

## ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НАЗЕМНЫХ И МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

*В.И. ЛУЦЕНКО, И.В. ЛУЦЕНКО, А.В. МАЗУРЕНКО, А.В. СОБОЛЯК*

Приведены результаты экспериментального исследования уровня шума, диаграммы и спектра излучения наземных (транспортные средства, люди) и аэродинамических (квадрокоптер, самолетный БПЛА) объектов. Рассмотрено влияние на уровни и спектры излучения дальности и азимута наблюдения.

*Ключевые слова:* дальность действия, акустическая разведка, аэродинамические объекты, собственное излучение.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больший интерес проявляется к активно-пассивным средствам радио [1 – 4] и акустической разведки [5 – 9]. Это связано с тем, что активно-пассивные системы используют существующие электромагнитные поля для подсветки объектов и приема, отраженных от них полей для их обнаружения и идентификации. Пассивные системы используют собственные тепловое или акустическое излучения объектов для их выявления. Поэтому в отличие от активных систем радио-, звуко- и гидролокации активно-пассивные и пассивные системы себя не демаскируют и поэтому обладают существенно большей живучестью. В работах [10-12] предложена методика оценки дальности действия систем акустической разведки, учитывающая влияние метеорологических факторов атмосферы и состояния подстилающей поверхности. В качестве исходных при расчетах использовались литературные данные об уровнях шумов объектов и их спектральных характеристиках. В настоящей работе приведены полученные экспериментально пространственно временные характеристики акустического излучения объектов наземной техники и малоразмерных БПЛА, данные о которых до настоящего времени отсутствовали в литературе.

Целью работы является экспериментальное изучение характеристик акустических полей (уровней, диаграмм и спектров излучения), некоторых типов наземной колесной техники, а также малоразмерных летательных аппаратов, которые необходимы для оценки дальностей их обнаружения и разработки алгоритмов селекции и распознавания.

### 1 АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерение уровня шума осуществлялось с использованием стандартного шумомера типа JTS-1357, внешний вид которого показан на рис. 1, а технические характеристики приведены в табл. 1.

Для изучения спектральных характеристик излучаемых сигналов осуществлялась их запись на цифровой диктофон типа Olympus VN-480 PC, внешний вид которого показан на рис. 1 б, а характеристики, приведены в табл. 2.

Измерения шума осуществлялись как для неподвижных наземных объектов, так и движущихся при различных углах расположения приемной аппаратуры относительно источника шума.



Рис. 1. Внешний вид шумомера (а) и диктофона (б)

Таблица 1  
Технические характеристики шумомера JTS-1357

Измеряемый параметр	Величина
Разрешение	0,1 дБ
Точность	$\pm 1,5$ дБ
Частотный диапазон:	31.5Гц...8.5КГц
Диапазон измерений	30...130 дБ
Линейный диапазон	50 дБ

Таблица 2  
Основные технические характеристики цифрового диктофона Olympus VN-480 PC

Измеряемый параметр	Величина
Продолжительность записи	
• HQ (высокое качество)	около 177 минут
• SP (обычное качество)	около 267 минут
• LP (длительное качество)	около 493 минут
Частота дискретизации:	
• Режим HQ	16,0 кГц
• Режим SP	10,6 кГц
• Режим LP	5,75 кГц
Общие частотные характеристики:	
• Режим HQ	300...7200 Гц
• Режим SP	300...4700 Гц
• Режим LP	300...2600 Гц
Подключение к компьютеру	порт USB
Объем памяти	64 МБ
Гнездо наушников	сопротивление – 8 Ом
Гнездо микрофона	сопротивление – 2 кОм

Высота расположения микрофона составляла 1...1,7м относительно поверхности земли. Фиксируемыми параметрами являлась дальность до источника шума и погодные условия во время эксперимента (температура, влажность воздуха, скорость ветра и тип подстилающей поверхности).

## 2 УРОВНИ И СПЕКТРЫ ИЗЛУЧАЕМОГО ОБЪЕКТАМИ ШУМА

Уровни шума различных источников оцениваются в относительных единицах, измеряемых относительно порогового уровня слышимости, который условно принят в 10 – 12 Вт/м<sup>2</sup> на стандартном (от точечного источника), расстоянии, обычно в 1 м. Уровень звука (шума) измеряется в децибелах (дБ). Значения уровней шума некоторых источников, полученные экспериментально, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Уровни шума различных источников

Название/тип двигателя	Уровень шума, дБ	Дальность / высота/ угол, м	Примечание
Форд/дизель	78	1/1,5/0	На снегу, XX
Форд/дизель	80	1/1,5/0	На асфальте, XX
Газель/бензин	65	1/1,5/0	На асфальте, XX
Уаз469	80	1/1,5/180	На асфальте, XX
Уаз452	56	1/1,5/0	На асфальте, XX
Легковой автомобиль бензин (объем 2 л)	70	5/1/270	На асфальте
Volkswagen Passat	66	1/1/180	На снегу, XX
БПЛА – квадрокоптер	87	10/1,7/	10м над приемником
БПЛА – квадрокоптер	81,5	2/1,7	50% мощности
БПЛА – квадрокоптер	87	2/1,7	85% мощности
БПЛА-самолетного типа	92	2/1/	На уровне микрофона в помещении
БПЛА-самолетного типа	84	4/1/	На уровне микрофона в помещении
Шаги	73...76	-/1,5/-	Снег наст
Шаги	54...57	-/1,5/-	Снег целина
Шаги	58...60	-/1,5/-	Бетон
Ветер	57...61		7...8м/с, наветренная сторона
Ветер	83...86	/1,5	7...8м/с, подветренная сторона
Внешний фон	37	1,5	Ветер ≤1м/с

### XX-холостой ход

Измерения проведены при холостых оборотах работы двигателя. При этом фиксировались дальность до источника звука, высота расположения микрофона приемника, азимутальный угол расположения микрофона относительно оси источника шума.

Внешний вид, используемых в экспериментах БПЛА, приведен на рис. 2.

Анализ приведенных данных показывает, что помеха от ветра, являясь широкополосной, имеет достаточно высокий уровень и может значительно снижать дальность разведки объектов техники, особенно малоразмерных. Необходимо применение специальных мер по шумоподавлению.



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид БПЛА: а – самолетного типа X-8, размах крыла 2,12 м, расчетное количество оборотов двигателя 8000 – 11000 об/мин.; б – квадрокоптер, расчетное количество оборотов двигателя 6000 – 10500 об/мин

В качестве примера на рис. 3 приведена запись шума, зависшего на высоте около 10 м от приемника квадрокоптера, и его спектр. Во время эксперимента ветер был около 7...8 м/с. Видно, как при порывах ветра (момент 1 на рис. 3, а) происходит увеличение интенсивности примерно на 10 дБ, и расширение спектра на нижних частотах (1 рис. 3, б) по сравнению с паузами (2 рис. 3, а, спектр на рис. 3, б – кривая 2). Для шума квадрокоптера характерна стационарность с наличием периодичности в спектре, определяемой частотой вращения ротора (примерно 110 Гц – около), что соответствует примерно 7000 об/минуту.

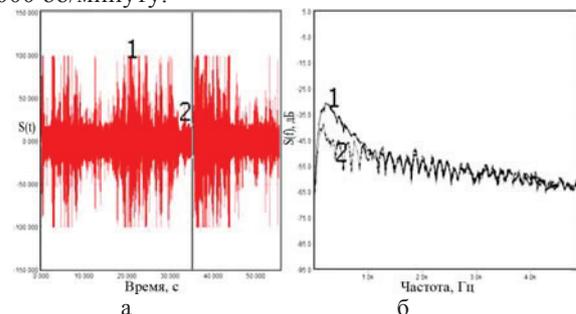


Рис. 3. Временная реализация (а) и спектры шумов квадрокоптера при порыве ветра (1) и его отсутствии (2)

Аналогично выглядят и шумы самолетного БПЛА – рис. 4. В спектре самолетного БПЛА наблюдается также периодичность с частотой примерно 116 Гц, что соответствует примерно 7000 об/мин. Шум при порывах ветра (спектр 3 на рис. 4) может существенно усложнить обнаружение звука БПЛА.

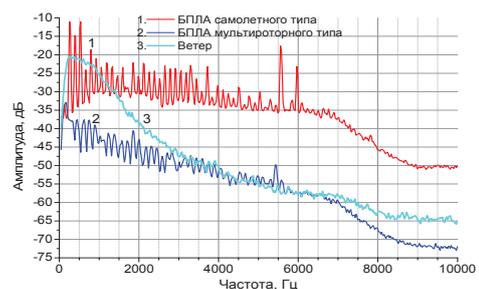


Рис. 4. Спектры шумов: 1 – БПЛА самолетного типа, 2 – БПЛА мультироторного типа (квадрокоптер), 3 – порыва ветра

Влияние количества оборотов двигателя на уровень излучаемого шума иллюстрирует табл. 4.

Таблица 4  
Увеличение уровня шума при изменении оборотов двигателя от холостого хода до максимальных оборотов

Название/тип двигателя	Увеличение шума, дБ	Дальность/высота, угол, м
Форд/дизель	18	50/1,5/00
Форд/дизель	11	1/1,5 / 00
УАЗ 469/бензин	12	1/1,5, бокс
УАЗ 452/бензин	11	1/1,5, бокс
Volkswagen Passat/ бензин	3	1/1/180

Видно, что изменение количества оборотов двигателя от холостого до максимального может приводить к возрастанию уровня шума до 11...18 дБ. Одновременно с этим возрастают частоты максимумов в спектре, пропорционально количеству оборотов двигателя. Форма спектра излучения при этом практически не изменяется – рис. 5.

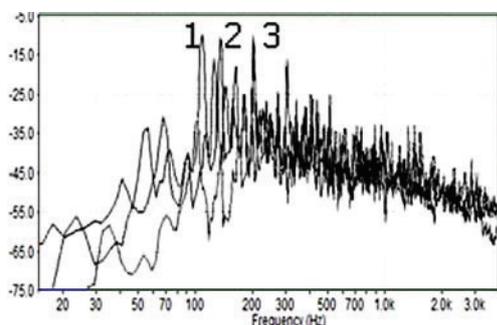


Рис.5. Спектры шумов дизельного двигателя 3ТД при различных оборотах: 1 – 600 об/мин. 2 – 1800 об/мин.; 3 – 2400 об/мин

Диаграмма излучения шума в азимутальной плоскости также неравномерна – табл.5.

Максимальные значения в направлении на источник шума – выхлопную трубу, двигатель спереди, а минимален шум при экранировании источника корпусом. Перепады интенсивности шума при изменении азимута при наблюдении на малых дальностях достигают для автомобиля 10дБ и 16 дБ для БТР-4.

Таблица 5  
Зависимость уровня шума от угла наблюдения источника при холостом ходу двигателя

Название /тип двигателя	Угол относительно автомобиля, град.			
	0	90	180	270
Форд/дизель	81-82	74	71	77-78
Газель/бензин	65	60	51	53
Уаз452	56	54,4	62	56
Уаз469	-	78,8	80	
БТР-4/дизель, 500 л.с., 1000 об/мин	-	70	82	86
Volkswagen Passat	59	59	64	58

Дистанционные зависимости ослабления излучения  $L(R)$  приведены в табл. 6.

На их основе с использованием соотношений:

$$V(R)[dB] = P(R=1m)[dB] - P(R)[dB] \quad (1a)$$

$$V(R)[dB] = L(R)[dB] - 20lg(R)[dB] \quad (16)$$

где  $P(R=1m)[dB]$  – уровень шума в дБ на дистанции 1м; а  $P(R)[dB]$  – на дальности  $R$  рассчитаны значения множителя ослабления сигнала  $V(R)$ , которые приведены в табл. 7.

Таблица 6  
Ослабление излучения

Объект	Дальность, м						Примечание
	1	10	20	30	50	70	
Форд/дизель	0	14	21,5	23	29	31	00, снег
Форд/дизель	0	11,5	18,5				00, асфальт
Форд/дизель		13	20	23			00, асфальт
Ослабление, дБ							

Таблица 7  
Множитель ослабления излучения

Объект	Дальность, м						Примечание
	1	10	20	30	50	70	
Форд/дизель	0	6	4,5	7	5	6	00, снег
Форд/дизель	0	8,5	7,5				00, асфальт
Форд/дизель	0	7	6	7			00, асфальт
Множитель ослабления, дБ							

Видно, что при нахождении автомобиля на твердом покрытии (асфальте) ослабление шума меньше, примерно на 1,5...3дБ, чем когда он стоит на снегу.

Из табл. 7 следует, что за счет поверхности уровни шума источников на удаленностях в десятки метров могут быть даже больше, чем при их расположении в свободном пространстве, т.е. интенсивность шума за счет отражения от поверхности усиливается.

В табл. 8 приведены уровни шума объектов бронетанковой техники.

Таблица 8  
Уровни шума различных источников

Название /тип двигателя	Уровень шума, дБ	Дальность / высота/ угол, м	Примечание
БТР-4/дизель, 500 л.с.	71	20/1/180	2500 об./мин.,с корость 0 м/с
БТР-4/дизель, 500 л.с.	80	10/1/180	2500 об./мин.,с корость 0 м/с
БТР-4/дизель, 500 л.с.	86	5/1/270 со стороны выхлопа	1000 об./мин.,с корость 0 м/с
БТР-4/дизель, 500 л.с.	82	5/1/180 сзади	1000 об./мин.,с корость 0 м/с
БТР-4/дизель, 500 л.с.	70	5/1/90 сбоку	1000 об./мин.,с корость 0 м/с
БТР-4/дизель, 500 л.с.	71	50/1/270	1000 об./мин.,с корость 0 м/с
Т-64БВ, танк, 750 л.с.	72	50/1/200 сзади и сбоку	1000 об./мин Скорость 0 м/с
Колонна из 2-х БТР-4 с интервалом 20 м	67	300/30/225-	2500 об./мин дизель 500 л. с. скорость 30 км/ч

Поскольку шум ветра, дождя и собственные шумы двигателя могут затруднять выделение шумов других объектов техники (целей разведки), то исследовалось распределение мощности источников шума по частоте или коэффициент подавления источника шума:

$$K(f)[dB] = 10 \lg \frac{\int_0^{f_{max}} s(f) df}{\int_f^{f_{max}} s(f) df} \quad (2a)$$

Таблица 9

Полосы частот, вне которых сосредоточена заданная часть мощности шума

Объект	Полоса частот Гц, для заданного уровня мощности,		
	-20 дБ	-30 дБ	-40 дБ
Ветер	2064,5	4842,3	8357,6
Двигатель, автомобиль Форд (макс об.)	6624,2	8516,4	9821,8
Двигатель БТР-4 (ХХ)	5544,8	7684,7	9765,3
Выстрел, пушка 30мм, БТР-4	3458,8	6513,8	9087,0
Мультироторный БПЛА	6325,4	8120,7	9730,3
БПЛА самолетного типа	6968,7	8842,1	9932,2

Распределение мощности шума по частоте, вычисленное с использованием соотношения (2) приведены на рис. 6. Видно, что для большинства объектов наблюдения кроме интенсивных низкочастотных компонент шума присутствуют и достаточно высокочастотные компоненты, которые могут использоваться для их обнаружения и измерения координат. Используя данные по коэффициентам подавления помех режекторным фильтром верхних частот  $K_i(f)[dB]$  для «i» объекта наблюдения можно оценить получаемые контрасты между А и В объектами:

$$\Delta K(f)[dB] = K_A(f)[dB] - K_B(f)[dB]. \quad (26)$$

Получаемые контрасты наблюдения объектов в условиях шума ветра приведены на рис. 6, а межтиповые контрасты – на рис. 7.

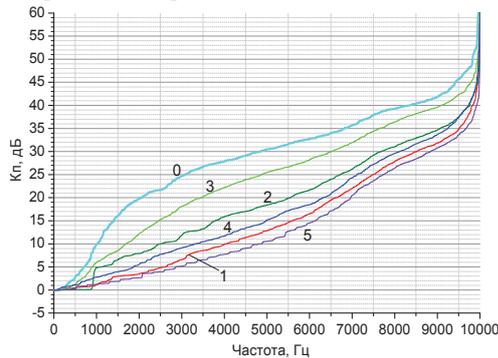


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления шума от полосы режекции: 0 – ветер; 1 – двигатель автомобиля Форд (максимальные обороты, расстояние 20 м); 2 – двигатель БТР-4 (на холостом ходу в ангаре); 3 – выстрел (пушка 30мм, БТР-4); 4 – мультироторный БПЛА (высота 50 м, зависание в точке); 5 – БПЛА самолетного типа

Анализ показывает, что спектр шумов ветра лежит в более низкочастотной области, чем шумы объектов техники. Это означает, что, режектируя низкочастотные компоненты, можно получить дополнительный контраст наблюдения шумов объектов по сравнению с шумами ветра примерно до 10 ... 15дБ.

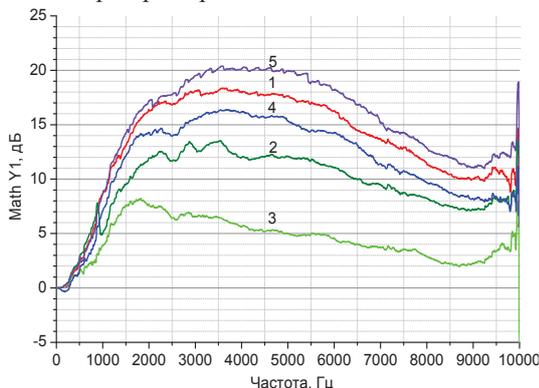


Рис. 7. Контрасты наблюдения различных объектов в зависимости от полосы режекции: 1 – двигатель автомобиль Форд (максимальные обороты, расстояние 20 м); 2 – двигатель БТР-4 (на холостом ходу в ангаре); 3 – выстрел (пушка 30мм, БТР-4); 4 – мультироторный БПЛА (высота 50 м, зависание в точке); 5 – БПЛА самолетного типа

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены данные по уровням акустических шумов различных объектов как наземной техники, так и БПЛА при различных дальностях наблюдения. Так для легковых автомобилей уровень шума на дальностях 1м составляет примерно 55...70дБ, объектов бронетехники на дальностях 5...300м – 67...86дБ, БПЛА на дальностях 2...10м – 92 дБ.
2. При изменении оборотов двигателя от холостого хода до максимальных происходит возрастание уровня шума, достигающее 11дБ для автомобилей.
3. Азимутальная анизотропия шума, обусловленная эффектом экранирования источника корпусом может достигать 16дБ, особо сильно проявляясь вблизи источника шума.
4. Естественные шумы ветра, дождя, собственного двигателя могут в значительной степени (на 2..3 порядка) снижать дальность действия систем акустической разведки.
5. На малых дальностях от источника шума поверхность раздела может приводить к возрастанию уровня шума по сравнению с оценками для свободного пространства. Шум от дистанции затухает несколько медленнее, чем это дают теоретические оценки.
6. Шум ветра является существенно нестационарным процессом В порывах, интенсивность шума может возрасти примерно на 30 дБ. Поэтому система акустической разведки должна строиться, как адаптивная, обеспечивая обнаружение объектов в просветах между порывами ветра.
7. Режектируя низкочастотные компоненты шума в полосе 1000...2000 Гц можно повысить контраст наблюдения наземных объектов примерно на 5...13 дБ и до 10...20 дБ для БПЛА.
8. Шум дождя достаточно пространственно однороден. Для его подавления можно использовать пространственные методы с использованием приема шума на вспомогательный микрофон.

## Литература

- [1] Информационные технологии создания пространственно-временных модемов многопозиционных активно-пассивных радиолокационных систем / Ю.Н. Седышев, В.А. Тютюнник // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 1. – С. 105 – 110.
- [2] Луценко И.В. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связанных станций коротковолнового диапазона / И.В. Луценко, И.В. Попов, В.И. Луценко // Радиопизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. – 2007. – Т.12, №1. – С. 193 – 204.
- [3] Луценко В.И. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона / В.И.Луценко, И.В.Луценко, И.В.Попов // Изв. Вузов Радиофизика. – 2015. – Т.58. – № 1. – С. 10 – 20.
- [4] Виленчик Л.С. Основы пассивной коротковолновой радиолокации / Л.С. Виленчик П.А. Мельяновский, В.Н. Минаев // Радиотехника.-2009.- С.61-66.
- [5] Коршикова Ж.С. Алгоритмы пеленгации и распознавания локализованных источников широкополосных излучений на фоне распределенных в пространстве помех: автореф. дис. на соискание научн. степени кандидата технических наук: спец. 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах) / Ж.С. Коршикова.- М., 2010. – 16 с.
- [6] Анипко О.Б. Комплексная проблема поиска и обнаружения наземных целей для их поражения вооружением, установленным на объектах бронетехники / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков, Ю.М. Бусяк // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2011. Вип. 2 (18). – С.43-47.
- [7] Мокрушин Д. Акустические системы обнаружения / Д. Мокрушин // Электронный ресурс. – <http://twower.livejournal.com/502014.html?thread=14595326>.
- [8] Бирюков И.Ю. Акустическая компонента разведки наземных целей. Проблемы и решения / И.Ю. Бирюков // Харьков: Збірник наукових праць СНУЯЕ та П, 2013. – С.98– 104.
- [9] Системы обнаружения снайперов противника // Электронный ресурс. – <http://newsmilitary.narod.ru/VH-antisniperteh.html>
- [10] Луценко В.И. Дальность действия и разрешающая способность пассивных акустических систем разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 5-й международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2014 14-17-октября 2014г.: сб.научн.ТрудовМРФ-2014, Т.1 «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». – Харьков. – 2014. – С.41 – 44.
- [11] Луценко В.И. Пассивные акустические системы разведки, дальность их действия и разрешающая способность / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Интегровані технології та енергозбереження, щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 3. – С. 60 – 64.
- [12] В.И. Луценко Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк //

Прикладная радиоэлектроника, 2015. – Том 14, № 2. – С.125 – 136.

Поступила в редколлегию 02.03.2017



**Луценко В.И.**, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Область научных интересов: распространение и рассеяние радиоволн, дистанционное зондирование природных сред, радиолокация.



**Луценко И.В.**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Область научных интересов: дистанционное зондирование тропосферы Земли с использованием излучения наземных и спутниковых радиосистем, исследование обратного рассеяния радиоволн СВЧ и КВЧ подстилающими поверхностями, гидрометеорами и антропогенными образованиями.



**Соболяк А.В.**, начальник отдела электрооборудования, Государственное предприятие «Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова». Область научных интересов: радиолокация, разработка радиотехнических систем и комплексов в акустическом и радиодиапазонах.



**Мазуренко А.В.**, канд. тех. наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского (ХАИ). Область научных интересов: радиолокация, обработка сигналов, разработка радиотехнических систем и комплексов, микроконтроллерных систем.

УДК 621.396.96:621.271.029.65

**Характеристики акустичних полів наземних і малорозмірних повітряних об'єктів акустичної розвідки/** В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Мазуренко, О.В. Соболяк // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2017. — Том 16, № 1, 2. — С. 18 – 22.

У статті наведено результати експериментального дослідження рівня шуму, діаграми й спектра випромінювання наземних (транспортні засоби, люди) і аеродинамічних (квадрокоптер, літаковий БПЛА) об'єктів. Розглянуто вплив на рівні й спектри випромінювання дальності й азимута спостереження.

**Ключові слова:** дальність дії, акустична розвідка, аеродинамічні об'єкти, власне випромінювання.

Табл.: 09. Іл.: 07. Бібліогр.: 12 найм.

UDC 621.396.96:621.271.029.65

**Characteristics of acoustic fields of ground and small-sized airborne acoustic reconnaissance objects /** V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, A.V. Mazurenko, A.V. Sobolyak // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2017. — Vol. 16, № 1, 2. — P. 18 – 22.

Range of action and resolution of acoustic reconnaissance systems which use intrinsic radiation of ground (vehicles, people) and aerodynamic (quadcopter and airborne HAV) objects is estimated. Influence of range and observation azimuth on radiation levels and spectra is considered in the paper. Values of attenuation factor for standard objects under observation and in different meteorological conditions are obtained.

**Keywords:** range of action, acoustic reconnaissance system, aerodynamic objects, intrinsic radiation

Tab.: 09. Fig.: 07. Ref.: 12 items