

Акустичні прилади та системи

УДК 534

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483)

Дальность обнаружения малых воздушных объектов наземной системой шумопеленгования

Кабушка Я. В., ORCID [0000-0002-9844-9804](https://orcid.org/0000-0002-9844-9804)e-mail ykabushka@gmail.comЗотько А. С., ORCID [0000-0001-8319-0775](https://orcid.org/0000-0001-8319-0775)e-mail dj.lumia.kiev@gmail.comКоржик А. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)e-mail av.korzhyk@aae.kpi.uaКандрачук И. В., к.т.н., доц., ORCID [0000-0001-9671-5366](https://orcid.org/0000-0001-9671-5366)e-mail iv.kandrathuk@aae.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—В работе рассмотрена задача обнаружения малых воздушных объектов наземной системой шумопеленгования с сопутствующим определением дальности обнаружения в условиях приближенной к реальной помехо-сигнальной ситуации. В качестве приемной системы выбрана группа приемников, реализующих $p\nu$ -зонд и выполнена в виде линейной дискретной эквидистантной акустической антенны. Малый воздушный объект представляет собой БПЛА с винтово-кольцевым движителем в толкающей компоновке. К проведению расчетов привлечены данные по потерям на расширение фронта акустических волн, данные по пространственному затуханию, по влиянию климатических факторов и зеленых насаждений, а также особенностей “с – профиля” и рельефа местности.

Библ.14, рис.2, табл.1

Ключевые слова – шумопеленгование; дальность обнаружения; воздушный объект; энергетическая дальность; геометрическая дальность

I. ВВЕДЕНИЕ

Возникновение в настоящее время значительного интереса к вопросам использования акустических средств для обнаружения, пеленгования и определения элементов движения малых воздушных объектов, обусловило развитие направлений создания мобильных шумопеленгаторных устройств, реализующих традиционные для гидроакустики принципы обнаружения источников специфического шума. К таким объектам могут быть отнесены беспилотные летающие аппараты различного назначения [1], - геликоптерного (“ротор”) либо самолетного типа (“крыло”). Изначально, подлежит решению вопрос о, собственно, обнаружении подвижного воздушного объекта в условиях воздействия на приемную систему устройства обнаружения окружающего шумового фона в соответствии с «ДБН В.1.1.31. Защита территорий, домов и сооружений от шума» и шумового поля носителя [2] с одновременным определением дальности обнаружения.

Решение такой задачи должно опираться на точные сведения об акустическом поле источника специфического шума и о режимах движения объекта. К сожалению, сведения о шумовых характеристиках воздушных объектов крайне ограничены [3], [4], а имеющиеся в широком доступе источники информации, в основном, ориентированы на рекламную сторону этого вопроса.

В связи с этим предлагаемый материал представляется актуальным и своевременным, а решение задачи обнаружения указанных объектов с сопутствующим определением прогнозированной дальности действия шумопеленгатора в условиях заданной модели паразитной шумовой нагрузки является целью работы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагается осуществлять обнаружение малых воздушных объектов типа “крыло” на высотах и при скоростях движения, которые соответствуют их тех-



ническим характеристикам, в нормальных рефракционных условиях, при выбранных в соответствии с [5] стандартных уровнях шума окружающей среды и использовании носителя типа БТР-80, находящегося на “столе” или маневрирующего на нижних передачах (частота оборотов двигателя – 1000 об/мин). Зададим вероятности обнаружения и ложной тревоги с использованием критериев Неймана – Пирсона – 0.75 и 0.01 соответственно.

Сектор обзора выбирается в соответствии с характеристикой направленности (ХН) приемной системы с возможностью механического сканирования в секторе обзора – “плюс-минус” 90°. Рабочая полоса частот приемной системы формируется, исходя из частотных характеристик шумности и диапазона рабочих скоростей воздушных объектов.

Предлагается определить наклонную “прогнозируемую” дальность, учитывающую “энергетическую” и “геометрическую” дальности. К проведению расчетов должны быть привлечены данные по потерям на расширение фронта акустических волн, данные по пространственному затуханию, по влиянию климатических факторов и зеленых насаждений, а также особенностей “с – профиля” и особенностей рельефа местности – в виде “инженерных сооружений”.

Расчет прогнозируемой дальности обнаружения шумящего объекта, с учетом представлений и подходов [6], [7] проведем, опираясь на акустические свойства шумящего объекта и помеховую ситуацию в районе применения средства обнаружения. Формально, мы имеем дело с несколькими разновидностями дальности:

- “энергетической” (определяется пространственно-энергетическими свойствами приемного устройства и уровнем шума источника);
- “геометрической” (определяется с учетом влияния рефракции звуковых лучей);
- “прогнозированной” (сочетает результаты определения энергетической и геометрической дальности).

При этом расчет энергетической дальности подчиняется следующему основному условию: на некотором предельном расстоянии от объекта r_0 интенсивность или давление шума, создаваемые им в точке приема являются минимально обеспечивающими выделение полезного шумоподобного сигнала на фоне акустических помех, окружающих приемное устройство.

III. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

Пусть приемная система удовлетворяет условию оптимальности – т.е. имеет приемную полосу частот, которая равна полосе частот некоторого акустического квази-детерминированного события. Такая ситуация с энергетической точки зрения характеризуется параметром обнаружения q_0^2 , который определяется отношением

$$q_0^2 = \frac{E_c}{E_n}, \quad (1)$$

где E_c – энергия шумоподобного события (являющегося полезным сигналом); E_n – энергия помехи.

С другой стороны, параметр обнаружения может быть найден с помощью характеристик обнаружения [7] для определенного сочетания составляющих вероятностных ситуаций, отвечающей критериям Неймана – Пирсона (минимизация вероятности ложной тревоги F при заданном значении вероятности правильного обнаружения P).

Для совокупности случайных амплитуд и фаз, определяющих шумоподобное событие, обозначая вероятность ложной тревоги как $F = 0.01$ и получая в соответствии с [7] вероятность правильного обнаружения как $P = 0.75$, найдем значение параметра обнаружения. Оно фактически определяет отношение сигнал/помеха (1) и составляет величину: $q_0^2 \approx 16$.

Таким образом, интенсивность звука, создаваемая источником в точке приема, должна не менее чем в 16 раз превышать интенсивность шумов. Проведем расчет дальности.

A. Расчет шумового поля, создаваемого объектом обнаружения в точке приема

Опираясь на результаты экспериментальных исследований “источников шумности БПЛА с винтово-кольцевым двигателем в толкающей компоновке” [4], в качестве исходных данных по определению уровня шума воздушного объекта и выбора рабочего частотного диапазона приемной системы, используем спектральные характеристики акустического излучения источника в третьоктавных полосах частот, приведенные к расстоянию 1 м. При этом наиболее информативным считаем частотный диапазон $\Delta f_p \approx (350 - 550) \text{ Гц}$ для которого уровни звукового давления (УЗД) $L_{\Delta f 1/3}$, дБ в 1/3 октавных полосах в окрестностях средних частот – соответствуют следующим значениям:

$$f_{cp} \approx 350 \text{ Гц} - L_{\Delta f 1/3} = 108 \text{ дБ};$$

$$\text{Для } f_{cp} \approx 450 \text{ Гц} - L_{\Delta f 1/3} = 108 \text{ дБ}; \quad (2)$$

$$f_{cp} \approx 550 \text{ Гц} - L_{\Delta f 1/3} = 109 \text{ дБ}.$$

УЗД (2) определяются относительно порогового значения давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ как:

$$L_{\Delta f 1/3}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{p_{\Delta f 1/3}}{p_0} \right) \Rightarrow \quad (3)$$

$$p_{\Delta f 1/3} = p_0 \cdot 10^{0.05 L_{\Delta f 1/3}}$$

Используя (3), определим значения звукового давления в 1/3 октавных полосах, соответствующих уровням (2) – $p_{\Delta f 1/3}$:



$$\begin{aligned} f_{cp} &\approx 350 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3}} = 5,02 \text{ Па}; \\ \text{Для } f_{cp} &\approx 450 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3}} = 5,02 \text{ Па}; \\ f_{cp} &\approx 550 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3}} = 5,6 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (4)$$

Определим спектральные характеристики шумов объекта в полосе 1 Гц (спектральную плотность амплитуд давления), путем деления $p_{\Delta f_{1/3}}$ на $\sqrt{\Delta f_{1/3}}$, где $\Delta f_{1/3} = \Delta f_{1/3abc}$ (абсолютное значение ширины соответствующей 1/3 октавной полосы):

$$N_{pц} = \frac{p_{\Delta f_{1/3}}}{\sqrt{\Delta f_{1/3}}}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (5)$$

Для принятых 1/3 октавных полос, в совокупности определяющих рабочий диапазон частот, имеем:

$$\begin{aligned} \Delta f_{1/30} &= (315 - 400) \Big|_{\Delta f_{1/3abc} = 85 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{pц} &= 0.54 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}; \\ \Delta f_{1/30} &= (400 - 500) \Big|_{\Delta f_{1/3abc} = 100 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{pц} &= 0.502 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}; \\ \Delta f_{1/30} &= (500 - 630) \Big|_{\Delta f_{1/3abc} = 130 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{pц} &= 0.44 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Спектральная плотность давления, выраженная в дБ ($N_{pц}$, дБ) с использованием опорного значения

$n_{p0} = 1 \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}}$, определится соотношением:

$$N_{pц}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{N_{pц}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}}{n_{p0}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}} \right), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{1/30} &= (315 - 400) \text{ Гц}, N_{pц} = -5.35 \text{ дБ}; \\ \text{Для } \Delta f_{1/30} &= (400 - 500) \text{ Гц}, N_{pц} = -5.98 \text{ дБ}; \\ \Delta f_{1/30} &= (500 - 630) \text{ Гц}, N_{pц} = -7.13 \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (8)$$

Учтем пространственное затухание звуковых волн при распространении в воздухе α , дБ/100 м, используя данные [6], $\alpha = 0.21$ дБ/100 м.

Результаты определения спектральной плотности давления шума объекта (в дБ) с учетом пространственного затухания ($N_{pц\alpha}$) и вычислений по формулам (3),(5),(7) сведены в табл. 1.

Полученные уровни характеризуют шумовое поле объекта обнаружения в точке наблюдения, которая отнесена от него на 1000 – 1200 м.

В. Расчет поля помех в точке наблюдения.

Полагаем, что в точке наблюдения в нормальных рефракционных условиях поле помех формируется, в основном, окружающими шумами, шумами носителя и ветровыми эффектами. При этом:

- поле окружающих шумов определяется как изотропное со стандартными уровнями шумов окружающей среды;
- анизотропное поле шумов носителя определяется при использовании в качестве носителя - колесной машины БТР-80, двигатель которой работает на холостых оборотах (или маневрирует на нижних передачах);
- влияние ветровых шумов учитывается путем введения определенных поправочных коэффициентов, учитывающих турбулентность в соответствии с [6].

Изотропное поле окружающего шума

УЗД окружающего шума, традиционно определяют в октавных полосах, что требует приведения их к стандартным условиям – к спектральной плотности. Шумовые нагрузки при этом выбираем соответствующим категориям “Территории, непосредственно прилегающие к зданиям (жилым), домам отдыха, домам-интернатам для престарелых и инвалидов”.

Для октавных полос со средними частотами $f_{cp} \approx 250 \text{ Гц}$ и $f_{cp} \approx 500 \text{ Гц}$ в соответствии с [7], УЗД в октавных полосах составляют $L_{\Delta f_{окт}} = 49 \text{ дБ}$ и $L_{\Delta f_{окт}} = 44 \text{ дБ}$ соответственно. УЗД, $L_{\Delta f_{окт}}$, дБ и могут быть переведены в Па относительно порогового значения давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, используя известное соотношение:

$$\begin{aligned} L_{\Delta f_{окт}}, \text{ дБ} &= 20 \lg \left(\frac{p_{\Delta f_{окт}}}{p_0} \right) \Rightarrow \\ p_{\Delta f_{окт}} &= p_0 \cdot 10^{0.05 L_{\Delta f_{окт}}}. \end{aligned} \quad (9)$$

ТАБЛИЦА 1. СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТИ ДАВЛЕНИЯ ШУМА (дБ) С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАТУХАНИЯ ($N_{pц\alpha}$)

В ДИАПАЗОНЕ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

r, м	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$N_{pц\alpha}$, дБ	-6,71	-6,92	-7,13	-7,34	-7,55	-7,76	-7,97	-8,18	-8,30	-8,60	-8,81	-9,02

При этом получим:



- Для октавной полосы со средней частотой $f_{cp} \approx 250 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{окт}} = 0.0056 \text{ Па}$;
- Для октавной полосы со средней частотой $f_{cp} \approx 500 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{окт}} = 0.0032 \text{ Па}$.

Определим спектральные характеристики окружающих шумов в полосе 1 Гц (спектральная плотность давления, $N_{рош}$, $\text{Па} / \sqrt{\text{Гц}}$) путем деления $p_{\Delta f_{окт}}$ на $\sqrt{\Delta f_{окт}}$, где $\Delta f_{окт} = \Delta f_{окт} \text{ абс}$ - абсолютное значение ширины соответствующей октавной полосы:

$$N_{рош} = \frac{p_{\Delta f_{окт}}}{\sqrt{\Delta f_{окт}}}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (10)$$

Для принятых октавных полос, в совокупности определяющих рабочий диапазон частот, имеем:

$$\Delta f_{окт} = (180 - 355) |_{\Delta f_{окт} \text{ абс} = 175 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{рош} = 0.00042 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}};$$

$$\Delta f_{окт} = (355 - 710) |_{\Delta f_{окт} \text{ абс} = 355 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{рош} = 0.00017 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}. \quad (11)$$

Спектральная плотность давления, выраженная в дБ ($N_{рош}$, дБ) с использованием опорного значения $n_{p0} = 1 \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}}$, определится соотношением:

$$N_{рош}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{N_{рош}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}}{n_{p0}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}} \right). \quad (12)$$

И для

$$\Delta f_{окт} = (180 - 355) |_{\Delta f_{окт} \text{ абс} = 175 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{рош} = -67.37 \text{ дБ}; \quad (13)$$

$$\Delta f_{окт} = (355 - 710) |_{\Delta f_{окт} \text{ абс} = 355 \text{ Гц}}, \text{ Гц} \Rightarrow \\ \Rightarrow N_{рош} = -75.39 \text{ дБ}.$$

C. Анизотропное поле шумов носителя

Данные по шумам носителя заимствуем из работы [2]. Измерения проводились стандартным шумомером "Шум 1М30" (показания которого представляются в дБ по шкале A (дБА)) при окружающей температуре 20°C , относительной влажности 50 %, скорости ветра 2-3 м/с. При этом уровень шума носителя БТР-80 на носовых курсовых углах составил величину $L_{бтр} \approx 64 \text{ дБА}$. Корректирующие добавки, обеспечивающие приведение субъективных уровней к истинным, взяты из [8]–[10].

Переход от дБА к значениям давления $p_{Абтр}$ проводим по формуле:

$$L_{бтр}, \text{ дБА} = 20 \lg \left(\frac{p_{Абтр}}{p_0} \right), \quad (14)$$

$$p_{Абтр}, \text{ Па} = p_0 \cdot 10^{0.05 \cdot L_{бтр}, \text{ дБА}}.$$

в соответствии с которой $p_{Абтр} = 0.032 \text{ Па}$ при выбранном $L_{бтр} \approx 64 \text{ дБА}$.

Полученная величина давления $p_{Абтр}$ определена в полосе шумомера $\Delta f_{ш} = (31.5 - 8000) \text{ Гц}$. Приведем давление $p_{Абтр} = 0.032 \text{ Па}$ к спектральной плотности давления БТР:

$$N_{p_{Абтр}} = \frac{p_{Абтр}}{\sqrt{\Delta f_{ш}}} = \frac{0.032}{\sqrt{7968.5}} = 3.6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (15)$$

- по шкале A .

Учтем частотную коррекцию по шкале A , используя поправку на частоте 500 Гц $\Delta L_{A 500 \text{ Гц}} \approx -3.2 \text{ дБ}$ - т.е. перейдем к истинным значениям давления (от $p_{Абтр}$ к $p_{бтр}$) путем увеличения $N_{p_{Абтр}}$ в 1.44

$$\text{раза: } N_{p_{бтр}} |_{\Delta L, 500 \text{ Гц}} = 1.44 \cdot N_{p_{Абтр}} = 5.2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

(16)

Поправка на частоте 400 Гц составит $\Delta L_{A 400 \text{ Гц}} \approx -6 \text{ дБ}$, а спектральная плотность давления с учетом корректировки составит

$$N_{p_{бтр}} |_{\Delta L, 400 \text{ Гц}} = 6.0 \cdot N_{p_{Абтр}} = 7.2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (17)$$

Далее, используя (16), (17), переводим $N_{p_{бтр}} |_{\Delta L, 400 \text{ Гц}}$, $N_{p_{бтр}} |_{\Delta L, 500 \text{ Гц}}$ в логарифмические единицы:

$$N_{p_{бтр}} |_{400 \text{ Гц}}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{N_{p_{бтр}} |_{400 \text{ Гц}}}{n_{p0}} \right) = -62.3 \text{ дБ};$$

$$N_{p_{бтр}} |_{500 \text{ Гц}}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{N_{p_{бтр}} |_{500 \text{ Гц}}}{n_{p0}} \right) = -65.7 \text{ дБ}. \quad (18)$$

D. Определение помехоустойчивости приемной системы

Особенностью определения помехоустойчивости приемной системы (в дальнейшем акустическая антенна (АА)), является то, что по отношению к помехам различного типа, помехоустойчивость одной и той же АА определяется по-разному. Как известно [7], [8], если поле помех можно считать диффузным однородным и изотропным, то по отношению к полностью окружающим шумов помехоустойчивость $\delta = \delta_{ош}$ можно сопоставить с коэффициентом осевой концентрации (КОК) $\Omega = \Omega_0$ АА.

Поэтому, по отношению к полю окружающих шумов



$$\delta_{ош} = \Omega_0.$$

Таким образом, для различных АА возникает своя расчетная ситуация по помехам различного типа.

Помехоустойчивость линейной дискретной АА на основе приемного рv - зонда в условиях помех различной природы.

- помехоустойчивость по отношению к окружающим шумам

В качестве АА предлагается приемная система на основе приемников давления и колебательной скорости, называемых рv - зондами. Направленные свойства рv зонда определяются соотношениями:

- для характеристики направленности

$$R(\vartheta) = \left| \frac{1 + \cos(\vartheta)}{2} \right|; \quad (19)$$

- для КОК

$$\Omega = \frac{2}{\int_0^\pi R^2(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta}. \quad (20)$$

Для приемной линейной системы, состоящей из М рv-зондов с ХН вида (19), расположенных с шагом d_1 , пространственные свойства описываются следующей функцией направленности:

$$R(\theta) = R_3(\theta) \cdot \frac{\left| \sin \left(M \frac{\pi d_1}{\lambda} \sin \theta \right) \right|}{\left| M \sin \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \sin \theta \right) \right|}, \quad (21)$$

где $M = 11$ – число зондов, $d_1 = 0.2$ м - расстояние между их фазовыми центрами.

Расчетная помехоустойчивость для $M = 11$ зондов и $d_1 = 0.2$ м по отношению к окружающим шумам для $\delta_{ош} = \Omega_0$ составит:

$$f = 400 \Gamma\text{ц}, \Omega_0 \Big|_{400 \Gamma\text{ц}} = 71.77;$$

$$\text{Для частоты } f = 450 \Gamma\text{ц}, \Omega_0 \Big|_{450 \Gamma\text{ц}} = 91.82; \quad (22)$$

$$f = 500 \Gamma\text{ц}, \Omega_0 \Big|_{500 \Gamma\text{ц}} = 110.2.$$

- помехоустойчивость по отношению к шумам носителя

Исходя из анизотропии шумов носителя, а также учитывая однонаправленность зонда и линейной системы зондов, примем, что самый неблагоприятный сектор воздействия шумов носителя на АА приходится на кормовые курсовые углы. При этом анизотропия проявляется как результат воздействия локального шумового источника в кормовом секторе курсовых углов $\pm 45^\circ$ относительно диаметральной плоскости БТР.

По материалам работы [7] для кормового ракурса локализованных помех (помех носителя) помехоустойчивость может быть найдена как:

$$\delta_{бтр} = \Omega_{бтр} = 1/R^2(\vartheta), \quad (23)$$

где $R(\vartheta)$ определится соотношением (21) (понимая, что размеры линейной АА больше λ).

Кроме того для выбранного сектора помехи значения $R(\vartheta)$ следует брать именно с направлений кормового сектора курсовых углов $\vartheta_n = \pm 45^\circ$ относительно диаметральной плоскости БТР ($R(\vartheta_n)$). При этом, мерой оценки $\delta_{бтр}$ будет выражение:

$$\delta_{бтр} = \Omega_{бтр} = 1/R^2(\vartheta_n) = 1/\langle \beta_n^2 \rangle, \quad (24)$$

$$\beta_n = R(\vartheta_n)$$

где статистическое усреднение производится по области помехи ($\vartheta_n = \pm 45^\circ$).

Тогда по 10 значениям $R(\vartheta_n)$ с каждого борта для усредненной в секторе $\vartheta_n = \pm 45^\circ$ ХН получим:

$$\langle \beta_n^2 \rangle = 1.1 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \delta_{бтр} = \Omega_{бтр} \approx 899. \quad (25)$$

Полученную (25) помехоустойчивость $\delta_{бтр} = \Omega_{бтр}$ полагаем равномерной в рабочей полосе частот.

- помехоустойчивость АА по отношению к шумам объекта

Исходя из пространственных свойств АА в направлении носовых курсовых углов носителя и положений предыдущего пункта для направления компенсации АА $\vartheta_0 = 0^\circ$ в пределах углов $\vartheta_u = \pm 10^\circ$ области главного максимума ХН АА, помехоустойчивость составит наименьшую величину

$$\langle \beta_n^2 \rangle = 0.74 \Rightarrow \delta_{шц} = \Omega_{шц} \approx 1.35, \quad (26)$$

что и понятно, т.к. направление $\vartheta_0 = 0^\circ$ и его окрестности соответствуют главному максимуму ХН.

Е. Приведение помехо-сигнальной ситуации ко входу АА

В результате приведения давления окружающих шумов, давления шумов носителя и давления шумов объекта ко входу линейной дискретной АА :

- приведенное давление окружающих шумов:

$$P_{ошпр} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}.$$

- приведенное давление ходовой помехи $P_{шБТРпр}$:

$$P_{шБТРпр} = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ Па}.$$

- приведенное давление, создаваемое объектом на расстоянии 1000 м с учетом пространственного затухания :

$$P_{шОбпр} = 3.28 \text{ Па}.$$



F. Оценка результирующей помехо-сигнальной ситуации

По результатам расчетов, поле помехи в точке приема определяется суммой квадратов составляющих полей вида :

$$P_{\Sigma n} = \sqrt{P_{\text{оупр}}^2 + P_{\text{иБТРнр}}^2} = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (27)$$

Соответственно, поле, создаваемое объектом в точке приема при расчетных условиях с учетом потерь на пространственное затухание и потерь на расширение фронта сферической волны характеризуется давлением:

$$P_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{иОбнр}}}{1000} = \frac{3.28}{1000} = 3.28 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (28)$$

Таким образом, по результатам (27), (28), при расчетных условиях давление полезного сигнала приблизительно в 7 раз превышает давление помех в точке приема, что удовлетворяет исходным вероятностным условиям. Таким образом энергетическая дальность обнаружения 1000 м является достижимой.

G. Учет наличия зеленых насаждений

При работе в полевых условиях может сложиться ситуация влияния на результаты работы зеленых насаждений различных видов. В соответствии с [6], [10] влияние лесного массива на формируемое поле объекта (как дополнительного фактора, вносящего затухание), может быть учтено соотношением: $\alpha_{\text{лес}} \approx 0.01 \cdot a^{1/3} \text{ дБ/м}$ (лес средней плотности), либо корректирующим значением уменьшения уровня давления для густого леса — как $-25 \text{ дБ на } 100 \text{ м}$.

Таким образом, для лесопосадки шириной 100 м средней плотности, получим:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{лес}} &\approx 0.01 \cdot a^{1/3} \text{ дБ/м} \approx \\ &\approx 0.01 \cdot (450)^{1/3} \Big|_{100 \text{ м}} \Rightarrow , \quad (29) \\ &\Rightarrow \Delta L_{\text{лес}} \approx -7.6 \text{ дБ} \end{aligned}$$

$$P_{\text{цлес}} = \frac{P_{\text{ц}}}{2.2} \approx 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (30)$$

Отношение давлений объекта $P_{\text{ц}}$ и помехи $P_{\Sigma n}$ в этом случае составит ≈ 4 , что соответствует исходным вероятностным условиям и дальность 1000 м при этом остается еще достижимой.

IV. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ И ПРОГНОЗИРУЕМАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

В благоприятных рефракционных условиях, отвечающих ситуации отрицательной рефракции (рис. 1), геометрическая дальность D_z представляет собой горизонтальное расстояние от источника до места встречи луча, выпущенного под углом 0° из источника, до встречи с приемником, который находится на земле. При этом

$$D_z = \sqrt{2 \frac{c_0}{\Delta c / \Delta h} \cdot h}, \quad (31)$$

где c_0 - скорость звука на уровне источника; $\Delta c / \Delta h$ - градиент скорости звука.

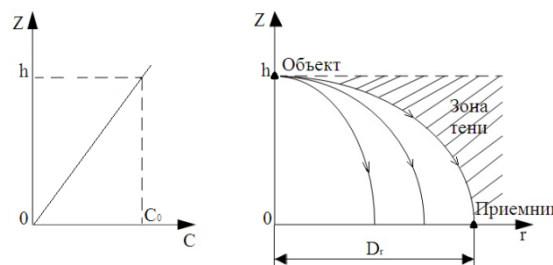


Рис.1. К определению геометрической дальности

Для высоты источника $h = 400 \text{ м}$ и $\Delta c / \Delta h = 0.03$, $D_z \approx 6000 \text{ м}$, что обеспечивает энергетическую (в нашем случае – наклонную) дальность. Таким образом, прогнозируемая дальность для заданных исходных условий – не хуже расчетной энергетической.

Учет наличия искусственных наземных объектов

Снижение УЗД зависит также от наличия искусственных объектов – препятствий. Такая зависимость определяется:

- взаимным расположением объекта, приемника и препятствия;
- частотой;
- геометрическими размерами препятствия.

В соответствии со стандартами, снижение УЗД определяется соотношением:

$$\Delta L_i = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{0,037 f \delta_i}}{\text{th} \sqrt{0,037 f \delta_i}} \right) + 5, \quad (32)$$

где f - частота звука, Гц; $\delta_i = a_i + b_i - d$, м (рис. 2), где $(a_i + b_i)$ - длина самого короткого пути от источника до точки приема, который проходит через i -тую кромку препятствия, м; d - самое короткое расстояние между источником и приемником при отсутствии препятствия, м.

Величину результирующего снижения УЗД ΔL , дБ, при использовании тонких экранов – препятствий в точке приема, определим по формуле:

$$\Delta L = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{-0,1 \Delta L_i} \right) \quad (33)$$

где N – количество кромок препятствия.



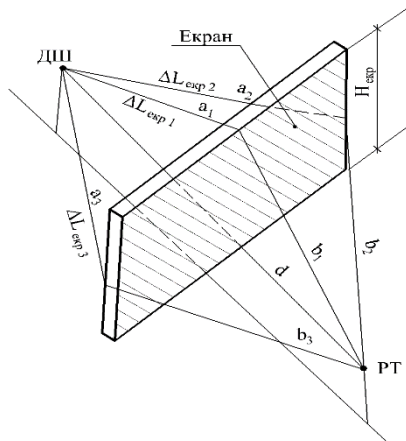


Рис.2. Схема учета искусственных объектов – препятствий при оценке изменений УЗД. ДШ – источник шума (геометрический центр); РТ – расчетная точка; $H_{\text{эксп}}$ – препятствие ($\delta_1 = a_1 + b_1 - d$; $\delta_2 = a_2 + b_2 - d$; $\delta_3 = a_3 + b_3 - d$)

Как видно из соотношений (32), (33) и рис. 2, даже при нахождении источника и приемника на одной визирной линии, снижение УЗД составит величину не менее 5 дБ. При размещении приемника в зоне тени от препятствия, снижение УЗД будет более 5 дБ, что приводит к необходимости работы в поле прямой видимости.

А. Учет турбулентности

Статистические результаты [6] показывают, что локальные турбулизированные области поля в точках размещения приемников АА дают изменение УЗД приблизительно на (2-3) дБ. Влияние такого рода весьма незначительно и может быть устранено путем использования конструктивных пористых или нитяных микрофонных насадок.

Выводы

В результате расчета дальности обнаружения малых воздушных объектов установлено:

В предложенной вероятностной ситуации для вероятности правильного обнаружения 0.75 и вероятности ложной тревоги 0.01, в выбранной полосе частот при работе в нормальных рефракционных условиях по объекту, шумы которого определены в соответствии с [4], при использовании носителя вида БТР-80 (частота оборотов двигателя 1000 об/мин) с учетом обстоятельств, соответствующих стандартным уровням шума окружающей среды

Надійшла до редакції 17 травня 2018 р.

и рассмотренной АА на основе pv -зондов, дальность 1000 м является достижимой.

Заявленная дальность может корректироваться за счет учета наличия зеленых насаждений и инженерных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. K. Baydauletova, D. Z. Bastaubaeva, and M. Aukenova, "Primenenie bespilotnykh letayuschih apparatov [The use of unmanned aerial vehicles]," *Kaz. Natsionalnyiy Univ.*, pp. 98–101, 2014, **URL:** <http://pps.kaznu.kz/kz/Main/FileShow2/11472/94/124/7693/БастаубаеваДженискульЖумахановна/2015/2>.
- [2] I. Y. Biryukov, M. Y. Busyak, and O. B. Anipko, "Zvukovyye portrety ob'ektov bronetehniki dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya tseley [Sound portraits of armored vehicles for detection and recognition of targets]," *Integrovani Tehnol. ta energozberezhennya.*, vol. 3, pp. 31–36, 2011, **URL:** <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2108>.
- [3] O. V. Soloviev, "Eksperimentalni doslidzhennya rivnya shumu BPLA "STRELA-M" [Experimental studies of noise levels of UAV 'STREPET-M,'" *Zb. Nauk. Pr. HUPS*, vol. 2(24), pp. 36–39, 2010, **URL:** http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2010_2_10.
- [4] S. P. Ostroukhov, P. A. Moshkov, and V. F. Samokhin, "Eksperimentalnoe issledovanie istochnikov shumnosti bespilotnogo letatel'nogo apparata s vinto-koltsevim dvizhitelem v tolkayushey komponovke [Experimental study of noise sources of an unmanned aerial vehicle with a screw-ring propulsor in a pushing arra," *El.Zhurnal "Trudy MAI,"* vol. 70, pp. 1–24, 2013, **URL:** <http://trudymai.ru/upload/iblock/81d/81d77168791775d9fa57060f4d4612d5.pdf>.
- [5] Y. Y. Dobrovolskiy and M. D. Smaryishev, *Gidroakusticheskie anteny. Spravochnik po raschetu napravleniy svoystv gidroakusticheskikh anten [Hydroacoustic antennas. Handbook for the calculation of directional properties of hydroacoustic antennas]*. Leningrad: Sudostroenie, 1984.
- [6] H. A. Myullera and M. Hekla, *Spravochnik po tehnicheckoy akustike [Handbook of Technical Acoustics]*. Leningrad: Sudostroenie, 1980, **URL:** http://artlib.osu.ru/web/books/content_all/3374.pdf.
- [7] B. I. Shotskiy, *Metodicheskie ukazaniya k kursovomu proektirovaniyu po distsipline "Gidroakusticheskie ustroystva" Chast 1 [Methodical instructions to the course design on the discipline "Hydroacoustic devices". Part 1]*. KPI, 1986.
- [8] Jens Trampe Broch, *Primenenie izmeritelnykh sistem firmy "Bryul i K'er" dlya izmereniy akusticheskogo shuma [Application of measuring systems Brüel & Kjaer measurement of acoustic noise]*. Kopenhagen: Larsen i syin, 1971.
- [9] V. S. Didkovskiy, *Osnovi akustichnoyi ekologiyi: Navchalnyi posibnik [Fundamentals of Acoustic Ecology: Textbook]*. Kirovograd: PVTs TOV Imeks LTD, 2002, **ISBN:** 9667822133.
- [10] O. V. Korzhyk, O. H. Leiko, and V. S. Didkovskiy, *Shumi i vibratsiyi [Noises and vibrations: Textbook]*. Kyiv: TOV Imeks-LTD, 2010.

УДК 534

Дальність виявлення малих повітряних об'єктів наземною системою шумопеленгування

Кабушка Я. В., ORCID [0000-0002-9844-9804](https://orcid.org/0000-0002-9844-9804)e-mail ykabushka@gmail.comЗотько А. С., ORCID [0000-0001-8319-0775](https://orcid.org/0000-0001-8319-0775)e-mail dj.lumia.kiev@gmail.comКоржик О. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)e-mail av.korzhyk@aae.kpi.uaКандрачук І. В., к.т.н., доц., ORCID [0000-0001-9671-5366](https://orcid.org/0000-0001-9671-5366)e-mail iv.kandrathuk@aae.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—В роботі розглянуто задачу виявлення малих повітряних об'єктів наземною системою шумопеленгування з супутнім визначенням дальності виявлення в умовах наближеною до реальної завадо-сигнальної ситуації. В якості приймальної системи обрана група приймачів, що реалізують pv - зонд і виконана у вигляді лінійної дискретної еквідистантної акустичної антени. Малий повітряний об'єкт представлений "БПЛА з гвинтовими-кільцевих рушієм в штовхає компонованні". До проведення розрахунків залучені дані по втратах на розширення фронту акустичних хвиль, дані по просторовому загасанню, за впливом кліматичних факторів і зелених насаджень, а також особливостей "з - профілю" і рельєфу місцевості. Виникнення в даний час значного інтересу до питань використання акустичних засобів для виявлення, пеленгування та визначення елементів руху малих повітряних об'єктів зумовило розвиток напрямків створення мобільних шумопеленгаторних пристроїв, що реалізують традиційні для гідроакустики принципи виявлення джерел специфічного шуму. До таких об'єктів можуть бути віднесені безпілотні літаючі апарати різного призначення - гелікоптерного ("ротор") або літакового типу ("крило"). Рішення такого завдання має спиратися на точні відомості про акустичне поле джерела специфічного шуму і про режими руху об'єкта. На жаль, відомості про шумові характеристики повітряних об'єктів вкрай обмежені, а наявні в широкому доступі джерела інформації в основному орієнтовані на рекламну сторону цього питання. У зв'язку з цим запропонований матеріал буде актуальним і своєчасним, а рішення задачі виявлення зазначених об'єктів з супутнім визначенням прогнозованої дальності дії шумопеленгаторів в умовах заданої моделі паразитного шумового навантаження і являє собою мету роботи. Пропонується здійснювати виявлення малих повітряних об'єктів типу "крило" на висотах і при швидкостях руху, які відповідають їх технічним характеристикам в нормальних рефракціях. Імовірність помилкової тривоги з використанням критеріїв Неймана - Пірсона повинна складати - не більш 0.01. Сектор огляду вибирається відповідно до характеристики спрямованості приймальної системи з можливістю механічного сканування в секторі огляду. Робоча смуга частот приймальної системи формується, виходячи з частотних характеристик шумності і діапазону робочих швидкостей повітряних об'єктів. Пропонується визначити похилу "прогнозовану" дальність, що враховує "енергетичну" і "геометричну" дальності. До проведення розрахунків повинні бути залучені дані по втратах на розширення фронту акустичних хвиль, дані по просторовому загасанню, вплив кліматичних факторів і зелених насаджень, а також особливості "з - профілю" та особливості рельєфу місцевості - у вигляді "інженерних споруд".

Бібл. 14, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова — шумопеленгування; дальність виявлення; повітряний об'єкт; енергетична дальність; геометрична дальність

UDC 534

Range of Detection of Small Air Objects by the Grounding Noise Receivers System



Ya. V. Kabushka, ORCID [0000-0002-9844-9804](https://orcid.org/0000-0002-9844-9804)

e-mail ykabushka@gmail.com

A. S. Zotko, ORCID [0000-0001-8319-0775](https://orcid.org/0000-0001-8319-0775)

e-mail dj.lumia.kiev@gmail.com

A. V. Korzhyk, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)

e-mail av.korzhyk@aae.kpi.ua

I. V. Kandrachuk, PhD (Eng.) Assis.Prof., ORCID [0000-0001-9671-5366](https://orcid.org/0000-0001-9671-5366)

e-mail iv.kandrathuk@aae.kpi.ua

National technical university of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute» kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper considers the problem of detecting small air objects by a ground-based noise-tracking system with the concomitant definition of the detection range in conditions to the real noise-signal situation. As the receiving system, a group of receivers is chosen as well as pv -devices, which is designed as a linear discrete equidistant acoustic antenna. A small air object is represented by a "Drone with a screw-ring propulsor in a push arrangement".

For calculations was attracted the data about the loss to the expansion of the of acoustic waves front, data on spatial attenuation, on the influence of climatic factors and green plantations, as well as on the features of the "c- profile" and the terrain.

The emergence of a significant interest in the use of acoustic means for detecting, positioning and detecting elements of small airspace movement has led to the development of directions for the creation of mobile noise reduction devices that implement the principles of detecting sources of specific noise for conventional hydroacoustics. Such objects can include unmanned flying vehicles of various purposes - helicopter ("rotor") or airplane type ("wing"). The solution to this problem should be based on accurate information about the acoustic field of the source of specific noise and on the modes of motion of the object. Unfortunately, the information about the noise characteristics of airspace is extremely limited, but the widely available sources of information are mainly focused not on the advertising side of this issue. In this regard, the proposed material will be timely and timely, and the solution to the problem of detecting these objects with the associated definition of the predicted range of noise detectors in the conditions of a given model of spatial noise load - represents the purpose of the work. It is proposed to identify small wing objects of airborne objects at altitudes and at speeds that correspond to their technical characteristics in normal refraction. The probability of false alarms using the Neumann-Pearson criteria should be no more than 0.01. Survey Sector - selected according to the directional characteristics of the receiving system with the possibility of mechanical scanning in the sector. The operating frequency band of the receiving system is formed, based on the frequency characteristics of noise and the range of working speeds of airspace. It is proposed to determine the sloping "predicted" range taking into account the "energy" and "geometric" range. Before calculations, losses data on the expansion of the front of the acoustic waves, the data on the spatial decay, the influence of climatic factors and green plantations, as well as features of the "profile" and features of the terrain, in the form of "engineering structures" should be drawn.

Ref. 14, fig. 2, tabl. 1.

Keywords - noise control; detection range; air object; energy range; geometric range

