1418.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. Москва : Радио и связь, 1989. 440 с.
4. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1990. 584 с.
5. Москалец Н.В. Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы // Вісник Нац. техн ін-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. №16 (1238). С. 53-61.
6. Сафонова А.В. Эффективность алгоритма оценивания угловых координат источника радиосигнала при различных методах обработки входных реализаций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №2. С. 54-60.
7. Петров В.П., Шауэрман А.К. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решетках // Вестник СибГУТИ. 2011. №2. С. 53-62.
8. Косяков В.М., Свиридов М.А. Сравнительная оценка методов спектрального анализа по совокупности показателей эффективности // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. № 4. С. 23-27.
9. Макаров Е.С. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой. Воронеж, 2009. 167 с.
10. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Изд-во «Стратегические приоритеты», 2016. 676 с.
11. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheiko S.A., Babkin S.I., Korytsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol.77, Issue 10. P. 915-924.

12. Гордієнко Ю.А., Бугайов М.В., Солонець О.І., Солопій І.А. Особливості акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2016. № 1(22). С. 32-35.

13. Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Kartashov V. M., Korytsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 9. P. 759-770.

14. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Proceedings 31 January 2019. P. 392-396.

15. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Sheiko S. A., Babkin S. I., Korytsev I. V., Zubkov O. V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 9, 2019. P. 771-781.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 21.09.2019